Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ida Midžić

# VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ida Midžić

# VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ida Midžić

# VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Dorian Marjanović

Zagreb, 2018.

University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Ida Midžić

# ECO-EVALUATION OF TECHNICAL SYSTEMS IN THE CONCEPTUAL PHASE OF PRODUCT DEVELOPMENT

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. dr. sc. Dorian Marjanović

Zagreb, 2018

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU


| | |
|---|---|
| *UDK:* | |
| *Ključne riječi:* | Konstruiranje, razvoj proizvoda, ekodizajn, konceptualna faza, vrednovanje koncepata, kriteriji ekološke prihvatljivosti, fizikalni efekti, kvaliteta pretvorbe energije, utjecaji na okoliš, procjena životnog ciklusa (LCA), strategije gospodarenja otpadom, rangiranje koncepata. |
| *Znanstveno područje:* | TEHNIČKE ZNANOSTI |
| *Znanstveno polje:* | STROJARSTVO |
| *Institucija u kojoj je rad izrađen:* | Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu |
| *Mentor rada:* | Prof. dr. sc. Dorian Marjanović |
| *Broj stranica:* | 286 |
| *Broj slika:* | 73 |
| *Broj tablica:* | 48 |
| *Broj korištenih bibliografskih jedinica:* | 381 |
| *Datum obrane:* | |
| *Povjerenstvo:* | Prof. dr. sc. Mario Štorga (FSB, Zagreb) - predsjednik<br>Prof. dr. sc. Dorian Marjanović (FSB, Zagreb) - mentor<br>Izv. prof. dr. sc. Roman Žavbi (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana) - član |
| *Institucije u kojima je rad pohranjen:* | Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu<br>Nacionalna sveučilišna knjižnica u Zagrebu |

## ZAHVALA

Zahvalu upućujem mentoru, profesorima, kolegama, obitelji i prijateljima. Hvala Vam što ste bili uz mene tijekom poslijediplomskog studija i motivirali me na ostvarenje ove doktorske disertacije.

Hvala mentore prof. dr. sc. Doriane Marjanović na prilici da upišem poslijediplomski studij Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Hvala na pomoći, potpori i poticanju na znanstveni rad te posebno tijekom perioda izrade doktorske disertacije. Hvala na strpljivosti i povjerenju, te predanom i stručnom vodstvu kroz poslijediplomski studij. Znanje i vještine koje sam stekla na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda imaju trajnu vrijednost za mene u vidu cjeloživotnog obrazovanja.

Hvala prof. dr. sc. Mario Štorga na trudu, zalaganju i napornom radu čime pridonosite uspješnosti i kvaliteti istraživanja. Hvala na ohrabrenju i savjetima, na obnašanju dužnosti predsjednika povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada, te posvećenosti detaljima tijekom čitanja doktorske disertacije. Veselim se novim istraživanjima koje ćemo u budućnosti napraviti.

Hvala prof. dr. sc. Romane Žavbi, na zanimanju za provedeno istraživanje, uloženom trudu tijekom pregleda doktorske disertacije, savjetima kako poboljšati kvalitetu istraživanja i svemu onome što nisam znala prije konzultacija s vama.

Hvala prof. dr. sc. Nevene Pavković. Hvala na primjedbi da se mi znanstvenici bavimo i književnošću, ali mislim da drugačije ne bi ni trebalo biti.

Hvala prof. dr. sc. Nenade Bojčetić na podršci tijekom svih ovih godina.

Hvala svima na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje na stvaranju poticajne radne sredine, timskom radu, te razmjeni znanja, iskustava i kontakata sa znanstvenicima na inozemnim sveučilištima.

Hvala Sveučilištu u Zagrebu što je prepoznalo vrijednost i važnost provedenog istraživanja, te zahvaljujem na financijskoj podršci Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske i Hrvatske zaklade za znanost aktivnostima objavljivanja znanstvenih članaka u cilju veće međunarodne vidljivosti. Istraživanje ne bi bilo moguće provesti bez potpore *PRé Consultants B.V., Netherlands* i *Ecoinvent Association, Switzerland* te im hvala na odobrenju uporabe softvera *SimaPro™* i pristupu bazi *Ecoinvent™*.

Najljepša hvala prijateljicama i prijateljima na podršci i razumijevanju od samih početaka naših druženja i prijateljstava. Posebno hvala mojim strojarima; prijateljicama, prijateljima, kolegicama i kolegama koji su sudjelovali u istraživanju te omogućili prikupljanje podataka ključnih za ostvarenje istraživanja i doktorske disertacije. Hvala kolegama u RASCO Ltd. – super ste. Hvala mojoj *DRAWDOWN* kohorti i kolegama u GlobalLogic-u.

Hvala mami i tati, seki Alisi i Aki na ljubavi i podršci.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno služeći se znanjem i vještinama stečenim ranije i tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te služeći se stručnom literaturom navedenom na kraju rada.

## SADRŽAJ

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU ..... I
ZAHVALA ..... II
IZJAVA ..... IV
SADRŽAJ ..... V
PREDGOVOR ..... IX
SAŽETAK ..... XI
EXTENDED SUMMARY ..... XII
POPIS OZNAKA ..... XIX
POPIS KRATICA ..... XXIII
POPIS SLIKA ..... XXV
POPIS TABLICA ..... XXVIII
POPIS PRILOGA ..... XXX

1. Uvodna razmatranja ..... 1
    1.1. Uvod u temu istraživanja ..... 1
    1.2. Motivacija ..... 3
    1.3. Ciljevi istraživanja i hipoteza istraživanja ..... 6
    1.4. Metodologija istraživanja ..... 11
    1.5. Znanstveni doprinosi istraživanja ..... 16
    1.6. Struktura doktorske disertacije ..... 19

2. Pregled područja istraživanja ..... 23
    2.1. Teorijski okvir istraživanja ..... 23
        2.1.1. Konstruiranje i razvoj proizvoda ..... 24
        2.1.2. Konceptualna faza i vrednovanje koncepata ..... 27
        2.1.3. Ekodizajn ..... 30
        2.1.4. Životni ciklus proizvoda ..... 36
        2.1.5. Faktor poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda ..... 38
        2.1.6. Konstruiranje za okoliš ..... 42
    2.2. Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata ..... 42
        2.2.1. Kvalitativne metode ..... 45
        2.2.2. Semi-kvantitativne metode ..... 47
        2.2.3. Kvalitativno-kvantitativne metode ..... 54

2.2.4. Kvantitativne metode ..... 56
2.3. Metode procjene utjecaja na okoliš ..... 61
2.3.1. Metoda procjene životnog ciklusa (LCA) ..... 61
2.3.2. Procjena potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda ..... 67
2.4. Rasprava pregleda literature područja istraživanja ..... 69
3. Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti ..... 77
3.1. Preliminarna analiza ..... 77
3.2. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata ..... 79
3.2.1. Istraživačka pitanja studije slučaja ..... 83
3.2.2. Sudionici studije slučaja ..... 85
3.2.3. Koncepti procesa pranja rublja ..... 86
3.2.4. Nacrt i izvođenje studije slučaja ..... 93
3.2.5. Rezultati studije slučaja ..... 97
3.3. Rasprava studije slučaja i zaključci ..... 100
4. Kriteriji i prijedlog metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti ..... 104
4.1. Motivacija za razvoj kriterija i metode ..... 104
4.2. Metoda vrednovanja ..... 110
4.3. Kriteriji ekološke prihvatljivosti predložene metode ..... 117
4.3.1. Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala ..... 118
4.3.2. Broj pretvorbi energije i signala ..... 125
4.3.3. Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu ..... 125
4.3.4. Broj sekundarnih efekata prema okolišu ..... 128
4.3.5. Broj promjena agregatnog stanja materijala ..... 129
4.4. Procedura rangiranja koncepata ..... 129
4.5. Primjena metode na primjeru koncepata pranja rublja ..... 130
4.5.1. Koncept pranja rublja A ..... 133
4.5.2. Koncept pranja rublja B ..... 141
4.5.3. Koncept pranja rublja C ..... 143
4.5.4. Koncept pranja rublja Dª ..... 147
4.5.5. Koncept pranja rublja E ..... 152

4.5.6. Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, $D^a$ i E predloženom metodom ..... 155
4.6. Ispitivanje teorijske konzistentnosti metode zamjenom jednog koncepta iz skupa drugim ..... 157
4.6.1. Koncept pranja rublja $D^b$ ..... 157
4.6.2. Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, $D^b$ i E predloženom metodom ..... 163
4.7. Primjena predložene metode na primjeru koncepata stolnog sata-budilice ..... 164
4.7.1. Koncept mehaničkog sata-budilice ..... 166
4.7.2. Koncept mehaničko-digitalnog sata-budilice ..... 171
4.7.3. Koncept digitalnog sata-budilice ..... 175
4.7.4. Rezultati vrednovanja koncepata stolnog sata-budilice predloženom metodom ..... 178
4.8. Ograničenja predložene metode ..... 184
5. Vrednovanje temeljem procjene životnog ciklusa ..... 186
5.1. Uloga procjene životnog ciklusa u provedenom istraživanju ..... 186
5.2. *LCA* metoda ..... 188
5.3. Primjena *LCA* metode na primjeru koncepata iz studije slučaja ..... 193
5.3.1. Cilj i opseg procjene životnog ciklusa koncepata ..... 193
5.3.2. LCA koncepta pranja rublja A ..... 196
5.3.3. LCA koncepta pranja rublja B ..... 203
5.3.4. LCA koncepta pranja rublja C ..... 207
5.3.5. LCA koncepata čišćenja rublja $D^a$ i $D^b$ ..... 213
5.3.6. LCA koncepta pranja rublja E ..... 215
5.4. Rezultati procjene utjecaja na okoliš i rangiranje koncepata ..... 217
6. Validacija predložene metode i verifikacija istraživanja ..... 225
6.1. Postupak validacije predložene metode ..... 225
6.2. Validacija predložene metode ..... 227
6.3. Rasprava ograničenja predložene metode ..... 243
6.4. Smjernice za verifikaciju istraživanja i primjenu predložene metode u praksi ..... 246
7. Zaključak ..... 248

7.1. Rasprava i rezultati istraživanja ..... 248
7.2. Obrazloženje znanstvenih doprinosa istraživanja ..... 256
7.3. Smjernice budućih istraživanja ..... 258

Popis literature ..... 261
PRILOZI ..... XXXI
POPIS PROGRAMSKIH ALATA ..... XL
ŽIVOTOPIS ..... XLI
BIOGRAPHY ..... XLII
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA ..... XLIII

# PREDGOVOR

Istraživanje prikazano u ovoj doktorskoj disertaciji dio je projekta 120-1201829-1828 *„Modeli i metode upravljanja znanjem u razvoju proizvoda”* Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske te projekta MInMED - *„Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development”* Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske i Hrvatske zaklade za znanost. Disertacija obuhvaća pregled istraživanja na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Odluka o konceptu proizvoda od velike je važnosti za uspješnost proizvoda na tržištu. U konceptualnoj fazi razvoja tehničkog sustava koncepcijska rješenja se generiraju, razmatraju i vrednuju s ciljem osmišljavanja i odabira najprihvatljivije varijante za daljnji razvoj. Pregledom literature o ekodizajnu pri konstruiranju ustanovljeno je da postoji potreba za razvojem metode vrednovanja kojom bi bilo moguće usporediti ekološku prihvatljivost koncepata tehničkih sustava (proizvoda) koji se temelje na različitim radnim principima

Vrednovanje tehničkih sustava u konceptualnoj fazi obzirom na kriterije ekološke prihvatljivosti za poduzeća može biti jednako važno kao i vrednovanje obzirom na kvalitetu zadovoljenja korisničkih potreba, troškove, rizike i resurse. Iako to nije uvijek slučaj u praksi, ekološku prihvatljivost tehničkih sustava potrebno je provjeriti dovoljno rano u procesu konstruiranja da je moguće učiniti korake prema razvoju i odabiru koncepta s poželjnim odlikama, te izbjeći rješenja s nepoželjnim i neprimjerenim utjecajima na okoliš. Ukoliko ekološka prihvatljivost ne bi bila razmatrana u konceptualnoj fazi, poboljšanja ekološke prihvatljivosti nakon odluke o konceptu bila bi inkrementalna poboljšanja tijekom konstrukcijske razrade bez mogućnosti promjene koncepcijskog rješenja i radikalnije promjene na modelu proizvoda.

U konceptualnoj fazi definiraju se kriteriji vrednovanja radi donošenja konačne odluke o rješenju koje će rezultirati gotovim proizvodom. Provedenim istraživanjem potvrđeno je da je moguće ostvariti vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja tijekom koje uobičajeno nedostaju podaci za procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*) koncepata proizvoda. U konceptualnoj fazi potrebno je razmotriti široki spektar različitih i inovativnih koncepcijskih rješenja. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti takvih koncepata je upitno jer zahtijeva prikupljanje i generiranje velikog broja podataka o konceptima, te dodatno obučavanje konstruktora u radu s metodama i alatima za procjenu životnog ciklusa i procjenu utjecaja na okoliš.

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava čine glavne teorijske i praktične doprinose provedenog doktorskog istraživanja. Metodološki doprinos istraživanja očituje se u načinu provjere i validacije konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti kriterijima i predloženom metodom temelji se na analizi lanaca fizikalnih efekata, transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu te vrednovanju sekundarnih efekata prema okolišu koncepata tehničkih sustava. Rezultat primjene metode je rangiranje koncepcijskih rješenja temeljem kriterija ekološke prihvatljivosti.

Svrsishodnost metode provjerena je na primjerima koncepata pranja rublja te stolnih satova budilica. Resursi koji su nužni za primjenu metode uobičajeno su dostupni u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Praktična primjenjivost predložene metode ostvarena je na način da su podaci o koracima metode, kriterijima ekološke prihvatljivosti i smjernicama za primjenu metode sadržane u obliku tablica. Detaljnost informacija koje konstruktori trebaju generirati tijekom primjene metode sukladna je zahtijevanoj razini detaljnosti za konceptualnu fazu.

Konceptualna faza i odluke koje su donesene na temelju zaključaka donesenih u toj fazi odlučujuće su za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda. Razvojem predložene metode vrednovanja nastoji se ukazati na važnost sistematičnog i metodom propisanog vrednovanja ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava. Istraživanjem je potvrđeno da je moguće ostvariti vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi tijekom koje uobičajeno nedostaju podaci za procjenu utjecaja na okoliš i analizu životnog ciklusa proizvoda. Analiza lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu omogućavaju razmatranje karakteristika i vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja u procesu konstruiranja. Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda podržavaju aktivnosti vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi koja je odlučujuća faza konstruiranja u pogledu uspješnosti proizvoda i za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda.

## SAŽETAK

### *Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava*

***Ključne riječi:*** *Konstruiranje, razvoj proizvoda, ekodizajn, konceptualna faza, vrednovanje koncepata, kriteriji ekološke prihvatljivosti, fizikalni efekti, kvaliteta pretvorbe energije, utjecaji na okoliš, procjena životnog ciklusa (LCA), strategije gospodarenja otpadom, rangiranje koncepata*

U konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava potrebno je usporedno razmotriti više koncepcijskih rješenja te ih vrednovati obzirom na kvalitetu zadovoljenja potreba korisnika, troškovima, rizicima, ekološkoj prihvatljivosti i ostalim za izbor koncepta važnim kriterijima. Unatoč dobroj zastupljenosti metoda koje omogućavaju vrednovanje ekološke prihvatljivosti tijekom konstruiranja, pregledom literature nisu pronađene metode koje bi bile specifično namijenjene konceptualnoj fazi i vrednovanju koncepcijskih rješenja koja se međusobno razlikuju u radnim principima i fizikalnim efektima koje isporučuju. Studija vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata kvalitativnim kriterijima pokazala je da je vrednovanje podložno subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti u slučaju kada kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno određeni. Shodno tomu i ciljevima istraživanja razvijeni su kriteriji ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu i predložena metoda. Kriteriji su eko-efektivnost i broj pretvorbi oblika energije i signala, ekološka prihvatljivost i broj sekundarnih efekata prema okolišu te broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu. Predloženu metodu čine vrednovanje kriterijima i primjena pravila sume rangova u cilju rangiranja koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti. Validacija kriterija i predložene metode temelji se na provjeri unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti. Primjena predložene metode demonstrirana je na primjerima vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja i koncepata stolnog sata. Svrsishodnost predložene metode potvrđena je usporedbom s rezultatima studije vrednovanja kvalitativnim ekodizajn smjernicama i procjenom životnog ciklusa koncepata.

## EXTENDED SUMMARY

### *Eco-Evaluation of Technical Systems in the Conceptual Phase of Product Development*

***Keywords:*** *Engineering design, product development, ecodesign, conceptual phase, concept evaluation, environmental criteria, physical effects, energy transformation quality, environmental impact, life cycle assessment (LCA), waste management hierarchy, concept ranking*

Up to 80% of factors that determine quality, costs, environmental impact and market success of a product are determined during the conceptual design phase. Environmental friendliness of a product under development is one of the many important evaluation criteria to consider during concept selection. Once the concept of a product is selected for further development, improvements to the environmental profile of the product are limited to the embodiment, detailing, and life cycle design changes.

Environmental impact assessment is the most widely accepted approach to evaluating environmental friendliness of a product. However, methods such as Life Cycle Assessment (*LCA*) are not suitable for environmental evaluation in the conceptual design phase or comparison of original design concepts. *LCA* provides quantitative analysis of environmental impacts of products and processes, but it requires detailed and complete product information which is generally not available in the conceptual phase.

There are two main approaches to eco-evaluation in the conceptual design phase; qualitative and quantitative eco-evaluation. Qualitative eco-evaluation is concept evaluation which is based on an evaluation of product's attributes against environmental criteria. Quantitative eco-evaluation is based on life cycle analysis, environmental impact approximation or *LCA* of similar technical systems used as a reference. Ecodesign methods and tools prescribe using a combination of qualitative multi-criteria eco-evaluation approach and quantitative analytical life cycle assessment. Usually, numerous attributes of the final solution

and its life cycle need to be assumed a forehand to perform *LCA* of a technical system. These technical systems' attributes may turn out to be outdated after the design is finalized. Prejudiced interpretation of environmental friendliness of concepts may lead to negative outcomes such as selection of environmentally unfavorable concept which may cause additional costs to the development process.

Environmental impact assessment in the conceptual design phase can be managed without performing *LCA* by exploiting the commonalities between different product systems. Currently available environmental impact approximation methods do not support original design concept comparison. Original design concepts are concepts usually without predecessors, so it is not manageable or available to find similar comparable reference products on the market.

Development of environmentally friendly products and solutions is a major driver for innovation and product development. This is particularly important in cases of new and sustainable alternatives replacing well-established, but environmentally costly products. Quantitative eco-evaluation in conceptual phase requires the development of embodiment design solutions and analytical verification of anticipated performance of the product in all life cycle stages. Eco-evaluation should be neither costly nor time-consuming and support evaluation of product concepts that potentially integrate new, innovative and original solutions. A qualitative approach to eco-evaluation is thus more suitable for the conceptual design phase.) As qualitative approaches to eco-evaluation are far less studied, generally more prone to the prejudiced interpretation of environmental friendliness by product developers and better suited for conceptual design phase when most information relevant to the future product are qualitative, not quantitative, aims of the research reported in this doctoral thesis are:

1.) Development of environmental criteria to enable eco-evaluation of technical systems in the conceptual phase of product development

2.) Development of eco-evaluation method based on environmental criteria

3.) Enabling eco-evaluation and comparison of technical systems in the conceptual design phase.

In the preliminary stage of the research, the appropriateness of ecodesign guidelines to be used as environmental criteria is explored in a case study. Mechanical engineers were given a task to evaluate environmental friendliness of five laundry cleaning conceptual solutions and to rank the concepts accordingly.

In the first part of the case study, evaluation criteria were not proposed to evaluators, so consequently obtained rankings were based on their subjective preferences and personal notions on environmentally better and worse concepts. In the case of two concepts, a paradoxical situation occurred, known as Arrow's paradox where some evaluators ranked one product concept as one of the least environmentally friendly concepts and other evaluators ranked the same concept as one of the best environmentally friendly concepts. Concept rankings were generated by evaluators individually, so the case study was focused on evaluators working independently.

In the second part of the case study, the same set of concepts was eco-evaluated. This time, evaluators used ecodesign guidelines as environmental criteria and a datum ranking method. Different rankings of concepts have been established and results of the two sets of rankings are compared. There were more dissimilarities in rankings of less environmentally friendly concepts in the first part of the case study. One of the reasons for this outcome may be a lack of information on environmental criteria that need to correspond to all the various product concepts presented to evaluators. Then, there is a lack of environmentally related information about the likely performance of those concepts. Thirdly, personal preferences and experiences guided evaluators in their choice of more and less eco-friendly concepts. The introduction of eco-evaluation criteria in the second part of the case study has yielded more coherent rankings.

Results of the case study show that using ecodesign guidelines as environmental criteria is a better option than not using any criteria during concept evaluation. However, most of environmental criteria prescribed by ecodesign guidelines refer to product attributes which were not available in the description of laundry washing concepts in the study. According to widely available models of the design process, technical systems' concepts can be described by their functions, physical effects, working principles and principle solutions. Embodiment and detailing are usually performed after the concept is selected for further development as the most

promising solution. Detailed information about concepts is usually not available in the conceptual design phase.

A question arises on how to enable environmental evaluation in the conceptual design phase since information about the product at this phase are mostly qualitative, product key features and embodiments are not finalized and the life cycle of the product is unknown or vaguely defined.

As the concept of a product can be represented and modeled as a high-level abstraction model where functions of the product are thought of as transformation entities, each concept is described by chains of a characteristic energy, material and signal transformations which enable particular physical effects. Energy, material, and signal transformed in the technical process are called operands. Since chains of physical effects and secondary effects towards the environment can be deduced from the technical process, environmental friendliness of a technical system can also be known by assessing the properties of operands transformed in the technical process.

The hypothesis of doctoral dissertation:

***Eco-evaluation of a particular technical system can be managed by assessing properties of operands transformed in the technical process.***

Specifically developed within the thesis to support product concept eco-evaluation, five environmental criteria are the basis of the method proposed to support technical systems concept eco-evaluation. Chains of effects and secondary effects towards the environment contain input data for the method proposed. Eco-evaluation is performed by evaluating energy, material and signal transformations indicated by chains of physical effects and secondary effects towards the environment which are outputs from the technical process.

Theoretical background of energy transformity effectiveness criteron is emergy theory. According to emergy theorists, quality of different energy forms, materials, and services (environmental, human and economic) can be evaluated on a common basis by conversion of Joules, calories and other energy units to a unified form of available energy. In this case, the choosen energy units are solar emergy units called solar transformities. Solar transformities can be defined for conversions of solar energy units to other energy form units (wind kinetic energy,

tide energy, Earth crustal heat), use of resources (coal, fuel, wood) and some other flows which do not have to be exclusively energy, but are a result of previous energy or resource utilization processes such as human services and information.

Solar transformity factors are quantifiable in form of solar emergy units per unit of useful energy in corresponding energy form. Solar emergy units can be calculated by including all energy and resource utilization processes to produce useful energy in a desirable energy form. Then, a hierarchy of energy forms can be composed and it includes energy forms of lower and higher quality, ranked in an orderly list format.

Inspired by emergy theory, favorable energy transformations are energy transformations where low-quality energy forms are used up to realize the work potential of high-quality energy forms. Energy transformity effectiveness criterion considers the type of energy form transformations that are indicated by the functions of the product (for example, conversion of electrical to mechanical energy, electromagnetic to heat, mechanical to acoustic energy etc.).

Energy transformity of a particular energy conversion process is a coefficient of solar transformity of output energy form and solar transformity of input energy form. Energy transformity effectiveness is a sum of all energy transformities of energy transformations indicated by the chains of physical effects inherent to the concept of the technical system.

Energy transformity can be defined only for functions of the product indicating that there is a change (conversion of, or transformation) in the energy form between input energy flow and output energy flow. For some energy forms, energy transformity factors are very large, so transformity factors are transformed into a logarithmic scale which simplifies calculation.

The second environmental criterion is a minimizing criterion of the total number of energy, material and signal transformations. An optimal solution is characterized by the high value in energy transformity effectiveness and the low total number of energy, material and signal transformations.

The criterion of eco-quality of energy, material and signal waste or emissions corresponds to evaluating secondary effects towards the environment, e.g. output flows of energy, material, and signal to the environment. This is an eco-criterion for evaluating material

operand transformations that are non-intended secondary outputs (e.g. waste, pollutants, and emissions). The criterion is based on adopted concepts of waste management hierarchy, levels of waste toxicity and environmental friendliness of end of life treatments. To each option, a value from a twenty-point scale is assigned. The scale provides sufficiently fine measurements without being overly precise. It is linear and ranges from -10 to +10. Values of zero, +5 and -5 are not specified to give a more rigorous value distribution between more and less prosperous solutions. Eco-quality of energy, material and signal waste/emissions is a sum of eco-quality of all output flows.

Criterion of the total number of material, energy and signal waste or emissions corresponds to evaluating the number of different output flows of energy, material, or a signal which can be deduced from the function structure or chains of effects of the concept. An optimal solution is characterized by the high value of eco-quality of energy, material and signal waste or emissions and low value of the total number of energy, material and signal waste or emissions, e.g. outputs to the environment potentially resulting in an environmental impact.

Final environmental criterion is the number of transformations in which material changes states (solid, gas, liquid). The change of material state indicates that additional energy is required for the transformation to occur. It also points out some special properties required for principle solutions supporting the transformation (such as heat resistance) which represent material requirements, and as such are a good indicator of environmental impact.

Eco-evaluation enabled by five environmental criteria and a rank-sum rule to aggregate the criteria outcomes is supported by a decision matrix. Eco-evaluation by using the proposed method produces a ranking of concepts indicating environmental friendliness of concepts in a comparable way.Environmental criteria and eco-evaluation method specifically developed for qualitative eco-evaluation in the conceptual design phase are main contributions of the work reported in the doctoral thesis. Qualitative approach to eco-evaluation (evaluation according to environmental criteria) is needed in early design phases and support for original design concepts. Eco-evaluation method proposed is to be used in early stages of product development, e.g. in the conceptual design phase when changes to the product concept are neither costly nor time-consuming. Eco-evaluation enables engineers to make environmentally more considered

decisions based on qualitative environmental criteria and allows for evaluation of product's concepts that potentially integrate new and innovative solutions.

Effectiveness and efficiency of environmental criteria and eco-evaluation method proposed are demonstrated on two illustrative examples. The first example is a more comprehensive case study of laundry cleaning conceptual solutions where *LCA* of conceptual solutions has been performed. The second example is based upon rankings comparison based on data from a study on eco-evaluation of three alarm clocks. Examples of using the proposed method confirm that the method provides results efficiently and effectively. The effectiveness of the method is confirmed by comparing eco-rankings of laundry cleaning concepts produced by engineering designers in a case study, eco-rankings of the same concepts based on *LCA* results and eco-rankings resulting from applying the proposed method to the same set of concepts.

## POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Značenje |
|---|---|---|
| $A_i$ | - | Koncept proizvoda iz skupa koncepata proizvoda $A_i$ $(i = 1, \dots, n)$ |
| $C_j$ | - | Kriterij ekološke prihvatljivosti iz skupa kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |
| $E_A$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije anorganskog materijala |
| $E_B$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti biološke energije i proteina |
| $E_{Ch}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti kemijske energije |
| $E_E$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti električne energije |
| $E_{EM}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti elektromagnetske energije |
| $E_F$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije goriva |
| $E_H$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti toplinske energije |
| $E_{HeO}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije heterogenog organskog materijala |
| $E_{HoO}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije homogenog organskog materijala |
| $E_{Hu}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti ljudske snage |
| $E_I$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti informacija, tj. signala |
| $E_K$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti kinetičke energije |
| $E_{LCh}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti latentne kemijske i svjetlosne energije |
| $E_{LH}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti latentne toplinske energije |
| $E_{Me}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti mehaničke energije |
| $E_N$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti nuklearne energije |

| Oznaka | Mjerna jedinica | Značenje |
|---|---|---|
| $E_P$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti potencijalne energije |
| $E_{So}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti solarne energije |
| $E_W$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije vjetra |
| $E_{WT}$ | *seJ/J* | Faktor transformabilnosti energije valova, plime i oseke |
| $E_m$ | *seJ* | Solarna emergija (količina energije po jedinici solarne energije) |
| $E_t$ | *kWh* | Potrošnja energije za standardni ciklus pranja |
| $E_x$ | *J* | Eksergija |
| $L_p$ | *dB* | Razina zvučnog tlaka (razina buke) |
| $M_R$ | - | Matrica relacija skupa koncepata proizvoda $A_i$ i skupa kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ |
| $N_{Agr}(A_i)$ | - | Dobrota koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij broja promjena agregatnog stanja materijala koncepata proizvoda |
| $N_{\epsilon_{EF}}(A_i)$ | - | Dobrota koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij broj sekundarnih (latentnih) efekata prema okolišu koncepata proizvoda |
| $N_{\epsilon_{TR}}(A_i)$ | - | Dobrota koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij broj pretvorbi oblika energije koncepata proizvoda |
| $P$ | *W* | Snaga |
| $PE$ | - | engl. *personal equivalent* - jedinica utjecaja na okoliš po osobi |
| $Pt$ | *Pt* | engl. *ecopoint* - jedinica utjecaja na okoliš |
| $R$ | - | Raspon uzorka |
| $S_{\epsilon_{EF}}(A_i)$ | - | Dobrota koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata prema okolišu koncepata proizvoda |

| Oznaka | Mjerna jedinica | Značenje |
|---|---|---|
| $S_{\epsilon_{TR}}(A_i)$ | - | Dobrota koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij eko-efektivnosti pretvorbe oblika energije, materijala i signala koncepata proizvoda |
| $T_o$ | *K, °C* | Temperatura okoline |
| $V_o$ | $m^3$ | Volumen |
| $V(A_i)$ | - | Rang dobrote koncepta proizvoda $A_i$ $(i = 1, \dots, n)$ obzirom na kriterije ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |
| $V\left(x_j(A_i)\right)$ | - | Rang dobrote $x_j$ koncepta proizvoda $A_i$ obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |
| $W_t$ | $m^3$*/ciklus* | Potrošnja vode za standardni ciklus pranja |
| $e_{ij}$ | - | Rang dobrote koncepta proizvoda $A_i$ $(i = 1, \dots, n)$ obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ |
| $f_{TR}$ | *seJ/J* | Faktor solarne transformabilnosti oblika energije |
| $f_{TR_I}$ | *seJ/J* | Faktor (solarne) transformabilnosti ulaznog oblika energije |
| $f_{TR_O}$ | *seJ/J* | Faktor (solarne) transformabilnosti izlaznog oblika energije |
| $m_a$ | *kg* | Masa |
| $m$ | - | Broj kriterija ekološke prihvatljivosti u skupu kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |
| $n$ | - | Broj koncepata proizvoda u skupu koncepata proizvoda $A_i$ $(i = 1, \dots, n)$ |
| $p$ | *Pa* | Tlak |
| $t$ | *s* | Vrijeme |
| $w_j$ | - | Relativne važnosti, tj. težinski koeficijenti kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |

| Oznaka | Mjerna jedinica | Značenje |
|---|---|---|
| $\bar{x}$ | - | Aritmetička sredina uzorka |
| $x_{ij}$ | - | Značajka *j* koncepta $A_i$ |
| $x_j(A_i)$ | - | Stupanj zadovoljenja kriterija ekološke prihvatljivosti $C_j$ koncepta proizvoda $A_i$, tj. dobrota koncepta $A_i$ obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ |
| $\Delta S$ | *J* | Entropija |
| $\rho_{ij}$ | - | Članovi matrice relacija $M_R$ skupa koncepata $A_i$ $(i = 1, \dots, n)$ i skupa kriterija ekološke prihvatljivosti $C_j$ $(j = 1, \dots, m = 5)$ |
| $\sigma$ | - | grč. *sigma*, standardna devijacija uzorka |
| $\omega$ | *°/min* | grč. *omega*, kutna brzina |
| $\epsilon_{TR}$ | - | grč. *epsilon*, teoretska eko-efektivnost pretvorbe (transformacije) oblika energije |

## POPIS KRATICA

| Kratica | | Značenje |
|---|---|---|
| ABS | … | Akril-butadien-stirol |
| *Al+Zn+Cu* | … | Aluminijska legura |
| *AE11* | … | engl. *Ethoxylated alcohol* – etoksilirani alkohol |
| *BOM* | … | engl. *Bill of materials* – lista materijala proizvoda |
| *CAD* | ... | engl. *Computer Aided Design* – računalom podržano konstruiranje |
| $CH_4$ | ... | Metan |
| $CO_2$ | ... | Ugljikov dioksid |
| *DAS1* | ... | engl. *Fluorescent whitening agent* – florescentni izbjeljivač |
| *DR* | ... | engl. *Design Repository* |
| *DRM* | ... | engl. *Design Research Methodology* |
| *EuP* | … | engl. *energy using products* – proizvodi koji koriste energiju za rad |
| *Faktor X* | | Faktor poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda |
| *FIM* | | *Function Impact Matrix* metoda |
| *GHG* | … | engl. *greenhouse gases* – staklenički plinovi |
| *IEC* | … | engl. *International Electrotechnical Commission* |
| *ISO* | … | engl. *International Organization for Standardization* – Međunarodna organizacija za standarde i standardizaciju |
| *LAS* | … | engl. *Alkylbenzene sulfonate, linear* – linearni alkil benzen sulfonat |
| *LCA* | … | engl. *Life Cycle Assessment* – Procjena životnog ciklusa |
| *LCC* | … | engl. *Life Cycle Costing* – Procjena troškova životnog ciklusa |
| *LCD* | … | engl. *liquid crystal display* |
| *LCP* | … | engl. *Life Cycle Planning* – Projektiranje životnog ciklusa |

| Kratica | | Značenje |
|---|---|---|
| *MDF* | … | engl. *medium density fiber* – medijapan |
| *PE* | ... | Polietilen |
| *PMMA* | ... | Poli-metil-meta krilat |
| *QFD* | ... | engl. *Quality Function Deployment – Kuća kvalitete* |
| *SLCA* | … | engl. *Streamlined (Simplified) Life Cycle Assessment* |
| *$SO_2$* | … | Sumporov dioksid |
| *STPP* | … | engl. *Sodium tripolyphosphate* – natrij-trifosfat |
| *TTS* | ... | engl. *Theory of Technical Systems* – Teorija tehničkih sustava |

## POPIS SLIKA


Slika 1-1. Utjecaj odluka na znanje i informacije o proizvodu, troškove izmjena, stupanj slobode rješenja i utjecaje na okoliš [3], [4], [5] ..... 2
Slika 1-2. Koraci provedenog istraživanja ..... 12
Slika 2-1. Model razvoja proizvoda (Andreasen i drugi [95]) ..... 24
Slika 2-2. Razine razrade i značajke proizvoda [44] ..... 25
Slika 2-3. Proces razvoja prema ISO/TR 14062 [99], [100] ..... 26
Slika 2-4. Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda - ekodizajn [120] ..... 31
Slika 2-5. Ekodizajn, razvoj održivih proizvoda i održivi razvoj [24] ..... 33
Slika 2-6. Utjecaj odluka tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda na konačni utjecaj proizvoda na okoliš i troškove [29] ..... 36
Slika 2-7. Faze životnog ciklusa i strategije poboljšanja eko-efektivnosti proizvoda ..... 38
Slika 2-8. Četiri strategije za postizanje poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda [8] 39
Slika 2-9. Stupanj razrade rješenja i informacije o ekološkoj prihvatljivosti tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [144] ..... 73
Slika 3-1. a) Potrošnja energije automatske perilice rublja za različite temperature pranja; b) Utjecaj temperature pranja na emisije stakleničkih plinova [280] ..... 88
Slika 3-2. Koncept B - Eco Bubble™ pranje tekstila pjenom deterdženta i vode [284] ..... 90
Slika 3-3. a) Sustav za ultrazvučno pranje tekstila [285]; b) *Electrolux Ultra Clean* perilica rublja sa olovkom za uklanjanje manjih mrlja ultrazvukom [286] 91
Slika 3-4. Koncept D - 'Orbit' koncept pranja tekstila suhim ledom [287]; slike dostupne na [288], [289] ..... 92
Slika 3-5. Koncept E - pranje tekstila polimernim kuglicama [290] ..... 93
Slika 3-6. Tri faze studije slučaja ..... 93
Slika 3-7. Obrasci za zapisivanje vrednovanja i rangiranja u studiji slučaja ..... 96
Slika 4-1. Prikaz relacija između skupa koncepata i skupa kriterija vrednovanja (ilustrirano prema [301]) ..... 111
Slika 4-2. Opći prikaz matrice odlučivanja [303] ..... 112
Slika 4-3. Tehnički proces i fizikalni efekti procesa pranja rublja (koncept A) ..... 133
Slika 4-4. Prikaz koncepata američke (a), europske (b) i japanske (c) perilice za strojno pranje rublja u kućanstvima [318] ..... 134
Slika 4-5. Oznake funkcija, operanada i sekundarnih efekata prema okolišu u modelu funkcija pomoću toka ..... 135
Slika 4-6. Model funkcija pomoću toka koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60°C/90°C), (legenda: Slika 4-5) ..... 135

Slika 4-7. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60°C/90°C) ..... 136
Slika 4-8. Lanac efekata *L1* (koncept pranja rublja A) ..... 137
Slika 4-9. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (legenda: Slika 4-8) . 138
Slika 4-10. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B ..... 142
Slika 4-11. Tehnički proces i fizikalni efekti ultrazvučnog pranja rublja (koncept C) ..... 144
Slika 4-12. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C ..... 145
Slika 4-13. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (legenda: Slika 4-8) . 147
Slika 4-14. Principijelna rješenja i glavne komponente 'Orbit' koncepta [289] ..... 148
Slika 4-15. Fazni dijagram ugljikovog dioksida (tlak – temperatura) [324] ..... 148
Slika 4-16. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja suhim ledom (*a* varijanta koncepta pranja rublja D) ..... 149
Slika 4-17. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja $D^a$ ..... 150
Slika 4-18. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja $D^a$ (legenda: Slika 4-8) 152
Slika 4-19. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja (koncept E) ..... 153
Slika 4-20. Funkcijska struktura koncepta E ..... 153
Slika 4-21. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja/tekstila suhim ledom (*b* varijanta koncepta D) ..... 157
Slika 4-22. Electrolux Wascator S-35 [324] ..... 158
Slika 4-23. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja $D^b$ ..... 160
Slika 4-24. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja $D^b$ (legenda: Slika 4-8) 161
Slika 4-25. Funkcijska struktura mehaničkog sata-budilice ..... 167
Slika 4-26. Legenda oznaka lanaca fizikalnih efekata koncepata sata-budilice ..... 167
Slika 4-27. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta mehaničkog sata budilice (legenda: Slika 4-26) ..... 168
Slika 4-28. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice (legenda: Slika 4-26) ..... 172
Slika 4-29. Funkcijska struktura mehaničko-digitalnog sata-budilice ..... 173
Slika 4-30. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta digitalnog sata-budilice (legenda: Slika 4-26) ..... 176
Slika 4-31. Funkcijska struktura digitalnog sata-budilice ..... 176
Slika 4-32. Utjecaji na okoliš tri stolna sata-budilice [330] ..... 182
Slika 5-1. Koraci analize proizvoda i procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [101] ..... 188
Slika 5-2. Prikaz procesa i faza životnog ciklusa koji su uključeni u studiju životnog ciklusa koncepcijskih rješenja A, B, C, D i E (ilustracija prema [349]) . 195
Slika 5-3. Utjecaji na okoliš deterdženta za strojno pranje rublja ..... 198
Slika 5-4. Analiza utjecaja na okoliš, kategorije srednjih utjecaja, životni ciklus koncepta pranja rublja A ..... 200

Slika 5-5. Utjecaji na okoliš materijala perilice rublja koncepta pranja rublja A.... 201
Slika 5-6. Dijagram potraživanja snage električne energije za 1 ciklus pranja deterdžentom i toplom vodom (30°C) [356] ..... 204
Slika 5-7. Kategorije srednjih utjecaja na okoliš materijala perilice rublja (koncept B) ..... 206
Slika 5-8. Analiza utjecaja na okoliš koncepta B (životni ciklus, kategorije srednjih utjecaja) ..... 206
Slika 5-9. Usporedba utjecaja na okoliš životnih ciklusa koncepta A i B ..... 207
Slika 5-10. Usporedba refleksijskih vrijednosti pranja deterdžentom i toplom vodom (25°C) i ultrazvučnog pranja [323] ..... 208
Slika 5-11. Koncept C - prototip ultrazvučne perilice rublja [323] ..... 209
Slika 5-12. Usporedba utjecaja na okoliš: a) praškastog deterdženta (koncepti A i B); b) tekućeg deterdženta za pranje tekstila koji je propisan patentom [323]; c) tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja ..... 210
Slika 5-13. Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila prema patentu [358], oznake dijelova sustava: Tablica 5-8 ..... 211
Slika 5-14. Usporedba utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta A, koncepta B, koncepta C_test i koncepta C_NEW ..... 212
Slika 5-15. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, $D^a$ i $D^b$ ..... 215
Slika 5-16. a) Skica polimernih kuglica u bubnju perilice [362]; b) Prikaz upravljanja perilicom Xeros [363]; c) Prikaz polimernih kuglica u bubnju perilice Xeros [363] ..... 215
Slika 5-17. Prikaz Xeros perilice rublja [364] ..... 217
Slika 5-18. Analiza utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta E ..... 217
Slika 5-19. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata (težinski faktori, prikaz po kategorijama srednjih utjecaja) ..... 218
Slika 5-20. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, $D^a$, $D^b$ i E ..... 219
Slika 6-1. Prikaz vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom u konceptualnoj fazi ..... 232
Slika 6-2. Usporedba rangiranja koncepata pranja rublja u studiji vrednovanja ([63], [81]) i predloženom metodom ..... 237
Slika 6-3. Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom i metodom *LCA*; lijevo: skup koncepata A, B, C, $D^a$ i E (1), desno: skup koncepata A, B, C, $D^b$ i E (2) ..... 238

## POPIS TABLICA


Tablica 2-1. Analiza pojmova koncept proizvoda i radni principi proizvoda ..... 29
Tablica 2-2. Prednosti uvođenja ekodizajna za poduzeća, korisnike i društvo [137], [138] ..... 34
Tablica 2-3. Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju, te unutarnje motivacije poduzeća za implementacijom ekodizajna u okruženje poduzeća [119]..... 35
Tablica 2-4. Strategije poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [152] ..... 40
Tablica 2-5. Kvalitativne ekodizajn metode i alati ..... 46
Tablica 2-6. Semi-kvantitativne ekodizajn metode i alati..... 53
Tablica 2-7. Generički zahtjevi za vrednovanje proizvoda u modelu za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda [3] ..... 73
Tablica 3-1. Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani ekodizajn smjernicama i semi-kvantitativnim ekodizajn metodama i alatima ..... 81
Tablica 3-2. Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani *Eco-Design Value* smjernicama [84] ..... 84
Tablica 3-3. Profesionalne kvalifikacije sudionika studije ..... 85
Tablica 3-4. Iskustvo sudionika studije..... 85
Tablica 3-5. Primjeri koncepcijskih rješenja pranja rublja [73]..... 87
Tablica 3-6. Podaci o konceptima proizvoda u studiji slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]..... 94
Tablica 3-7. Trajanje vrednovanja u studiji slučaja ..... 97
Tablica 3-8. Rezultati prvog i drugog rangiranja ekološke prihvatljivosti koncepata od strane sudionika studije slučaja..... 97
Tablica 3-9. Pregled rezultata nakon bodovanja uslijed drugog po redu rangiranja kada su sudionici studije vrednovali koncepte prema *Eco-Design Value* smjernicama [82] ..... 98
Tablica 4-1. Koraci vrednovanja prema de Boeru [305] ..... 113
Tablica 4-2. Usporedba vrsta i karakteristika metoda vrednovanja i odlučivanja [292] ..... 115
Tablica 4-3. Koraci predložene metode ..... 116
Tablica 4-4. Primjeri faktora pretvorbe oblika energije (transformabilnosti) [70], [243], i ekvivalentne solarne jedinice emergije [309] ..... 120
Tablica 4-5. Faktori za pretvorbu oblika energije u jedinice solarne emergije [70], [311] ..... 121
Tablica 4-6. Teorijska eko-efektivnost transformabilnosti oblika energije (oznake: Tablica 4-5) ..... 124
Tablica 4-7. Smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata [69]..... 127

Tablica 4-8. Vrijednosna skala za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata prema okolišu ..... 128
Tablica 4-9. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja A ..... 140
Tablica 4-10. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja B ..... 143
Tablica 4-11. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja C ..... 146
Tablica 4-12. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D[a] ..... 151
Tablica 4-13. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja E ..... 154
Tablica 4-14. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti pranja rublja A, B, C, D[a] i E) ..... 155
Tablica 4-15. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D[b] ..... 162
Tablica 4-16. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti pranja rublja A, B, C, D[b] i E) ..... 163
Tablica 4-17. Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničkog sata-budilice ..... 169
Tablica 4-18. Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničko-digitalnog sata-budilice ..... 174
Tablica 4-19. Pomoćna tablica za vrednovanje digitalnog sata-budilice ..... 177
Tablica 4-20. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti stolnog sata-budilice) ..... 179
Tablica 5-1. Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) [1] ..... 189
Tablica 5-2. Sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja ..... 197
Tablica 5-3. Potrošnja električne energije i vode koncepta A [348] ..... 199
Tablica 5-4. Potrošnja električne energije i vode za 1 ciklus strojnog pranja 5 kilograma rublja u perilici rublja [279] ..... 199
Tablica 5-5. Lista materijala automatske perilice rublja za kućanstva: a) Machine II.2, godina proizvodnje: 2004. [279]; b) Novomatic, godina proizvodnje: 2005. [355]; c) Adora, godina proizvodnje: 2011. [355]; d) Eco Bubble™ [345] ..... 202
Tablica 5-6. Značajke i performanse perilice rublja s Eco Bubble™ tehnologijom kapaciteta 6 kg (model WFF400E, Samsung) [345] ..... 205
Tablica 5-7. Sastav tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja ..... 210
Tablica 5-8. Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju [358] ..... 211
Tablica 5-9. Lista materijala perilica – koeficijenti za procjenu liste materijala ..... 221
Tablica 5-10. Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) i uzroci mogućih odstupanja i nesigurnosti pri generiranju rezultata procjene [368], [369] ..... 224
Tablica 6-1. Vrednovanje elemenata predložene metode [85] ..... 229
Tablica 6-2. Provjera vanjske relevantnosti predložene metode temeljem kvalitete odlučivanja ..... 241

## POPIS PRILOGA

Prilog 1. Anketa studije vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja..... XXXI
Prilog 2. Primjer tablice fizikalnih efekata [320] ..... XXXV
Prilog 3. Lanac fizikalnih efekata *L1* koncepta pranja rublja toplom vodom i deterdžentom..... XXXIX

# 1. UVODNA RAZMATRANJA

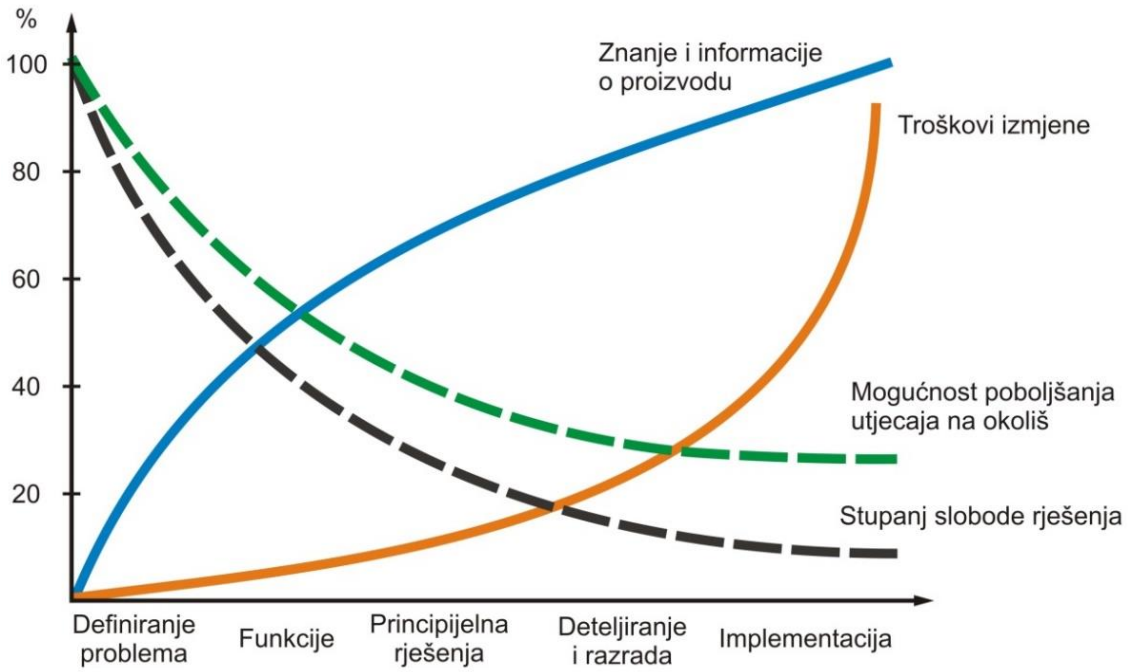
*U uvodnom poglavlju doktorske disertacije dan je sažet uvid u provedeno istraživanje. Obrazložena je motivacija i razlozi za pokretanje istraživanja, te su navedena istraživačka pitanja, ciljevi istraživanja i opisana je metodologija istraživanja. Znanstveni doprinosi istraživanja su kriteriji ekološke prihvatljivosti i razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Kriteriji i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjeni su vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.*

## 1.1. Uvod u temu istraživanja

Odluka o konceptu proizvoda jedna je od najvažnijih odluka u procesu konstruiranja jer se njome definiraju tijek, aktivnosti, sadržaj i smjernice za daljnji razvoj i konstrukcijsku razradu proizvoda, ali i zahtjevi i očekivanja koje proizvod u konačnici treba zadovoljiti. Koncepti osmišljeni u konceptualnoj fazi vrednuju se i međusobno uspoređuju prema kriterijima vrednovanja. Kriteriji vrednovanja su korisnički i funkcionalni zahtjevi te drugi pokazatelji kvalitete koncepta proizvoda. Najčešći kriteriji vrednovanja koncepata proizvoda su: razina zadovoljenja korisničkih potreba, troškovi, tehnička kompliciranost, pouzdanost tijekom eksploatacije ili rada tehničkog sustava, tehnološki postupci proizvodnje, utjecaji na okoliš te drugi, za poduzeće ili proizvod specifični kriteriji vrednovanja.

Vrednovanjem konstruktori nastoje sagledati koncepte proizvoda koji su kandidati za daljnji razvoj, te analizirati njihove karakteristike imajući na umu da odabrano koncepcijsko rješenje mora zadovoljavati određene uvjete ili zahtjeve. Primjerice, koncepcijsko rješenje, tj. proizvod, mora biti konkurentan, isplativ, pouzdan, tehnološki izvediv u pogledu dostupnih resursa, resursa u fazi proizvodnje, zatim ekološki prihvatljiv itd. Istraživanje opisano u ovoj disertaciji proučava vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja proizvoda, tj. vrednovanje koncepata tehničkih sustava prema kriterijima ekološke prihvatljivosti.

Odluka o konceptu utječe na mnoge fizičke i funkcionalne značajke proizvoda koje će konstruktori odrediti tijekom konstrukcijske razrade. Kada govorimo o ekološkoj prihvatljivosti i utjecajima proizvoda na okoliš, najčešće ključne značajke proizvoda su potrošnja energije tijekom faze eksploatacije proizvoda, potrošnja energije i materijala u proizvodnji, rastavljivost, reciklabilnost, životni vijek proizvoda u eksploataciji i način odlaganja proizvoda na kraju životnog ciklusa. Nabrojane značajke proizvoda, kao i utjecaj na okoliš koji se kvantificira metodama kod kojih su ove značajke proizvoda ulazni parametri [1], u pravilu se razmatraju tek tijekom konstrukcijske razrade [2].




Slika 1-1. Utjecaj odluka na znanje i informacije o proizvodu, troškove izmjena, stupanj slobode rješenja i utjecaje na okoliš [3], [4], [5]

U konceptualnoj fazi razvoja, značajke proizvoda koje su važne za budući utjecaj proizvoda na okoliš moguće je pretpostaviti temeljem dostupnih informacija o konceptu [6], [7]. Mogućnosti poboljšavanja utjecaja proizvoda na okoliš manje su u tijekom kasnijih, nego tijekom ranijih faza procesa konstruiranja (Slika 1-1). U ranim fazama procesa konstruiranja kada je konačno rješenje proizvoda okvirno definirano u obliku smjernica, zahtjeva, ideja i koncepcijskih rješenja, postoji veća fleksibilnost implementiranja izmjena na idejnom i koncepcijskom rješenju proizvoda radi postizanja ekološki prihvatljivog rješenja, nego što je to slučaj tijekom konstrukcijske razrade.

Brezet [8] i May [9] smatraju da se maksimalna poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda mogu postići ukoliko im se pristupi u ranim fazama konstruiranja, tj. konceptualnoj fazi. Rekonstrukcijom proizvoda moguće je smanjiti utjecaje na okoliš, no ne u tolikoj mjeri kao koncipiranjem po okoliš prihvatljivijeg koncepcijskog rješenja [10].

Izmjena koncepcijskog rješenja u kasnijim, poodmaklim fazama razvoja (primjerice tijekom konstrukcijske razrade) implicira porast troškova i kašnjenje razvojnog procesa [11], [12], [13]. Sukladno tomu, izbor neadekvatnog koncepta ne može se nadomjestiti ili ispraviti u poodmaklim fazama razvoja bez neželjenih posljedica po organizaciju i resurse razvojnog procesa [14]. Istraživači stoga smatraju da bi vrednovanje ekološke prihvatljivosti i procjenu utjecaja proizvoda na okoliš trebalo provoditi u ranim fazama procesa konstruiranja [15], primjerice u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja [16], [17], [18].

## 1.2. Motivacija

Odluke donesene u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja imaju velik utjecaj na kvalitetu, životni ciklus, utjecaje na okoliš, trajanje procesa razvoja i troškove proizvoda [11], [13], [19]. Smatra se da je slijedom odluka u konceptualnoj fazi definirano oko 70% troškova i za kvalitetu proizvoda ključnih značajki proizvoda i faktora koji utječu na kvalitetu proizvoda [2], [11], [20], [21], [22].

Izborom koncepta proizvoda za daljnje unapređivanje i razvoj definirani su tehnički zahtjevi i specifikacije proizvoda koji u pravilu ostaju nepromijenjeni do kraja procesa konstruiranja [23]. Odluka o konceptu proizvoda jedna je od najvažnijih odluka u procesu

konstruiranja i razvoju proizvoda, u pogledu konstrukcijske razrade i proizvodnje [7], te utjecaja na okoliš [19], [24], [25].

Istraživači navode da je 70% do 80% svih utjecaja proizvoda na okoliš predodređeno po završetku ranih faza procesa konstruiranja; konceptualnoj fazi i fazi oblikovanja proizvoda [13], [20], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. Stoga je važno na vrijeme uočiti posljedice odluka o proizvodu koje mogu dovesti do neprimjereno velikog utjecaja proizvoda na okoliš, a prije donošenja odluke o proizvodnji. Ekodizajn i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda primjenjuju se najčešće u kasnijim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, nakon odabira koncepcijskog rješenja proizvoda u konceptualnoj fazi. Ekodizajn pristup razvoju proizvoda znači primjenu metoda procjene utjecaja na okoliš, razmatranje potrošnje resursa potrebnih za proizvodnju i procjenu troškova životnog ciklusa proizvoda. Mnoge od ovih metoda nisu primarno namijenjene ranim fazama razvoja proizvoda [31], iako su upravo rane faze odlučujuće za uspješnost ekološki prihvatljivih proizvoda na tržištu [32].

Utjecaj proizvoda na okoliš definira se kvantitativno kao zbroj parcijalnih utjecaja na okoliš do kojih dolazi uslijed i tijekom životnog ciklusa proizvoda. Za procjenu utjecaja na okoliš koristi se metoda *„Procjena životnog ciklusa"* (engl. *Life Cycle Assessment – LCA*) [1].

Utjecaji proizvoda na okoliš određuju se pokazateljima degradacije okoliša, pretjerane potrošnje prirodnih resursa, te posljedica na ljudsko zdravlje [1]. Pokazatelji utjecaja na okoliš kao što su toksičnost, emisije stakleničkih plinova ili iskorištavanje tla definirani su metodološki kao posljedice okolišnih utjecaja, te su predstavljeni kategorijama utjecaja koje grupiraju zajedničke potencijalne i negativne posljedice utjecaja na okoliš (na zdravlje ljudi, klimatske promjene, iskorištavanje prirodnih resursa, onečišćenje tla, vode, zraka, te biljni i životinjski dio ekosustava).

Rezultati *LCA* koriste se za vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda te odlučivanje o životnom ciklusu proizvoda. Iako nema metodoloških prepreka koje bi ograničavale primjenu *LCA* metode u pojedinim fazama procesa konstruiranja [33], primjena *LCA* u ranim fazama procesa konstruiranja je upitna jer rezultira nepreciznim utjecajima na okoliš budućeg proizvoda [21], [34], [35].

Primjena inačica metoda procjene utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi, upitna je zbog manjka informacija o proizvodu u ranim fazama konstruiranja; geometrijskim značajkama, strukturi proizvoda i budućem životnom ciklusu proizvoda [5], [35], [36], [37], [38], [39].

Odluka o konceptu proizvoda utječe na mnoge fizičke i funkcionalne značajke proizvoda koje su u konačnici definirane tek tijekom konstrukcijske razrade [35]. Te značajke mogu biti temeljne značajke ključnih sklopova i komponenata proizvoda, značajke o tehnološkim procesima izrade i proizvodnje, mogući načini recikliranja ili ponovnog korištenja komponenata proizvoda [12], [18]. Prema uobičajenim modelima procesa konstruiranja i metodologijama konstruiranja ([40], [41]), značajke proizvoda potrebne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš nisu dostupne tijekom konceptualne faze.

Izbor ekološki neprihvatljivog koncepta teško se može ispraviti kasnije u procesu konstruiranja. Značajne promjene na proizvodu (primjerice izmjena koncepcijskog rješenja u fazi konstrukcijske razrade) uzrokuju neplanirane troškove i dulji proces razvoja [42].

Nedostatak znanja o konačnim značajkama proizvoda u konceptualnoj fazi jedan je od glavnih razloga teškoćama prilikom izbora najboljeg koncepta, donosno koncepta za daljnju razradu [5]. Iako u ranim fazama procesa konstruiranja postoji najveći potencijal za donošenje odluka u smjeru razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda (Slika 1-1), znanje o budućim značajkama proizvoda je ograničeno jer odluke koje su bitne za konačni utjecaj proizvoda na okoliš tek trebaju biti donesene [3], [5], [43]. Sa smanjivanjem tzv. stupnjeva slobode rješenja [44], a uslijed definiranja sve više, i za utjecaj na okoliš važnijih značajki proizvoda, smanjuju se mogućnosti da se intervenira u pogledu smanjivanja utjecaja na okoliš. Troškovi implementacije izmjena veći su što je kasnije u procesu izmjena predložena i implementirana [45].

Pored već spomenutog načina vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda koji se temelji na kvantificiranju utjecaja na okoliš, u literaturi se spominju i kvalitativne ekodizajn metode i alati koje se koriste pri vrednovanju, i jedno-kriterijskom ili više-kriterijskom ocjenjivanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja. Pri više-kriterijskom ocjenjivanju

ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja, kriteriji ekološke prihvatljivosti mogu biti međusobno kontradiktorni i nepoznatih težinskih faktora [46].

Semi-kvantitativne ekodizajn metode i alati također koriste kvalitativne kriterije ekološke prihvatljivosti uz uvođenje kvantitativnih vrijednosnih skala. U tu svrhu koriste se inačice metode *„Kuća kvalitete"* (engl. *Quality Function Deployment – QFD*) [47]. Iako se radi o dobro poznatim i često korištenim metodama u industriji, istraživači navode da inačice *QFD* metode nisu u potpunosti prilagođene vrednovanju ekološke prihvatljivosti u fazi koncipiranja, te da zanemaruju vrednovati ekološku prihvatljivost obzirom na fazu eksploatacije proizvoda [48], [49].

Primjenjivost metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi predmet je proučavanja u istraživanjima [50], [51]. Kvalitativne metode vrednovanja su subjektivne. To znači da njihova primjena zahtijeva da konstruktori posjeduju specifična znanja ili iskustva o tome kako interpretirati kriterije ekološke prihvatljivosti. Kvantitativne metode su komplicirane za korištenje, te se ne mogu koristiti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda kada nedostaju ključne značajke i podaci o proizvodu, detalji o životnom ciklusu proizvoda i kada još nije odlučeno o specifikacijama proizvoda [52], [53].

## 1.3. Ciljevi istraživanja i hipoteza istraživanja

U istraživanjima na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja nema univerzalne definicije koncepcijskog rješenja proizvoda. Definicije variraju od ideje proizvoda [54], [55], [56], do *pre-definiranih* koncepata proizvoda [12], [57], [58]. U recentnim istraživanjima proučavaju se metode i pristupi vrednovanja ekološke prihvatljivosti koji bi se mogli primjenjivati u ranim fazama konstruiranja, te se teži razvoju novih metodologija i metoda kojima bi se omogućila procjena utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi [25], [35], [38], [52], [59], [60], [61], [62].

Za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata temeljem procjene utjecaja na okoliš, potrebno je poznavati geometrijske značajke proizvoda kojima se opisuje struktura proizvoda, listu materijala proizvoda, tehnološke postupke proizvodnje, te parametre životnog ciklusa proizvoda. O navedenim značajkama proizvoda koje ukazuju na utjecaj na okoliš

proizvoda, u pravilu nema podataka u konceptualnoj fazi, te ih je potrebno pretpostaviti na temelju usporedbe sa utjecajima na okoliš sličnih, već komercijalnih proizvoda, koji se nazivaju referentnim proizvodima [18], [60], [62]. U takvim slučajevima, u pravilu se rezultati procjene ne koriste pri odlučivanju o konceptu proizvoda ili usporedbi ekološke prihvatljivosti koncepata, već kao smjernice inkrementalnih izmjena na proizvodu pri rekonstrukciji proizvoda [52].

Pri kvalitativnom vrednovanju ekološke prihvatljivosti kriteriji ekološke prihvatljivosti implicitno su definirani, a vrednovanje se provodi temeljem pretpostavki o konačnim značajkama proizvoda i njegovog životnog ciklusa. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti podložno je subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti koncepata od strane konstruktora kada kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno izraženi [63]. Potonja tvrdnja ispitana je studijom u kojoj su magistri inženjeri strojarstva proveli vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja pranja rublja.

Ciljevi provedenog istraživanja definirani su temeljem pregleda literature o ograničenjima postojećih metoda i alata za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Ciljevi istraživanja opisanog u ovoj disertaciji su:

1.) Odrediti kriterije ekološke prihvatljivosti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava

2.) Razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava

3.) Ispitati da li su i na koji način kriteriji i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti definirani provedenim istraživanjem primjenjivi za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

U svrhu ostvarenja ciljeva istraživanja razvijeni su kriteriji ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava ([69], [71]). Kriteriji ekološke prihvatljivosti implementirani su u metodi vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava [85]. Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda čine teorijski i praktični doprinos istraživanja. Razvojem kriterija i metode vrednovanja ekološke

prihvatljivosti za konceptualnu fazu procesa konstruiranja, omogućava se vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja generiranih u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata tehničkih sustava predloženom metodom ne zahtjeva dodatno prikupljanje podataka o radnim principima istim ili oblikom i strukturom sličnim proizvodima na tržištu ili podataka potrebnih za kvantificiranje utjecaja proizvoda na okoliš *LCA* metodom.

Koncepcijska rješenja koja se razmatraju prilikom izbora koncepta proizvoda koji će ući u proces daljnje razrade i detaljiranja, mogu se značajno razlikovati u funkcijskim strukturama i načinima ostvarivanja glavne i sporednih funkcija proizvoda, te fizikalnim efektima koje isporučuju. Prema Teoriji tehničkih sustava [64], [65], [66], proizvodi su tehnički artefakti (tehnički sustavi) koji transformiraju operande kojima je određen tehnički proces. Koncepcijskim rješenjem tehničkog sustava određeni su fizikalni efekti, principijelna rješenja parcijalnih funkcija kojima se ostvaruje zadana funkcija proizvoda, te funkcijska struktura proizvoda. Varijantnost koncepcijskih rješenja postiže se variranjem tehničkih rješenja proizvoda, koji su prema Teoriji tehničkih sustava [64] opisani tehničkim procesima i tehnologijom u cilju ostvarivanja fizikalnih efekata i funkcija proizvoda.

Prema Kroesu [67], doprinos teorije tehničkih sustava razvoju znanosti o konstruiranju je u uobličenju i sistematiziranju znanja i procedura pri konstruiranju u jedinstvenoj metodologiji konstruiranja. Teorija tehničkih sustava predstavlja teorijski okvir ovog istraživanja, te referentni okvir za postavljanje hipoteze istraživanja. Teorijom tehničkih sustava definiran je kontekst u kojem se pristupa konstruiranju i analizi proizvoda (tehničkih sustava), te odnos između tehničkog procesa i okoliša [68]. Sukladno Teoriji tehničkih sustava [64] definirana je hipoteza istraživanja:

**Kriteriji ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava mogu se odrediti temeljem značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu.**

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u istraživanju prikazanom u ovom radu temelji se na razmatranju značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu [65]. Značajke transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu poznate su temeljem

prethodno definiranih tehničkih procesa, tehnologija transformacije energije, materijala i signala u tehničkim procesima, radnih principa tehničkog sustava te fizikalnih efekata [67]. Podaci potrebni za vrednovanje proizlaze iz analize lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu [69]. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava temelji se na kriterijima ekološke prihvatljivosti razvijenima u provedenom istraživanju i detaljno objašnjenima u ovoj doktorskoj disertaciji.

Prvi par kriterija ekološke prihvatljivosti čine kriterij eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu i kriterij broja pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu. Ova dva kriterija ekološke prihvatljivosti definirani su kako bi se omogućilo vrednovanje značajki transformacija energije i signala u tehničkom procesu. Prvi kriterij odnosi se na vrednovanje prema kriteriju kvalitete pretvorbe energije koji proizlazi iz tzv. hijerarhije oblika energije [70]. Za fizikalne efekte kojima se realiziraju parcijalne funkcije ili varijante parcijalnih funkcija koncepta, moguće je odrediti kvalitetu pretvorbe oblika energije [71], što je u ovom radu jedan od ukupno pet kriterija ekološkog vrednovanja. Temeljne znanstvene postavke za razvoj kriterija eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala proizlaze iz istraživanja o ekvivalentnim solarnim jedinicama oblika energije koje je proveo Odum [70]. Drugi kriterij ekološke prihvatljivosti razvijen u okviru provedenog istraživanja je broj pretvorbi energije i signala, a proizlazi iz literature i smjernica za razvoj ekološki prihvatljivih koncepcijskih rješenja koje su definirali Pahl i drugi [72].

Sljedeći par kriterija ekološke prihvatljivosti odnosi se na vrednovanje značajki transformacija materijala u tehničkom procesu putem vrednovanja ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu. Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu i kriterij broj sekundarnih efekata prema okolišu služe vrednovanju vrste i broja sekundarnih (latentnih) efekata prema okolišu. Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu najbliži su definiciji neposrednih utjecaja na okoliš tehničkog sustava u konceptualnoj fazi [68], [69], [73]. Vrednovanje sekundarnih efekata prema okolišu kvalitativno je, a temelji se na vrednovanju značajki sekundarnih efekata prema okolišu kao što su neškodljivost za korisnike i okoliš, toksičnost, vrsta emisija prema okolišu i drugi. Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu definiran je temeljem literature o vrstama otpada i prema smjernicama za ekološki prihvatljivo gospodarenje otpadom [74], [75], [76].

Pahl i drugi [72] postavili su teorijske osnove za razvoj kriterija broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu, a koji je u ovom istraživanju peti predloženi kriterij ekološke prihvatljivosti. Ovaj kriterij ekološke prihvatljivosti namijenjen je vrednovanju značajki transformacija materijala u tehničkom procesu.

Kriteriji eko-efektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu, broj pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu, broj sekundarnih efekata prema okolišu, te broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu služe vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja. Kako bi se omogućilo vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata i njihovo rangiranje prema ekološkoj prihvatljivosti, te u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda, u okviru istraživanja razvijena je predložena metoda. Predložena metoda određuje aktivnosti prema kojima se provodi vrednovanje i rangiranje koncepcijskih varijanti u konceptualnoj fazi. Predložena metoda se koristi za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tzv. diskretnih tehničkih sustava, što znači da nije namijenjena vrednovanju artefakata poput hrane, maziva ili drugih ne-tehničkih artefakata. Nadalje, predložena metoda nije namijenjena vrednovanju ekološke prihvatljivosti kompleksnih tehničkih sustava i njihovih koncepata.

Ograničenje predložene metode je što pretpostavlja poznavanje glavnih funkcionalnih i tehničkih karakteristika koncepcijskih rješenja koja se razmatraju i vrednuju. Koncepti koji se vrednuju prema ekološkoj prihvatljivosti mogu biti prethodno osmišljeni u poduzeću u kojem će se realizirati njihov daljnji razvoj, ili se može raditi o konceptima proizvoda konkurenata.

Svaka analiza koncepata proizvoda zahtijeva visoki stupanj poznavanja radnih principa i funkcionalnih karakteristika koncepata proizvoda koji su predmet analize. Ukoliko razrada koncepcijskih rješenja nije na stupnju da je konstruktorima uz raspoložive resurse i informacije o konceptu moguće ustanoviti radne principe, tokove energije, materijala i signala, fizikalne efekte, lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte prema okolišu, primjena predložene metode zahtijevat će dodatne resurse u pogledu vremena potrebnog za analizu koncepata i prikupljanje podataka o konceptima.

## 1.4. Metodologija istraživanja

Istraživači kao odgovor na problem vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda u konceptualnoj fazi predlažu: 1) primjenu ekodizajn metoda i alata, 2) razvoj metodologija koje bi omogućavale procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi razvoja, i 3) ekodizajn pristupa oblikovanju ekološki prihvatljivih proizvoda. Ideja je da se po završetku vrednovanja, pristupi predlaganju alternativa koje bi bile ekološki prihvatljivije uzimajući u obzir ishode vrednovanja. Verifikacija u radu prikazanog istraživanja provodi se kvalitativnim metodama temeljem rezultata studija (studije slučaja i studije ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja temeljem metode procjene utjecaja na okoliš), te validaciji kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti pomoću metode *„Validacijski kvadrat"* [77].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava su glavni teorijski znanstveni doprinos provedenog istraživanja. Kriteriji i predložena metoda ispitani su usporedbom sa ishodima vrednovanja temeljem procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1]. Validacija efektivnosti i efikasnosti kriterija i metode temelji se na usporedbi s *LCA* rezultatima vrednovanja relevantnih slučajeva (koncepata pranja rublja i koncepata stolnog sata-budilice), a temeljem *LCA* analize utjecaja na okoliš koncepata.

Metodologija i izlaganje rezultata provedenog istraživanja temelji se na općoj metodologiji istraživanja u znanosti o konstruiranju (engl. *Design research methodology - DRM*) [78] prema kojoj su definirani koraci istraživanja. Plan istraživanja sastavljen je prema smjernicama priručnika za metodologiju istraživačkog rada [79]. Istraživanje opisano u ovoj disertaciji sastoji se od četiri koraka: Preliminarno istraživanje, Razvoj kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja, Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti predložene metode i Optimizacija predložene metode i vrednovanje istraživanja (Slika 1-2).

Slika 1-2. Koraci provedenog istraživanja

*I. Preliminarno istraživanje*

Preliminarnim istraživanjem analizira se literatura na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Preliminarno istraživanje sastoji se od: pregleda literature, postavljanja istraživačkih pitanja, studije slučaja i analize rezultata studije.

Pregled literature obuhvaća radove na temu ekodizajna u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoja proizvoda. Motivacija i teorijski okvir istraživanja obrazlažu se objašnjavanjem i kritičkim osvrtom na teorije i metodologije relevantne za analizu problema istraživanja [79], [80].

Temeljem motivacija ustanovljenih pregledom literature stručne i znanstvene literature o ekodizajnu pri konstruiranju i razvoju proizvoda definirana su tri istraživačka pitanja:

1.) Koja su ograničenja postojećih metoda i alata vrednovanja ekološke prihvatljivosti, te koja su ograničenja primjene tih metoda i alata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

2.) Koji su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se mogu koristiti pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

3.) Kako vrednovati ekološku prihvatljivost tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Uvidom u literaturu u užem području istraživanja analiziraju se ekodizajn metode i alati koje se koriste za vrednovanje ekološke prihvatljivosti i procjenu utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Analiziraju se karakteristike i ograničenja primjene metoda i alata za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. S ciljem proučavanja fenomena vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i putem kvalitativnih metoda vrednovanja provedena je studija slučaja [63], [81]. U studiji slučaja jedanaest (11) magistara inženjera strojarstva imalo je zadatak vrednovati ekološku prihvatljivost koncepcijskih varijanti, prvo bez eksplicitno propisanih kriterija ekološke prihvatljivosti, a zatim temeljem eksplicitno propisanih kriterija ekološke prihvatljivosti koji su definirani *Eco-Design Value* smjernicama [82]. Vrednovanje koncepata tehničkih sustava (proizvoda) uobičajeno se odvija u specifičnom socio-tehničkom, vremenskom i prostornom okruženju, stoga se pristup analizi podataka provedene studije slučaja temelji na interpretivističkoj paradigmi [83]. Analizom studije slučaja ustanovljena su temeljna obilježja *jediničnog sustava* [79].

Pregled literature vođen je s ciljem davanja odgovora na 1.) istraživačko pitanje o ograničenjima ekodizajn metoda i alata i ograničenjima njihove primjene za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Pregledom literature ustanovljeno je koje se ekodizajn metode i alati koriste za vrednovanje ekološke prihvatljivosti, te se mogu primijeniti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda.

*II. Razvoj kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava*

Metodološki pristup za realizaciju ciljeva istraživanja proizlazi iz pregleda literature o vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i analize rezultata studije vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]. Rezultati preliminarnog istraživanja usmjerili su nastavak istraživanja k razvoju kriterija ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Utjecajni faktori (tzv. ključni faktori [78]) koji su temelj za validaciju kriterija i predložene metode proizašli su iz analize primjera vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja i ograničenja studije slučaja [81].

Razmatranjem 2.) istraživačkog pitanja o prikladnosti kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode potrebama konceptualne faze razvoja tehničkih sustava osmišljena je metodologija provjere hipoteze istraživanja. Validaciju kriterija i predložene metode čini provjera konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i predložene metode [77].

*III. Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava*

Sukladno ciljevima istraživanja, provedena je validacija primjenjivosti kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Po uzoru na validaciju metoda *„Validacijskim kvadratom"* [77] provjerava se logička i strukturalna konzistentnost, te relevantnost i učinkovitost kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. Provjera učinkovitosti kriterija i metode provedena je usporedbom s vrednovanjem *Eco-Design Value* smjernicama u studiji slučaja ([63], [81]) i usporedbom s vrednovanjem temeljenom na procjeni životnog ciklusa (*LCA*) koncepata proizvoda [85]. Validacija kriterija i predložene metode specifična je zbog njihove namjene (konceptualna faza razvoja tehničkih sustava) i zahtjeva u pogledu validacije ekodizajn metoda i alata [84].

Blessing i Chakrabarti [78] opisuju značaj validacije u području konstruiranja i razvoja proizvoda, daju smjernice za validaciju potpore konstruiranju i razvoju proizvoda te ishoda istraživanja u ovom znanstvenom području. Verifikacija (vrednovanje) istraživanja provedena je također prema smjernicama *DRM* metodologije [78].

Verifikacija istraživanja uključuje verifikaciju podataka pri validaciji kriterija i predložene metode, analizu ograničenja predložene metode, analizu primjenjivosti kriterija i predložene metode u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, analizu kompatibilnosti kriterija i predložene metode i kvalitativnih i semi-kvantitativnih ekodizajn metoda i alata za konceptualnu fazu, te vrednovanje kriterija i predložene metode na primjeru vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata stolnog sata-budilice. Nadalje, verifikacija uključuje razmatranje istraživačkih pitanja, hipoteze, te analizu aktivnosti i mogućih situacija u kojoj se kriteriji i predložena metoda mogu primijeniti.

Provjera hipoteze obuhvaća provjeru ispravnosti znanstvenih tvrdnji, usporedbu rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti testnih koncepata na oglednim primjerima pomoću u radu predloženih kriterija i predložene metode, usporedbu rezultata vrednovanja u studiji slučaja ([63], [81]), te usporedbu rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti temeljem procjene utjecaja na okoliš [85].

Radi detaljnijeg istraživanja problema vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i validacije predložene metode, provedena je procjena životnog ciklusa koncepcijskih rješenja pranja rublja. Ekološku prihvatljivost tijekom procesa konstruiranja i razvoja proizvoda moguće je ustanoviti vodeći se rezultatima procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1]. Procjena utjecaja na okoliš omogućila je *post factum* analizu ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata jer u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja uobičajeno nedostaju ključne informacije o proizvodu i njegovom životnom ciklusu temeljem kojih bi se provela procjena životnog ciklusa proizvoda na standardom propisan način [38], [86]. Rezultati procjene životnog ciklusa prikazani su u četvrtom poglavlju ove disertacije.

Utjecaji na okoliš procjene životnog ciklusa koncepata pranja rublja prikazani su pomoću metode *ReCiPe™* [87] kojom su propisane kategorije utjecaja na okoliš i metoda kvantifikacije utjecaja na okoliš. Za prikupljanje podataka o procesima životnog ciklusa korišten je softver *SimaPro™* [88], te podaci o procesima iz *Ecoinvent™* baze podataka za razvoj inventara materijala i energije u životnom ciklusu proizvoda [89], [90]. U konačnici su rezultati procjene životnog ciklusa uspoređeni sa rezultatima studije slučaja i rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti u ovim istraživanjem predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Validacija predložene metode provedena je prema metodi za validaciju metoda naziva *„Validacijski kvadrat”* [77] koja propisuje ispitivanje teorijske i empirijske konzistentnosti i učinkovitosti metoda u području primjene konstruiranje i razvoj proizvoda.

*IV. Optimizacija predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti*

U zaključnom koraku istraživanja daju se preporuke za primjenu predložene metode u praksi, prijedlog nacrta studije za sveobuhvatniju validaciju kriterija i predložene metode, te

smjernice budućih istraživanja. U raspravi istraživanja obrazložene su pretpostavke istraživanja i analizirani rezultati istraživanja s ciljem vrednovanja ishoda istraživanja i objašnjenja znanstvenih doprinosa istraživanja. Rasprava rezultata obuhvaća teorijske i praktične aspekte primjene predloženog pristupa vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Objašnjena je optimizacija predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti, preporuke za primjenu kriterija i predložene metode u praksi te ideje za implementaciju kriterija i predložene metode radi poboljšanja postojećih kvalitativnih i semi-kvantitativnih ekodizajn metoda i alata. Zaključno se izlažu smjernice za buduća istraživanja u svrhu rješavanja problema koji su izvan opsega teme istraživanja.

## 1.5. Znanstveni doprinosi istraživanja

Razvoj istraživanja u području konstruiranja i razvoja proizvoda temelji se na analizama i kritičkom preispitivanju uvriježenih teorijskih postavki i modela procesa konstruiranja, istraživanju praktične primjene metodologija, metoda i alata u industriji, te ponovljivosti empirijskih istraživanja i studija. Istraživanjima se nastoji predstaviti i ispitati nova i potencijalno bolja rješenja za aktualne i još neriješene probleme, povećati dostupnost podataka istraživanja i metodoloških pristupa radi efikasnijeg transfera i razmjene znanja unutar područja, te ostvariti koheziju prema znanstvenim spoznajama iz srodnih disciplina (interdisciplinarnost) i drugih disciplina (intradisciplinarnost).

Uzimajući u obzir karakteristike metoda, te prednosti i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, doprinos prikazanog istraživanja očituje se razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Predložena metoda temelji se na pet kriterija ekološke prihvatljivosti te rangiranju prema metodi sume rangova [91].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja, te predložena metoda vrednovanja za konceptualnu fazu udovoljavaju zahtjevima za kvalitativnim vrednovanjem koncepcijskih rješenja u ranim fazama procesa konstruiranja. U ranim fazama konstruiranja nisu zadovoljeni preduvjeti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljem kvantitativnih metoda procjene utjecaja na okoliš zbog nedovoljnih ili nedostupnih podataka o konceptima,

referentnim proizvodima i njihovim utjecajima na okoliš. S druge strane, vrednovanje temeljem kvalitativnih metoda vrednovanja subjektivno je i time podložno interpretaciji ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda, što je pokazano studijom slučaja u prvom koraku istraživanja.

Znanstveni doprinosi istraživanja prikazanog u ovoj doktorskoj disertaciji su:

1.) Teorijski doprinos

Teorijski doprinos ostvaren je razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava i metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Razvijeni kriteriji ekološke prihvatljivosti u literaturi su bili implicitno naznačeni kao potencijalni kriteriji vrednovanja proizvoda, no nisu bili formalizirani u eksplicitnom obliku kao kriteriji ekološke prihvatljivosti niti formalizirani u metodi vrednovanja koncepata proizvoda.

Kriteriji ekološke prihvatljivosti razvijeni ovim istraživanjem implementirani su u metodi vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava, te je time i formalizirana njihova primjenjivost u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Potvrdom hipoteze ostvarene su nove znanstvene spoznaje o kriterijima ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava (proizvoda), čime se doprinosi stvaranju novih znanja u domeni Teorije tehničkih sustava [65], ekodizajnu pri konstruiranju i metodama potpore razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda.

2.) Doprinos metodologijama

Doprinos metodologijama očituje se u razvoju metodološkog okvira za validaciju kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. U istraživanju prikazanom u ovoj disertaciji, kriteriji i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava čine glavne znanstvene doprinose istraživanja i vid su potpore konstruiranju i razvoju tehničkih sustava (proizvoda).

U istraživanjima u području konstruiranja i razvoja tehničkih sustava, potvrda primjenjivosti, korisnosti i relevantnosti razvijene potpore zahtjeva „formalnu, rigoroznu i kvantitativnu" validaciju i verifikaciju [78] te obuhvaća:

- Upute za implementaciju kriterija i metode u realnom okruženju u poduzećima,
- Praćenje i vrednovanje procesa implementacije na realnom primjeru iz industrije, propisivanje materijala poput priručnika za obuku korisnika i
- Primjenu kriterija i predložene metode u praksi,
- Razvoj inačica metode i alata prilagođenih specifičnim potrebama poduzeća ili određenih sektora industrije,
- Razvoj smjernica za održavanje i korištenje kriterija, alata i pripadajućih materijala kroz dulje vremensko razdoblje,
- Diseminaciju ishoda istraživanja.

Obzirom da je validacija kriterija i predložene metode temeljem ishoda implementacije kriterija i metode u realnom okruženju u industriji te kroz dulji vremenski period teško provediva, Blessing i Chakrabarti [78] ostavljaju mogućnost provedbe tzv. *inicijalne* validacije. Ovaj tip validacije proveden je u istraživanju prikazanom u ovoj disertaciji. Vrednovanje kriterija i predložene metode temeljeno je na provjeri teorijske i empirijske konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i metode, a prema smjernicama za validaciju metoda konstruiranja [77].

Vrednovanje teorijske i empirijske konzistentnosti [77] kriterija i predložene metode temeljeno je na provjeri valjanosti konstruktivnih elemenata koji čine kriterije i predloženu metodu, analizi informacijskog toka vrednovanja prema kriterijima i informacijskog toka

predložene metode, te provjeri primjera koji su odabrani za ogledne primjere koncepata kakvi mogu biti predmet razmatranja u industriji i realnom okruženju razvojnih poduzeća.

Teorijsku i empirijsku učinkovitost [77] kriterija i predložene metode moguće je ispitati na primjerima koji su generalno primjenjivi u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, ali i relevantni obzirom na svrhu kriterija i metode da se koriste za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi.

Provjera empirijske učinkovitosti kriterija i predložene metode temelji se na analizi pokazatelja kao što su kvaliteta, troškovi i resursi [77]. Empirijska konzistentnost i teorijska učinkovitost kriterija i predložene metode provjereni su usporedbom s metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti ekodizajn smjernicama u studiji slučaja ([63], [81]) i usporedbom vrednovanja ekološke prihvatljivosti procjenom životnog ciklusa (*LCA*) [85].

3.) Praktični doprinos

Praktični doprinos očituje se razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Time se i formalno ostvaruje doprinos aktivnostima vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoju proizvoda.

## 1.6. Struktura doktorske disertacije

U **poglavlju 1** obrazlažu razlozi pokretanja istraživanja na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda). Daje se uvid u važnost aktivnosti vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda. Izlaže se motivacija za razvoj metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Daje se kratki pregled najvažnijih zaključaka iz pregleda najistaknutijih istraživanja iz pregleda literature područja istraživanja. Opisuje se istraživanje na način da se iznose ciljevi istraživanja i hipoteza. Opisuje se metodologija istraživanja, te daje objašnjenje četiri koraka metodologije u radu prikazanog istraživanja. U uvodnim razmatranjima ukratko se navode metode korištene u istraživanju i znanstveni doprinosi istraživanja.

Pregled područja istraživanja sastoji se od teorijskog okvira istraživanja temeljem kojeg su opisane glavne ideje, koncepti i teorije u području istraživanja. U **poglavlju 2** daje se pregled procesa konstruiranja i opis konceptualne faze procesa konstruiranja. Obrazlaže se motivacija istraživanja, te se daje objašnjenje procesa konstruiranja iz klasične perspektive konstruiranja o razvoju tržišno konkurentnog proizvoda i s druge strane procesa konstruiranja iz perspektive razvoja za održivi životni vijek proizvoda. Pritom se objašnjava pojam paradoksa na mjestima gdje se susreću te dvije perspektive konstruiranja. U poglavlju se opisuju ekodizajn metode i pristupi konstruiranja za okoliš koji se primjenjuju tijekom faza oblikovanja i detaljiranja proizvoda. U poglavlju se objašnjavaju pojmovi eko-efikasnost i eko-efektivnost, te se daje objašnjenje strategija poboljšanja utjecaja proizvoda. Strategije poboljšanja utjecaja proizvoda na okoliš su poboljšanje proizvoda, rekonstrukcija, razvoja novog koncepta i razvoj sustava proizvoda i usluga. U pregledu teorijskih i metodoloških pristupa vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda opisuju se karakteristike i ograničenja metoda koje se koriste u tu svrhu. U pregledu literature područja istraživanja analizirane su metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Poglavlje završava kritičkim osvrtom na primjenu metoda procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) tijekom procesa konstruiranja.

**Poglavlje 3** odnosi se na analizu rezultata preliminarnog istraživanja u kojem se analiziraju metode kvalitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Izlaže se motivacija i razlozi zašto su u preliminarnom dijelu istraživanja analizirane upravo kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. U preliminarnom dijelu istraživanja provedena je studija slučaja u kojoj su konstruktori imali zadatak provesti vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata. U prvom koraku studije kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu bili propisani, a u drugom koraku studije ispitanici su bili upućeni da koriste kriterije ekološke prihvatljivosti koji se temelje na ekodizajn smjernicama za ekološki prihvatljivo oblikovanje proizvoda. Ovo poglavlje donosi istraživačka pitanja, nacrt studije slučaja, opis testnih koncepcijskih rješenja, analizu rezultata studije slučaja i obrazloženje zaključaka o primjenjivosti postojećih kvalitativnih ekodizajn metoda i alata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Opisan je tijek izvođenja studije, te prikazani rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja. Rezultati studije slučaja i značaj studije za provedeno istraživanje objašnjeni su u raspravi. Poglavlje

završava zaključkom i kritičkim osvrtom na kriterije ekološke prihvatljivosti propisane metodama kojima se vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi na kvalitativan način.

U **poglavlju 4** prezentirani su kriteriji ekološke prihvatljivosti i objašnjena je predložene metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Predložena metoda temelji se na kriterijima ekološke prihvatljivosti koji su također razvijeni u okviru provedenog istraživanja. U poglavlju je dano objašnjenje teorijskih postavki koja su usmjeravala razvoj kriterija i predložene metode. Procedura vrednovanja predloženom metodom objašnjena je na dva primjera; vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata tri sata-budilice i šest koncepata pranja rublja. Poglavlje završava pregledom zahtjeva za validaciju konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava.

**Poglavlje 5** donosi rezultate studije u kojoj je provedena pojednostavljena procjena životnog ciklusa koncepata pranja rublja. U poglavlju su opisani koraci provođenja studije, objašnjena je metodologija i prikupljanje podataka o konceptima. Cilj primjene metode procjene utjecaja na okoliš koncepata pranja rublja je omogućiti uvid u kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata.

U **poglavlju 6** opisano je ispitivanje teorijske i empirijske primjenjivosti kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu i verifikacija istraživanja u cjelini. U okviru istraživanja provedeno je kvalitativno i kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja, te su ova vrednovanja i analize koncepata polučili rezultate koji su usporedivi s rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti pomoću predložene metode. Provedena je analiza i prikupljanje podataka o testnim koncepcijskim rješenjima radi procjene životnog ciklusa. Predstavljeni su rezultati procjene životnog ciklusa testnih koncepcijskih rješenja, te je provedena usporedba sa rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti testnih koncepcijskih rješenja koristeći metodu vrednovanja ekološke prihvatljivosti. U poglavlju su objašnjene pretpostavke koje su bile nužne za provedbu procjene životnog ciklusa testnih koncepata. Validacija kriterija i predložene metode, te verifikacija istraživanja temelje se na analizi teorijskih postavki, pregledu literature, usporedbi kvalitativnih i kvantitativnih metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu, te analizi učinkovitosti, primjenjivosti, korisnosti i

ograničenja kriterija i predložene metode. Poglavlje završava zaključcima o konačnom ishodu istraživanja i potvrđenoj hipotezi.

**Poglavlje 7** čini zaključak doktorske disertacije. U zaključku se navode rezultati istraživanja, obrazlažu se znanstveni doprinosi istraživanja, te daju preporuke za primjenu kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. Provedenim istraživanjem otvorena su neka nova pitanja, izložene nove ideje, teme i izazovi koji bi mogli temelj za pokretanje novih istraživanja u smjeru razvoja metoda i alata za potporu osmišljavanju ekološki prihvatljivih koncepcijskih rješenja proizvoda. Stoga su završne riječi ove doktorske disertacije posvećene opisu smjernica budućih istraživanja.

# 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

*U ovom poglavlju definiran je teorijski okvir istraživanja. Objašnjena je motivacija i razlozi za pokretanje istraživanja na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja. Istraživanja ekodizajna pri konstruiranju bave se proučavanjem procesa i metoda za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga. Nadalje, bave se adekvatnim i pravovaljanim vrednovanjem ekološke prihvatljivosti proizvoda kako bi se izbjegli neprimjereni utjecaji proizvoda na okoliš prije proizvodnje. Poglavlje završava pregledom i analizom ekodizajn metoda i alata koji služe vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda, a primjenjuju se u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.*

## 2.1. Teorijski okvir istraživanja

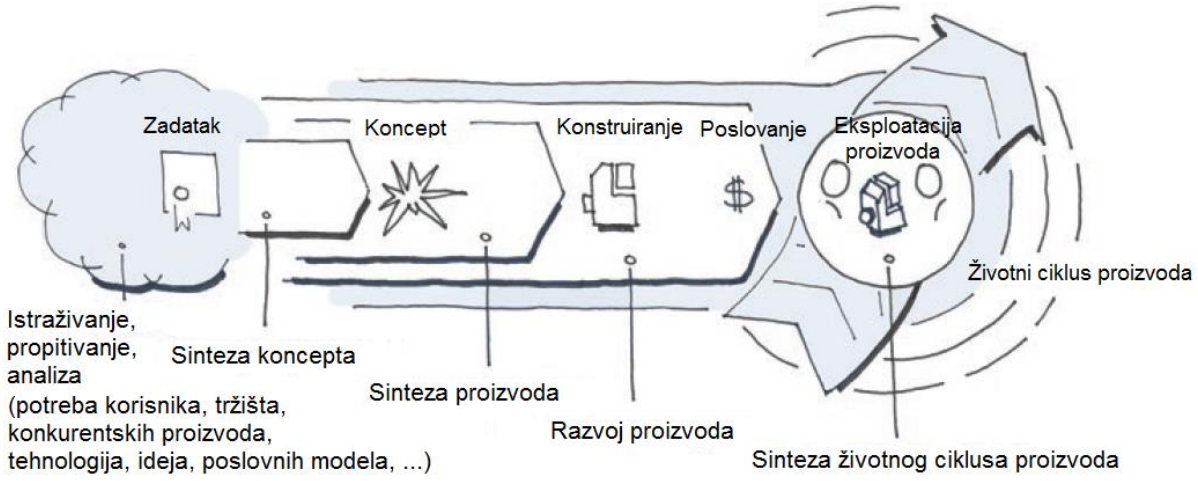
Teorijski okvir istraživanja čine ideje, koncepti i teorije iz znanosti o konstruiranju te ekodizajn pristupu konstruiranju tehničkih sustava koji se u literaturi naziva *Konstruiranje za okoliš – ekodizajn* (engl. *Design for Environment – ecodesign*).

### 2.1.1. Konstruiranje i razvoj proizvoda

Proces konstruiranja proizvoda započinje zbog potreba tržišta ili nove ideje proizvoda. Cilj konstruiranja je razvoj rješenja koje zadovoljava zahtjeve kupaca i funkcionalne zahtjeve. Rješenje ima biti razrađeno od funkcijske dekompozicije do detalja, čime se omogućava proizvodnja i komercijalizacija proizvoda [92]. Uslijed toga što je proces konstruiranja i razvoja proizvoda zahtjevan u pogledu organizacije i upravljanja aktivnostima realizacije proizvoda, ne bi ga bilo moguće provesti bez strukturiranog i unaprijed osmišljenog plana razvoja [93].

Modeli procesa konstruiranja prikazi su strukturiranja zadataka konstruiranja i procesa razvoja proizvoda [11], [72], [94]. Andreasen i Heinov model Integriranog razvoja proizvoda [44] prikazuje da se radi o paralelnim aktivnostima, te u kojima sudjeluju akteri iz različitih disciplinarno podijeljenih odjela poduzeća (marketing i prodaja, konstrukcija i proizvodnja, nabava i distribucija).

Andreasen i drugi [95] prikazali su isprepletenost različitih aktivnosti konstruiranja od nastanka i razvoja ideje proizvoda do realizacije i lansiranja na tržište modelom Integriranog razvoja proizvoda (Slika 2-1). Model definira osnovne aktivnosti pri konstruiranju i razvoju proizvoda: definiranje zadatka konstruiranja, razvoj koncepta, konstrukcijska razrada, razvoj modela poslovanja, proizvod u eksploataciji i definiranje parametara životnog ciklusa proizvoda.

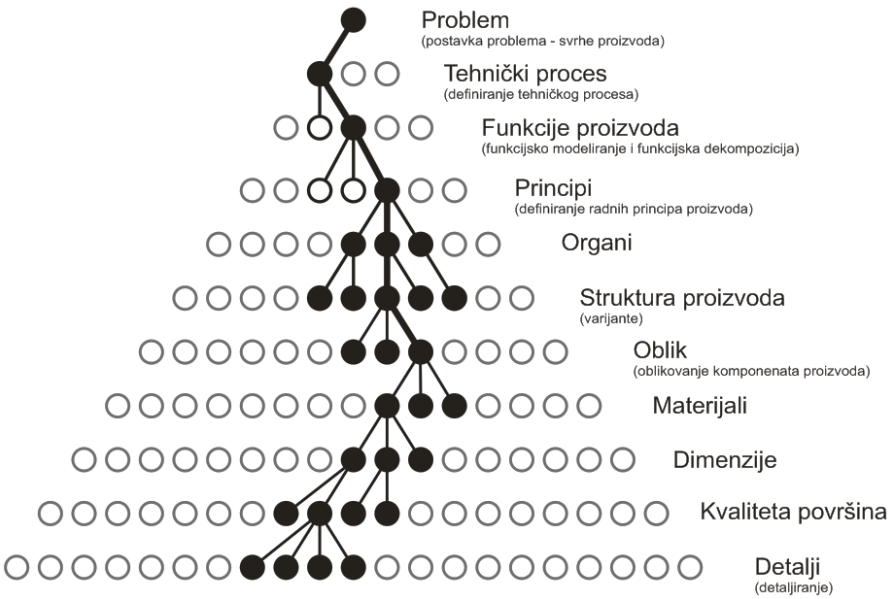



Slika 2-1. Model razvoja proizvoda (Andreasen i drugi [95])

Koordinacija procesa razvoja i provjera napredovanja procesa razvoja proizvoda temelje se na procedurama definiranim od strane poduzeća. Procedure mogu propisivati specifične zadatke, korake ili metode (kao što su provjera naprezanja konstrukcije ili *FMEA* analiza [96]), i upute kako i kada ih valja provoditi.

Prema Ullmanu [11], rane faze procesa konstruiranja (razvoj koncepta i oblikovanje proizvoda) karakterizira nedostatak znanja o proizvodu, tj. njegovom konačnom rješenju. Tijekom konstrukcijske razrade definira se sve više značajki rješenja proizvoda te je sve manje nepoznanica u pogledu konačnih karakteristika proizvoda i njegovog životnog ciklusa. Odluke o ključnim značajkama proizvoda i strukturi proizvoda determiniraju konačan izgled, kvalitetu i troškove proizvoda koji se razvija [93].

Tijekom konstruiranja povećava se broj definiranih značajki proizvoda, a smanjuje se tzv. „stupanj slobode" rješenja [3], [44]. Značajke proizvoda moguće je kategorizirati prema tzv. razinama razrade značajki proizvoda [44], [97]. Počevši s apstraktnijim razinama razrade (kao što su definiranje svrhe proizvoda i funkcija proizvoda), proces konstruiranja usmjerava se prema konkretizaciji proizvoda i definiranju značajki proizvoda koji su komponente, materijali, kvaliteta površina i tolerancije (Slika 2-2).



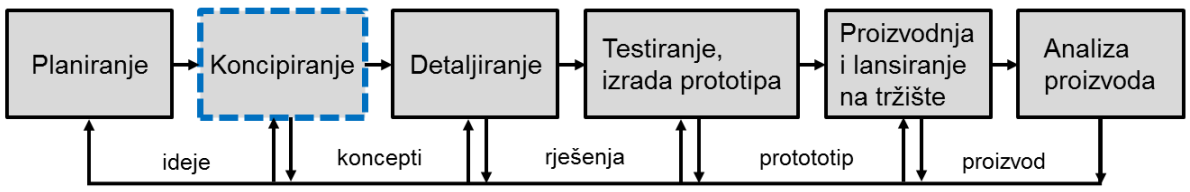

Slika 2-2. Razine razrade i značajke proizvoda [44]

Odluka o konceptu i specifikacijama proizvoda označava završetak konceptualne faze, a nastavak procesa konstruiranja temeljen je upravo na ovoj odluci. O specifikacijama proizvoda zaključuje se temeljem odluka donesenih tijekom procesa konstruiranja i razvoja proizvoda [98].

O ključnim značajkama može se odlučiti prilikom definiranja specifikacija, odnosno u ranim fazama konstruiranja. Tako se o materijalima komponenata proizvoda može se odlučiti ranije u procesu konstruiranja kako bi se krenulo u nabavu materijala, dok se o konačnom obliku komponenata proizvoda odlučuje kasnije tijekom konstrukcijske razrade. Bez odlučivanja o ključnim značajkama proizvoda, ne mogu se donijeti daljnje odluke o značajkama koje o njima ovise [23].

U konceptualnoj fazi generira se nekoliko koncepcijskih rješenja temeljem usuglašenih funkcionalnih zahtjeva i zahtjeva korisnika. Karakteristike ili značajke koncepata proizvoda predstavljaju referentne vrijednosti temeljem kojih se provodi vrednovanje i ocjenjivanje koncepata prema prethodno dogovorenim kriterijima vrednovanja. Izborom koncepta proizvoda predodređene su karakteristike proizvoda (npr. kvaliteta proizvoda, radne karakteristike tijekom eksploatacije) i značajke ključne za nastavak razvoja (npr. radni principi, struktura proizvoda i tehnološki postupci proizvodnje).

Prema standardu ISO/TR 14062 [99] vrednovanje utjecaja na okoliš proizvoda u procesu konstruiranja proizvoda temelji se na dostupnim informacijama o proizvodu (Slika 2-3). Standardom ISO/TR 14062 propisane su smjernice vrednovanja ekološke prihvatljivosti tijekom razvoja i ciljevi što manjih utjecaja na okoliš.




Slika 2-3. Proces razvoja prema ISO/TR 14062 [99], [100]

U literaturi se utjecaji na okoliš prikazuju u jedinicama utjecaja na okoliš, a rezultati procjene utjecaja na okoliš kvantitativno prikazuju koliko je jedinica utjecaja na okoliš procijenjeno za pojedine kategorije utjecaja na okoliš. Primjer kategorija utjecaja na okoliš su: klimatske promjene, smanjivanje ozonskog omotača, kiselost okoliša, foto-oksidacija, deforestacija, utjecaj toksičnih kemijskih spojeva na ekosustave i zdravlje ljudi, smanjivanje iskoristivih (zelenih) površina i potrošnja neobnovljivih resursa. ISO/TR 14062 standard ne propisuje zahtjeve ili tehničke specifikacije za konstruiranje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda, te nema službenih uputa za primjenu standarda u praksi [101].

Za vrednovanje prema ISO/TR 14062 [99], potrebne su detaljne informacije o proizvodu i njegovom životnom ciklusu, te procjena utjecaja na okoliš proizvoda (*LCA*) [1]. U ranim fazama razvoja, kada nije razrađena detaljna specifikacija proizvoda, a time nema potrebnih podataka o proizvodu i njegovom životnom ciklusu, vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljeno na procjeni životnog ciklusa nije moguće provesti [102]. U slučaju kada se radi o razvoju originalnih koncepata [60], nije moguće generirati dovoljno detaljan opis koncepta i specifikacije proizvoda, a uslijed toga što uobičajeno nema referentnih proizvoda za usporedbu [103].

### *2.1.2. Konceptualna faza i vrednovanje koncepata*

Najvažniji ishod konceptualne faze je odabir koncepta koji će ući u daljnju konstrukcijsku razradu i u konačnici rezultirati gotovim proizvodom. U konceptualnoj fazi teži se generiranju i razmatranju većeg broja koncepata proizvoda. Koncepti proizvoda koji su superiorni ostalim kandidatima izabrani su za unapređivanje, nastavak razvoja i konstrukcijsku razradu [104].

Izbor koncepata podrazumijeva vrednovanje koncepata i odlučivanje o konceptima za unapređivanje, nastavak razvoja i konstrukcijsku razradu. Vrednovanje koncepata provodi se usporedbom koncepata, ocjenjivanjem koncepata temeljem kriterija vrednovanja ili na način da se kvantitativnim vrijednostima opisuju nesigurnosti prilikom odlučivanja [105]. Kriteriji mogu biti funkcionalni zahtjevi (određuju funkcionalnost proizvoda), zahtjevi od strane proizvođača, dionika i korisnika, troškovi (razvoja, proizvoda i životnog ciklusa), tehnička izvedivost, pouzdanost tijekom rada i eksploatacije, vrijeme potrebno za razvoj, tehnička kompleksnost,

kvaliteta zadovoljenja potreba korisnika, utjecaji na okoliš i drugi. Cilj izbora između više alternativnih rješenja je izbor najboljeg koncepta koji će biti razrađen do detalja u nastavku procesa konstruiranja. Odluka o konceptu i općenito odluke koje se donose u konceptualnoj fazi imaju značajan utjecaj na troškove, robusnost, pouzdanost i kvalitetu proizvoda, izbor tehnoloških postupaka proizvodnje i trajanje procesa razvoja. Troškovi koji nastaju uslijed izmjene koncepcijskog rješenja nakon jednom izabranog koncepta rastu (sa faktorom 10) što je kasnije u proces konstruiranja izmjena implementirana [106].

U literaturi se navodi da su informacije o proizvodu u konceptualnoj fazi nepotpune i neprecizno opisuju proizvod [107], [108], odnosno postoji neizvjesnost o konačnim značajkama proizvoda i ukupnim troškovima [105]. Prilikom izbora koncepta, konstruktori se vode pretpostavkama o karakteristikama proizvoda pri radu i u fazi eksploatacije.

Metode koje se koriste pri odlučivanju o najpovoljnijem konceptu mogu biti *VDI 2225* smjernice za vrednovanje [72], *Go/No go* provjere koncepata [72], uspoređivanje s najboljima (engl. *benchmarking*), *QFD* metode [47] ili metode umjetne inteligencije, npr. metode neizrazite logike (engl. *fuzzy logic*), neuronske mreže, genetički algoritmi i druge.

Pri odlučivanju u ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda kriterije vrednovanja je teško kvantificirati, pa se koriste posebne lingvističke varijable kao što su "dobro", "srednje", "loše". Ovaj način ocjenjivanja smatra se primjereniji ocjenjivanju koncepata temeljem kriterija vrednovanja, jer pruža određenu fleksibilnost pri dodjeljivanju ocjena konceptima, nego u slučajevima kada su ocjene koncepta definirane preko kvantitativne vrijednosti, odnosno izražene brojem [105].

Metode umjetne inteligencije koje se koriste pri odlučivanju kao što su neizrazita logika i neuronske mreže ne mogu se koristiti za rješavanje problema sa više-kriterijskim odlučivanjem kod kojih postoji hijerarhija kriterija [105]. Kako bi se riješio problem odlučivanja sa velikim brojem kriterija i hijerarhijom važnosti kriterija koriste se metode kao što je Metoda analitičkog hijerarhijskog procesa (engl. *Analytic Hierarchy Process - AHP*) [109].

Koncepti proizvoda koji se generiraju u konceptualnoj fazi razvojnog procesa uobičajeno se prikazuju skicama koje prikazuju način rada proizvoda, funkcije i radne principe

proizvoda, te organe koji čine strukturu proizvoda [110]. Detaljnost skica koncepata proizvoda razlikuje se od autora do autora. Skice koncepta ilustriraju 'ideje' [111], 'skice' [64], 'sheme' [111], odnosno 'principijelna rješenja' proizvoda [72].

Tablica 2-1. Analiza pojmova koncept proizvoda i radni principi proizvoda

| Koncept proizvoda | Radni principi | Značajke koncepta | Stupanj razrade koncepta | Literatura |
|---|---|---|---|---|
| Funkcije<br>Tehnička rješenja | Tehnička rješenja funkcija proizvoda | Značajke su značajke ranih principijelnih rješenja. | Nizak | [112] |
| Struktura proizvoda (organi) | - nema podataka | Značajke nisu radni principi, niti karakteristike organa. | Nizak | [113] |
| Radni principi<br>Organi proizvoda | Tehnička rješenja organa proizvoda | - nema podataka | Nizak | [114] |
| Organi proizvoda<br>Ključni sklopovi<br>Model funkcija<br>Specifikacije | Veza između komponenata i funkcija proizvoda | Značajke su geometrijske karakteristike organa, ključnih sklopova i komponenata. | Srednji | [65] |
| Radni principi<br>Struktura proizvoda (ključni sklopovi)<br>Preliminarni oblici<br>Dimenzije | Fizikalni efekti | Značajke su fizikalni efekti. | Srednji | [115] |
| Radni principi<br>Principijelna rješenja | Funkcijska struktura<br>Fizikalni efekti<br>Karakteristike principijelnih rješenja | Značajke su fizikalni efekti, geometrijske karakteristike i karakteristike materijala principijelnih rješenja. | Visok | [72] |

Tablica 2-1 prikazuje objašnjenje pojmova koncept proizvoda, radni principi proizvoda te gradivne značajke koncepata prema Hubki i Ederu [65], Pahl i drugima [72], Willhelmsu [112], Malmqvistu [113], Motteu [114] i Anderssonu [115].

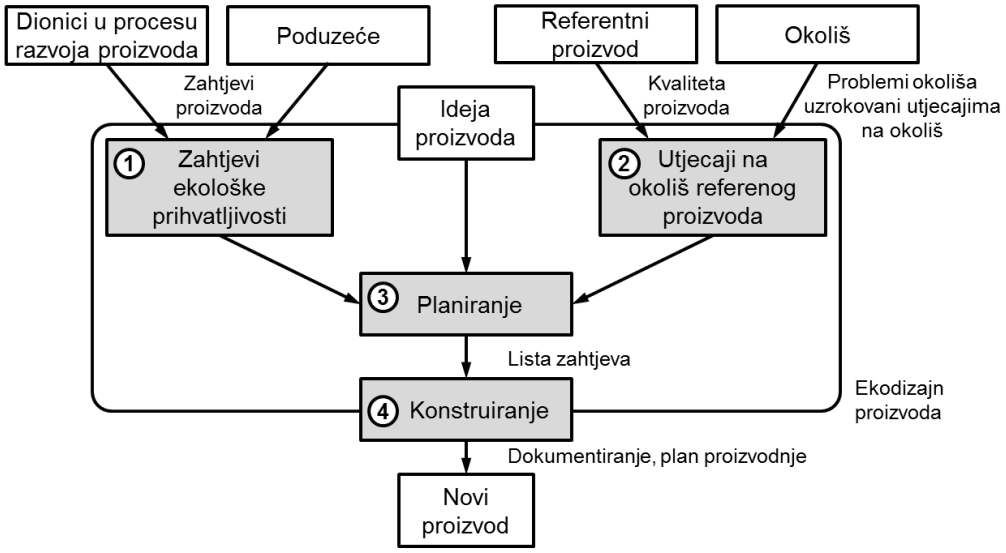
U konceptualnoj fazi generiraju se i razmatraju funkcije proizvoda, a na temelju zahtjeva. Obično se generira više alternativnih radnih principa za ostvarivanje funkcija, parcijalnih funkcija i principijelnih rješenja koja proizlaze iz kombiniranja funkcija i tehničkih rješenja funkcija [112]. Koncepcijska rješenja su specifikacija principa rada proizvoda, odnosno radnih principa proizvoda [72].

U konceptualnoj fazi generiraju se i razmatraju funkcije proizvoda, a na temelju funkcionalnih zahtjeva, zahtjeva korisnika i ostalih zahtjeva. Obično se generira više alternativnih radnih principa za ostvarivanje funkcija i podfunkcija, te razmatraju različita principijelna rješenja koja proizlaze iz kombiniranja funkcija i tehničkih rješenja ili tehnologije [112]. Koncepcijska rješenja su specifikacija radnih principa proizvoda [72].

Tehničke sustave potrebno je vrednovati kvalitativno, kvantitativno i s obzirom na troškove [72]. Kvantifikacija efekata odvija se u fazama razvoja nakon konceptualne faze [115], pa je shodno tomu vrednovanje temeljem značajki proizvoda izraženima kvantitativnim fizikalnim veličinama temelj donošenja odluka nakon konceptualne faze.

### *2.1.3. Ekodizajn*

U procesu razvoja proizvoda često je potrebno razmotriti i ispuniti različite zahtjeve u pogledu ekološke prihvatljivosti, ali i uskladiti ih s ciljevima razvoja. Ekodizajn je pristup kojim se razmatraju ekološki (okolišni) čimbenici u procesu razvoja proizvoda, a s ciljem razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [116], [117], [118], [119]. Slika 2-4 prikazuje model procesa razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda.




Slika 2-4. Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda - ekodizajn [120]

Primjenom ekodizajn principa tijekom razvoja novih ili unapređenja postojećih proizvoda, poduzeća nastoje iskoristiti mogućnost da se predvide učinci proizvoda na okoliš, na sigurnost i zdravlje korisnika, a prije proizvodnje i lansiranja proizvoda na tržište [121]. Cilj ekodizajna je preventivno smanjiti ili u potpunosti izbjeći potencijalno štetne učinke proizvoda na okoliš, a u fazama procesa konstruiranja u kojima postoji najveći potencijal za razvojem ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [122]. Najpopularnije i u industriji najviše korištene ekodizajn metode su procjena utjecaja na okoliš (*LCA*), analiza životnog ciklusa te metode za ekološki prihvatljivo oblikovanje i proizvodnju [3], [123].

Prevladavajući pristup vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda temelji se na kvantitativnoj procjeni utjecaja proizvoda na okoliš [8]. Utjecaji proizvoda na okoliš procjenjuju se za potrebe donošenja odluka u procesu konstruiranja. Utjecaji na okoliš razmatraju se usporedno s drugim tradicionalno važnim kriterijima vrednovanja kao što su kvaliteta zadovoljenja korisničkih zahtjeva, funkcionalnost, profitabilnost, sigurnost, pouzdanost tijekom rada, ergonomija, tehnička izvedivost i estetski zahtjevi [124].

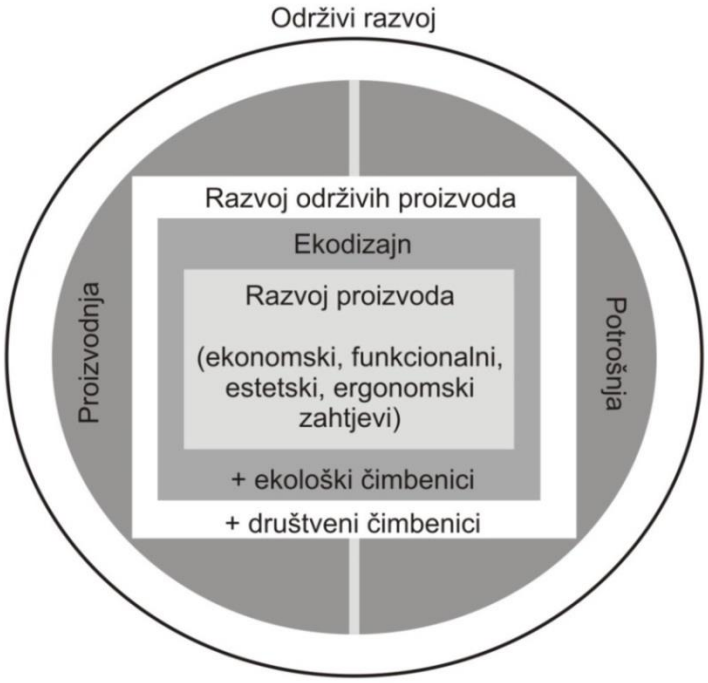
Procjena utjecaja proizvoda na okoliš obuhvaća analizu životnog ciklusa proizvoda i primjenu metoda za računanje utjecaja proizvoda na okoliš. Cilj provođenja analize životnog ciklusa proizvoda je maksimiziranje eko-efikasnosti, te identificiranje procesa u životnom ciklusu proizvoda kod kojih postoji potencijal za redukciju potrošnje materijala i energije.

Analizom životnog ciklusa proizvoda rano u procesu konstruiranja nastoji se omogućiti implementacija ekološki prihvatljivijih rješenja i alternativa [99].

Metodologije i metode za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš tijekom životnog ciklusa proizvoda poznate su pod zajedničkim nazivom procjena životnog ciklusa - *LCA* [1]. Radi se o tehnici procjene utjecaja na okoliš za razmatranje proizvoda, usluga ili procesa s obzirom na definiranu glavnu funkciju proizvoda, uslugu ili proces [99].

Ekodizajn pristupom propisano je istovremeno razmatranje ekoloških i ekonomskih čimbenika tijekom procesa razvoja, odnosno maksimiziranje eko-efikasnosti proizvoda [3], [118], [125]. Eko-efikasnost proizvoda se u literaturi definira kao omjer vrijednosti proizvoda izražene u monetarnim ili nominalnim jedinicama i utjecaja proizvoda na okoliš izražene u jedinicama utjecaja na okoliš [126], [127], [128], [129]. Tzv. vrijednost proizvoda je od strane poduzeća definirana referentna vrijednost, a definira se temeljem vrednovanja funkcionalnosti proizvoda, kvalitete zadovoljenja korisničkih potreba ili procijenjene tržišne vrijednosti proizvoda [128].

Nadalje, ekodizajn je oblikovanje proizvoda i usluga s ciljem ostvarivanja rješenja koja zadovoljavaju potrebe društva za održivim razvojem [118], [130], [131]. Ideja održivog razvoja je da očuvanje okoliša ne isključuje ekonomski prosperitet poduzeća i nije u suprotnosti s poslovnim ciljevima razvoja. Za razliku od eko-efikasnosti, razmatranje održivosti proizvoda zahtijeva postavljanje fundamentalnijih pitanja o održivosti potrošnje i proizvodnje i razmatranje društvenih čimbenika [125], [132], [133].




Slika 2-5. Ekodizajn, razvoj održivih proizvoda i održivi razvoj [24]

Prakticiranje održivog razvoja ovisi o upravljanju kompleksnim spletom procesa povezanih sa proizvodom (Slika 2-5), a za procjenu održivosti proizvoda i procesa potreban je veliki broj podataka o proizvodu, proizvodnji i potrošnji [134]. Također, zbog toga što su društveni i okolišni učinci nefinancijski pokazatelji održivosti (temeljeni na kvalitativnoj interpretaciji od strane donositelja odluka), njihova implementacija u procese odlučivanja je složena [135].

Za poduzeća, strategije održivog razvoja impliciraju razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [136]. Istraživači potvrđuju povezanost razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda sa ostvarivanjem ušteda i povećanjem profitabilnosti poduzeća [119]. Za poduzeća, strane zainteresirane za pitanja ekološke prihvatljivosti proizvoda nisu samo proizvođači, korisnici (odnosno potrošači), nego i društvo (Tablica 2-2).

Tablica 2-2. Prednosti uvođenja ekodizajna za poduzeća, korisnike i društvo [137], [138]

| Aspekti | Zainteresirana strana | Prednosti ekodizajna |
|---|---|---|
| Materijalni | Poduzeće | Niži troškovi, veći profit |
| | Korisnici | Niži troškovi posjedovanja proizvoda |
| | | Niža cijena proizvoda |
| | Društvo | Niža potrošnja resursa |
| Nematerijalni | Poduzeće | Jednostavnija proizvodnja i prodaja |
| | Korisnici | Bolji (kvalitetniji) proizvod |
| | Društvo | Kompatibilnost sa zakonskim regulativama |
| Emocionalni | Poduzeće | Motiviraniji zaposlenici |
| | Korisnici | Osjećaj većeg životnog standarda i kvalitetniji život |
| | Društvo | Pozitivni koraci prema održivom društvu |

Ciljevi razvoja koji su postavljeni od strane poduzeća poput smanjivanja troškova razvoja i povećanja profita, te ambicioznost poduzeća da ih ostvari utječu na uspješnost primjene ekodizajna i smanjivanje utjecaja na okoliš proizvoda i procesa. Osim ciljeva razvoja postavljenih interno od strane poduzeća, postoje i ciljevi temeljem kojih proizlaze zahtjevi za proizvod, a mogu biti temeljeni na normama i zakonskim te pravnim regulativama koje se tiču proizvoda i razvojnog procesa (Tablica 2-3). Norme, zakonske i pravne regulative mogu biti propisani ispravni načini zbrinjavanja proizvoda, klasifikacija proizvoda prema energetskim razredima potrošnje energije, te klasifikacija prema normama definiranim za specijalne kategorije proizvoda) [116].

Tablica 2-3. Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju, te unutarnje motivacije poduzeća za implementacijom ekodizajna u okruženje poduzeća [119]

| Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju poduzeća za implementacijom ekodizajna | Unutarnje motivacije poduzeća za implementacijom ekodizajna |
|---|---|
| Zakonske i pravne regulative | Kvalitetniji i bolji proizvodi |
| Ostvarivanje veće konkurentnosti na tržištu | Zahtjevi korisnika za ekološki prihvatljivijim proizvodima |
| Utjecaj konkurencije, trendova i kretanja na tržištu (engl. *market push*) | Smanjenje troškova razvoja |
| Utjecaj razvoja tehnologije u tržišnoj niši ili tehnologije općenito (engl. *technology push*) | Smanjenje ukupnih troškova (uključujući troškove životnog ciklusa proizvoda) |
| | Povrat uloženih sredstava u obliku profita |

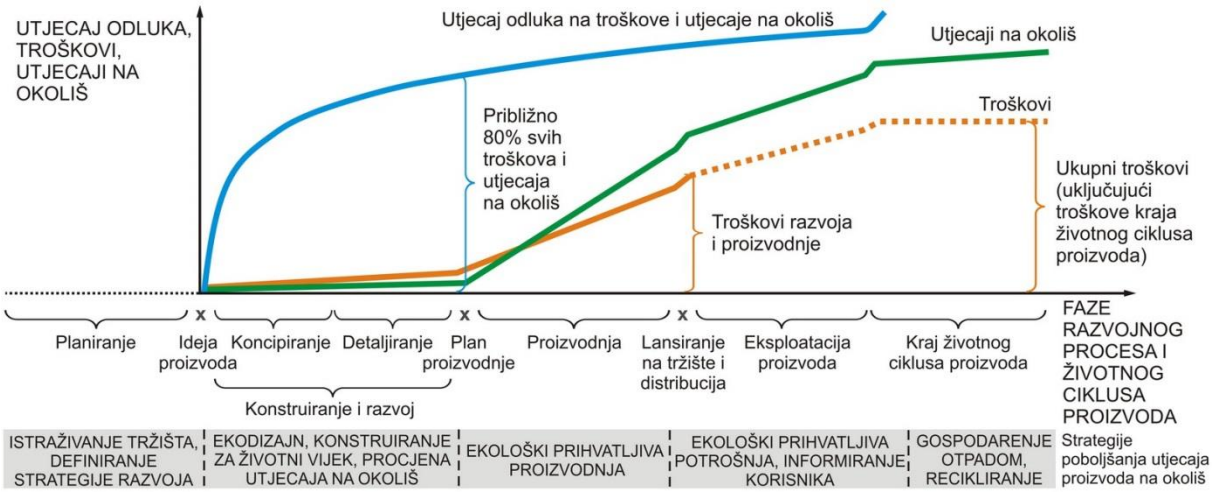
Iako je primarni cilj ekodizajna smanjiti utjecaje proizvoda na okoliš, postoje i druge prednosti implementacije i prakticiranja ekodizajna kao što su povećanje konkurentnosti na tržištu smanjivanjem troškova, osvajanje novih tržišta, razvoj novih proizvoda i optimizacija portfelja proizvoda [135], [139]. Do smanjivanja troškova dolazi uslijed redukcije potrošnje energije i materijala životnog ciklusa proizvoda. Za poduzeća, smanjivanje troškova i povrat ulaganja najvažnije su motivacije za primjenu ekodizajn principa putem analize životnog ciklusa proizvoda [119].

Prema smjernicama održivog razvoja, poslovni modeli, proizvodi i usluge trebaju zadovoljavati potrebe korisnika na društveno najprihvatljiviji način, sa najnižim troškovima i utjecajima na okoliš [140]. Ekonomski, okolišni i društveni učinci poslovanja poduzeća, te održivi razvoj sastavni su dijelovi vizije i inovacijskih strategija poduzeća [135], [136]. Uz tradicionalno važne faktore kao što su konkurentnost poduzeća i prepoznavanje prilika na tržištu, briga za okoliš i stupanj društveno odgovornog poslovanja poduzeća, definirani su kao važni faktori za ostvarenje uspješnosti na tržištu.

Istraživači koji proučavaju ekodizajn savjetuju uvođenje metodologija, metoda i alata što ranije u proces razvoja proizvoda [141]. Odluke donesene u ranim fazama najviše utječu na konačnu strukturu proizvoda, karakteristike proizvoda i njegov životni vijek, te posljedično tomu i utjecaj na okoliš. Preporuke su što ranije razmatranje ekoloških aspekata i mogućnosti poboljšanja slike utjecaja proizvoda na okoliš i ako je moguće omogućiti izmjene i poboljšanja u tzv. 'fleksibilnijim' fazama razvoja. U suprotnome, u kasnijim (ili završnim) fazama razvoja,

nije moguće implementirati izmjene i poboljšanja koja donose i najveće uštede po pitanju utjecaja na okoliš, obzirom na to da su najvažnije odluke koje se tiču tehničkog rješenja proizvoda već donesene [99].

Ramani i drugi [103] ističu da je ekodizajn potrebno implementirati u svim fazama procesa konstruiranja i razvoja proizvoda. Strategijama poboljšanja slike utjecaja proizvoda na okoliš [142] svojstveno da su primjenjive u točno određenim fazama razvojnog procesa, te da se odnose na pojedine faze životnog ciklusa proizvoda (Slika 2-6).




Slika 2-6. Utjecaj odluka tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda na konačni utjecaj proizvoda na okoliš i troškove [29]

### *2.1.4. Životni ciklus proizvoda*

Životni ciklus proizvoda je proces transformacije energije i materijala tijekom životnog vijeka proizvoda, od vađenja sirovina do ekološki prihvatljivog odlaganja proizvoda [28]. Životni ciklus proizvoda započinje vađenjem sirovina i proizvodnjom sirovih materijala koji se dalje koriste u proizvodnji komponenata proizvoda. Nakon nabave sirovina i proizvodnje komponenata, proizvod se sastavlja, pakira i distribuira na tržište. Faza eksploatacije proizvoda započinje u trenutku kada je proizvod kupljen od strane kupca. Nakon što je proizvod završio svoj korisni životni vijek (faza eksploatacije), njegov životni ciklus završava za okoliš sigurnim zbrinjavanjem. Završnu fazu životnog ciklusa proizvoda čini rastavljanje, recikliranje materijala, ekološki prihvatljivo odlaganje ili ponovno korištenje komponenata proizvoda u sljedećoj generaciji proizvoda [72].

Faze životnog ciklusa proizvoda generički opisuju različite fizičke, funkcionalne ili za utjecaje na okoliš važne značajke i karakteristike proizvoda. Termin „životni ciklus" odnosi se na namjeru da se temeljito i holistički procijeni upotreba sirovina u proizvodnji, proizvodnja, distribucija, eksploatacija i odlaganje, uključujući i prijevoz između ovih faza životnog ciklusa. Zbroj svih nabrojanih koraka i faza predstavlja životni ciklus proizvoda. Svaka faza životnog ciklusa proizvoda zbog zajedničkih karakteristika razmatra se zasebno prilikom procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*).

Faze životnog ciklusa proizvoda:

- Ekstrakcija i priprema sirovina za proizvodnju materijala
- Proizvodnja materijala iz sirovina
- Proizvodnja, sastavljanje i pakiranje,
- Prijevoz sirovina, nabava materijala, standardnih komponenata proizvoda i distribucija proizvoda,
- Eksploatacija proizvoda, održavanje i usluge povezane s proizvodom u fazi korisnog životnog vijeka proizvoda,
- Kraj životnog vijeka proizvoda (zbrinjavanje otpada i proizvoda, rastavljanje, odlaganje na odlagališta, recikliranje, oporaba energije, itd.).

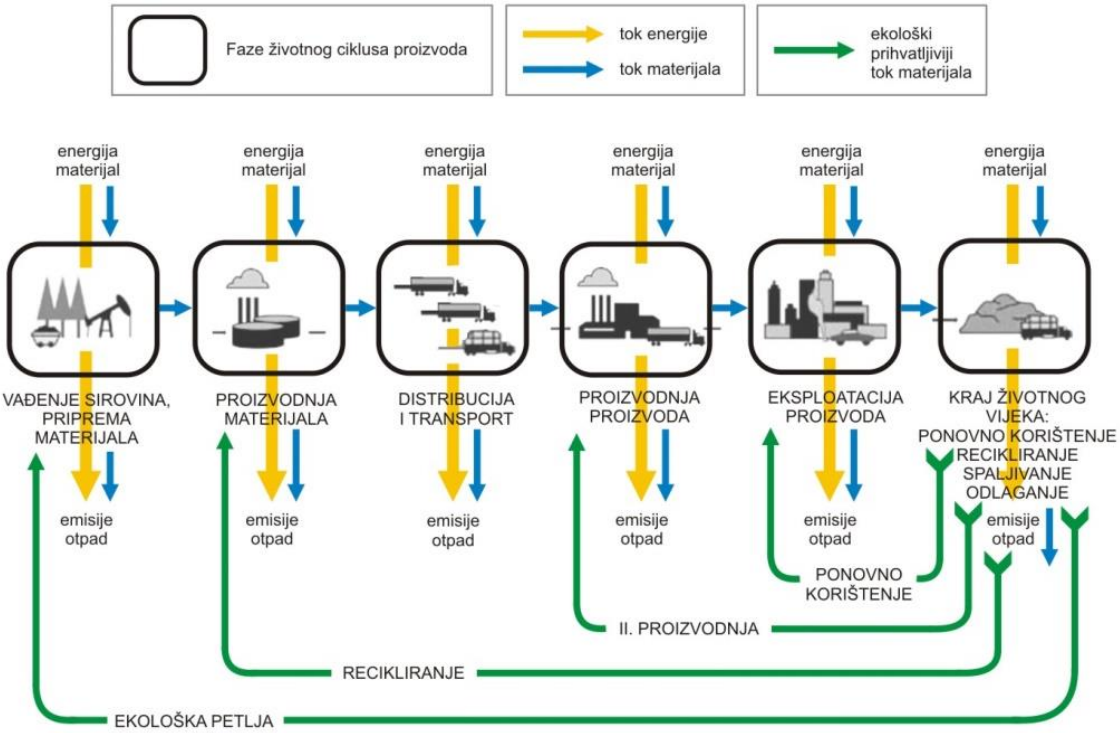
Proizvodi su u interakciji s okolišem na način da postoji razmjena energije i materijala u svakoj fazi životnog ciklusa proizvoda [103]. U svim fazama životnog ciklusa, proizvod, usluge ili sustav proizvoda i usluga, postoji potrošnja resursa (direktno materijala ili indirektno energije), a oni nakon transformacije postaju utjecaji na okoliš u obliku emisija ili otpada.

Metodologije kojima se opisuje način strukturiranja životnog ciklusa proizvoda razvijene su za potrebe prikaza životnog ciklusa različitih proizvoda i sustava proizvod-usluge. Ranije metodologije propisivale su prikaz generičkih faza životnog ciklusa, te ulaznih i izlaznih tokova energije i materijala između pojedinih faza životnog ciklusa proizvoda koje se može nazvati i transformacijama u životnom ciklusu proizvoda [26], [143], [144].

Cilj provođenja analize životnog ciklusa proizvoda je identificiranje procesa u kojima postoji mogućnost povećanja eko-efikasnosti i smanjivanja potrošnje materijala i energije, kako bi se prije same proizvodnje i lansiranja proizvoda na tržište implementirala ekološki prihvatljivija rješenja i alternative [99]. Prema principima ekodizajna, ukoliko se rano u procesu konstruiranja identificiraju za okoliš kritični parametri potrošnje energije i materijala, moguće je izbjeći neprimjereno velik utjecaj na okoliš u kritičnim fazama životnog ciklusa proizvoda, te poboljšati sliku ukupnih utjecaja proizvoda na okoliš.

### *2.1.5. Faktor poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda*

Procjena eko-efikasnosti proizvoda temelji se na analizama troškova i utjecaja proizvoda na okoliš za koje u pravilu treba uzeti u obzir potrošnju energije i materijala tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda [128]. Istraživači razlikuju pojmove eko-efikasnost i eko-efektivnost [116], [117], [119]. Procjenom životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1] nastoje se identificirati kritična mjesta za poboljšanje eko-efektivnosti životnog ciklusa proizvoda (Slika 2-7).



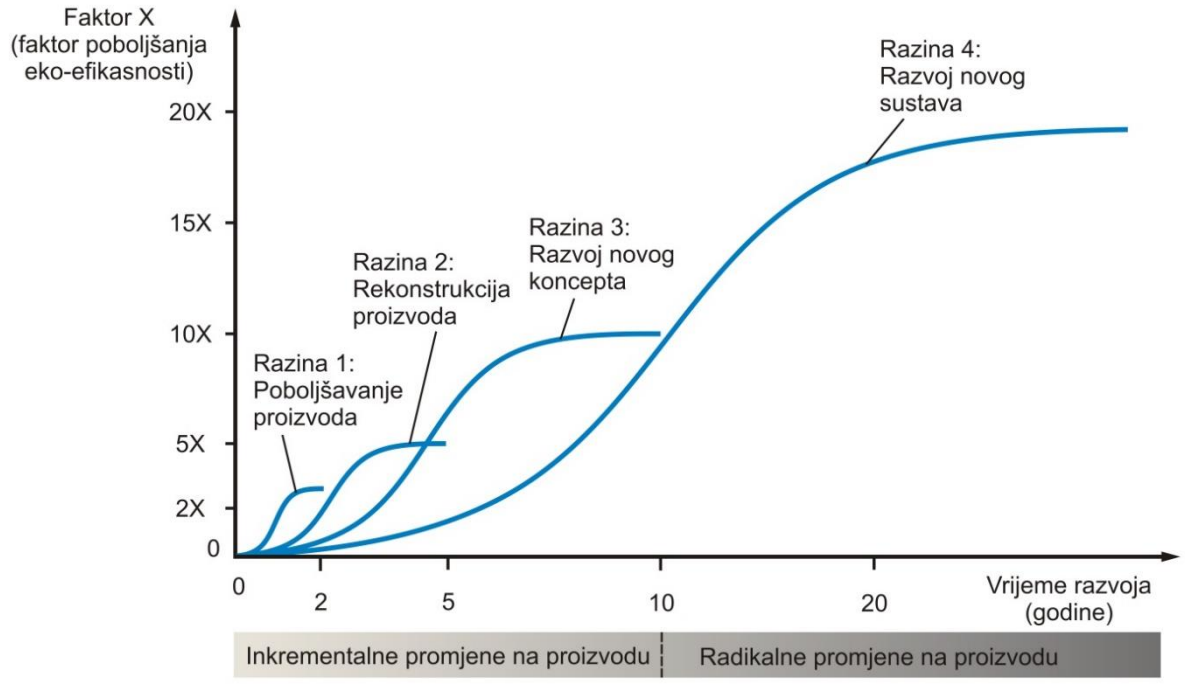

Slika 2-7. Faze životnog ciklusa i strategije poboljšanja eko-efektivnosti proizvoda

Eko-efektivnost se odnosi na eko-efektivnost sustava u kojem je proizvod jedan od komponenti većeg transformacijskog sustava u kojem se nastoji maksimizirati ciklično kruženje materijala tijekom životnog vijeka proizvoda [145]. Poboljšanje eko-efektivnosti životnog ciklusa proizvoda pozitivno utječe i na poboljšanje eko-efikasnosti proizvoda [146].

U jednadžbi (1) [128] kvaliteta proizvoda ili usluge odnosi se na kvalitetu zadovoljenja zahtjeva kupaca, tržišnu vrijednost ili vrijednost u pogledu funkcionalnosti proizvoda ili usluge. Utjecaj na okoliš je kvantificirana mjera štetnih utjecaja na okoliš, potrošnje energije i materijala ili količine otpada [128].

$$Eko\text{-}efikasnost = \frac{Kvaliteta\ proizvoda\ ili\ usluge}{Utjecaji\ na\ okoliš} \tag{1}$$

U ranim fazama razvoja proizvoda moguće je ostvariti veći potencijal za smanjivanjem utjecaja proizvoda na okoliš, nego što je to moguće u kasnijim fazama [46], [99], [118], [147], [148]. Razvoj novog koncepta i razvoj novog sustava proizvod-usluge su ekodizajn strategije kojima je moguće postići veći stupanj poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda nego rekonstrukcijom proizvoda (Slika 2-8).




Slika 2-8. Četiri strategije za postizanje poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda [8]

U jednadžbi (2), faktor poboljšanja eko-efikasnosti (faktor X) je omjer eko-efikasnosti novog (poboljšanog) proizvoda i eko-efikasnosti proizvoda prije rekonstrukcije [128], [149]. Što je taj omjer veći, veći je i faktor poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [150].

$$Faktor\ X = \frac{Eko\text{-}efikasnost\ novog\ proizvoda\ ili\ usluge}{Eko\text{-}efikasnost\ proizvoda\ ili\ usluge\ prije\ poboljšanja} \quad (2)$$

U kontekstu ekodizajna i razvoja proizvoda, pojam 'strategija' odnosi se na skup aktivnosti koje su potpora planiranju i odvijanju poboljšanja proizvoda i njegovih ekoloških karakteristika iz perspektive životnog ciklusa proizvoda [151].

Faktor poboljšanja eko-efikasnosti – *Faktor X* moguće je izračunati tek po završetku procesa konstruiranja i razvoja proizvoda (npr. kombiniranjem metod procjene životnog ciklusa - *LCA* i metode procjene troškova životnog ciklusa - *LCC*).

Tablica 2-4. Strategije poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [152]

| Stupanj poboljšanja ekološke prihvatljivosti | Faktor X - faktor poboljšanja eko-efikasnosti | Vrijeme za razvoj eko-inovacije (godine) | Tehnološka inovativnost | Inovativnost u vidu promjena životnog stila korisnika | Zahtijevana razina uvođenja izmjena infrastrukturne potpore razvojnom procesu |
|---|---|---|---|---|---|
| Razina 1: Inkrementalno poboljšanje proizvoda | do 3x (5-20%) | 0-2 god. | Niska | Minimalna | Minimalna |
| Razina 2: Rekonstrukcija proizvoda | 3x do 5x (20-50%) | 0-5 god. | Srednja | Niska | Minimalna |
| Razina 3: Razvoj novog koncepta proizvoda | 5x do 10x (50-75%) | 0-10 god. | Visoka | Visoka | Visoka |
| Razina 4: Razvoj novog sustava proizvod-usluge | 10x do 20x (>75%) | 0-30 god. | Vrlo visoka | Vrlo visoka | Vrlo visoka |

*Razina 1: Inkrementalno poboljšanje proizvoda*

Eko-inovacije na prvoj razini unapređenja slike utjecaja proizvoda na okoliš odnose se na primjerice izbor ekološki prihvatljivijih materijala komponenata proizvoda. Unapređenje proizvoda usmjereno je na smanjivanje utjecaja na okoliš već postojećeg proizvoda [153].

*Razina 2: Rekonstrukcija proizvoda*

Kod rekonstrukcije proizvoda, koncept proizvoda se ne mijenja. Provodi se rekonstrukcija na razini arhitekture proizvoda ili komponenata proizvoda [153]. Time je moguće značajno izmijeniti karakteristike proizvoda koje posredno uzrokuju utjecajima na okoliš u pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda [154]. Halila i Hörte [155] dijele poboljšanja proizvoda na ovoj razini na rekonstrukcije proizvoda manjeg i većeg obima, već ovisno o nižem ili višem faktoru poboljšanja eko-efikasnosti.

*Razina 3: Razvoj novog koncepta proizvoda*

Prilikom razvoja novog koncepta proizvoda, eko-inovacije nisu ograničene samo na promjenu koncepta proizvoda, nego su usmjerene na razmatranje načina ostvarivanja funkcija [153] i razmatranje funkcija proizvoda [156]. Ova, treća razina poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda odvija se s ciljem razmatranja ne samo proizvoda, nego proizvoda kao dijela sustava kojim se ostvaruje svrha proizvoda unutar sustava ostvarenja usluga i zadovoljenja potreba korisnika. U ovu kategoriju eko-inovacija uključen je i razvoj poslovnih modela proizvoda i usluga, gdje su pojedine funkcije proizvoda zamijenjene uslugama [156]. Razvoj novog koncepta proizvoda zahtijeva fundamentalno razmatranje funkcija proizvoda i s njima povezanih utjecaja na okoliš [154]. Razvoj novih koncepata proizvoda predstavlja radikalniju inovaciju proizvoda, time i potencijalno veća poboljšanja eko-efikasnosti proizvoda, nego što je to moguće postići inkrementalnim promjenama (rekonstrukcijom) postojećeg proizvoda [8].

*Razina 4: Razvoj novog sustava proizvod-usluge*

Najzahtjevniji oblik eko-inovacija su razvoj novih poslovnih sustava proizvoda i usluga [27], [153], jer zahtijevaju promišljanje dotadašnjeg načina proizvodnje i eksploatacije

proizvoda, te promjenu socio-tehničkog sustava proizvoda [157], [158]. Ovom eko-inovacijskom strategijom moguće je postići poboljšanje eko-efikasnosti od preko 75% (Tablica 2-4).

### *2.1.6. Konstruiranje za okoliš*

Metode konstruiranja za okoliš se primjenjuju s ciljem poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda u fazi oblikovanja i fazi razrade proizvoda [103]. Ekološka prihvatljivost proizvoda proizlazi iz razmatranja značajki proizvoda koje ukazuju na poželjne ili manje poželjne karakteristike proizvoda i njegovog životnog ciklusa [159]. Metode konstruiranja za okoliš su konstruiranje za rastavljivost, pakiranje, modularnost proizvoda, kraj životnog ciklusa proizvoda, konstruiranje za ponovnu proizvodnju (engl. *remanufacturing*) i druge.

Izbor odgovarajuće metode konstruiranja za okoliš uvjetovan je značajkama proizvoda i životnim ciklusom proizvoda koji su specifični za određeno poduzeće, tržišni segment, zahtjeve korisnika i ciljeve razvoja. Kako se ove metode temelje uglavnom na rezultatima analize utjecaja na okoliš i troškova razmatranog proizvoda [160], informacije o proizvodu koje su potrebne za unapređenje ekološke prihvatljivosti proizlaze iz analize proizvoda prethodno distribuiranog na tržište, tj. proizvoda s dobro poznatim utjecajima na okoliš i životnim ciklusom. Zbog specifičnosti proizvoda i njegovog životnog ciklusa nije moguće definirati generičku definiciju ekološke prihvatljivosti temeljenu na razmatranju značajki proizvoda koje se unaprjeđuju metodama konstruiranja za okoliš.

## 2.2. Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata

Ekodizajn metode i alati primjenjuju se radi povećanja eko-efikasnosti proizvoda [139], a u fazama konstruiranja od konceptualne faze do konstrukcijske razrade i rekonstrukcije. Ekodizajn propisuje kriterije ekološke prihvatljivosti, smjernice za ekološko oblikovanje, te alate za poboljšanje ukupne slike utjecaja proizvoda na okoliš [161].

Pochat i drugi [162] analizirali su ekodizajn metode i alate koji se koriste u poduzećima koja se bave konstruiranjem i razvojem proizvoda. Zaključili su da je većina od oko 150 metoda i alata koje su analizirali namijenjena analizi postojećih, već komercijalnih proizvoda i rekonstrukciji proizvoda. Vrlo je mali broj ekodizajn metoda i alata koji su namijenjeni razvoju novih proizvoda [162]. Knight i Jenkins [139] objašnjavaju da ekodizajn metode i alati koji se primjenjuju u poduzećima nisu prilagođene razvoju koji bi uključivao uvođenje radikalnijih promjena na proizvodu ili njegovom životnom ciklusu kao što su razvoj novih koncepcijskih rješenja, promjena modela poslovanja i drugi [132], [133].

Vezzoli i Sciama [122] ekodizajn metode i alate dijele u četiri velike grupe: metode i alati za procjenu životnog ciklusa proizvoda, metode i alati za potporu pri koncipiranju i razvoju proizvoda, metode i alati za izbor strategija za konstruiranje i razvoj, te metode i alati za komunikaciju i razmjenu podataka. Bovea i Pérez-Belis [163] razvili su taksonomiju ekodizajn metoda i alata kako bi pružili potporu izboru metoda i alata, te su ih podijelili u grupe prema namjeni (vrsti zadatka ili aktivnosti procesa konstruiranja za koju je metoda ili alat namijenjen) i razini kompleksnosti (vrijeme, informacije i znanje potrebni za prikupljanje podataka o proizvodu i primjenu metode ili alata).

Znanje o ekodizajnu (principima upravljanja životnim ciklusom proizvoda kako bi proizvod bio što ekološki prihvatljiviji) i iskustvo rada s ekodizajn metodama i alatima osnovni su preduvjet za uspješnu primjenu ekodizajn metoda i alata [162]. Ekodizajn je tek u posljednjih 10 godina postao dio obveznih obrazovnih programa inženjera strojarstva [164]. Zbog visoke razine znanja potrebne za primjenu ekodizajn metoda i velikog broja informacija koje konstruktor mora znati o proizvodu prije primjene ekodizajn metoda, konstruktori najčešće nemaju potrebno predznanje za efektivnu primjenu tih metoda u praksi.

Ekodizajn metode i alate za vrednovanje ekološke prihvatljivosti uobičajeno se koriste nakon što je utjecaj na okoliš procijenjen putem detaljnijih analitičkih metoda i alata (primjerice procjenom životnog ciklusa proizvoda), dok se prijedlozi poboljšanja slike utjecaja proizvoda na okoliš iznose temeljem rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [165]. Metode i alati za procjenu utjecaja na okoliš primjenjuju se u cilju vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda s obzirom na njegov životni ciklus, a ekološka prihvatljivost izražena

je kvantitativno putem procjene utjecaja proizvoda na okoliš. Rezultati se koriste za identificiranje kritičnih funkcija proizvoda i značajki proizvoda koje je potrebno optimizirati.

Ekodizajn metode i alati mogu se razlikovati i po tome da li je metoda ili alat kompliciran za primjenu i slijedno tome koliko je zahtjevna implementacija pojedine metode ili alata. Kompliciranost primjene i razina kompleksnosti povezana sa teškoćama koje se pojavljuju prilikom implementacije ekodizajn metoda i alata ovise o parametrima metoda i alata [166] kao što su:

1.) Vrsta i brojnost ulaznih podataka koji su potrebni za primjenu metode ili alata,

2.) Vrijeme, troškovi, te razina znanja i stručnosti koja je zahtijevana za pravilno korištenje metode ili alata,

3.) Dostupnost informacija i podataka nužnih za pravovaljanu primjenu metode ili alata.

Razina znanja i stručnosti koja je zahtijevana za pravilno korištenje metode ili alata može biti niska, srednja i visoka, a ovisi i o tome da li je metoda ili alat namijenjen za primjenu od strane jednog korisnika (konstruktora sa ili bez znanja o ekodizajnu) ili se nužno primjenjuje od strane multidisciplinarnog tima u kojem su i ekodizajn stručnjaci [167].

Ekodizajn metode i alati mogu se podijeliti na grupe metoda i alata prema vrsti ulaznih podataka koje se zahtijevaju za njihovu primjenu [100], [166]. Razlikujemo četiri velike grupe ekodizajn metoda i alata:

- *Kvalitativne:* Informacije o proizvodu koje su ulazni parametri metode ili alata kod kvalitativnih metoda su kvalitativne. Kvalitativnim metodama i alatima propisani su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji na kvalitativan način opisuju ideju, koncept ili proizvod, tj. njihove značajke.
- *Semi-kvantitativne:* Ove metode i alati zahtijevaju kvalitativne ulazne podatke o ideji, konceptu ili proizvodu, a njima su propisane kvantitativne vrijednosne skale dobrote i time je vrednovanje kriterijima ekološke prihvatljivosti moguće kvantificirati.

- *Kvalitativno-kvantitativne:* Kod kvalitativno-kvantitativnih metoda i alata ulazni podaci mogu biti kvalitativni i kvantitativni, već ovisno o tome radi li se o kvalitativnoj ili kvantitativnoj vrijednosnoj skali, tj. kriterijima ekološke prihvatljivosti.
- *Kvantitativne:* Tipičan primjer kvantitativnih metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti je metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) kojom se utjecaji na okoliš kvantificiraju u obliku jedinica utjecaja na okoliš, a u cilju analize životnog ciklusa, usporedbe s referentnim proizvodom ili rekonstrukcije proizvoda.

### *2.2.1. Kvalitativne metode*

Kvalitativne ekodizajn metode i alati namijenjeni su ranim fazama procesa konstruiranja kada postoji potreba za prvim uvidom u utjecaje na okoliš, vrednovanje ekološke prihvatljivosti ili konsolidaciju daljnjih koraka razvoja, a poznato je malo podataka o proizvodu koji se razvija. Kvalitativne metode i alati su smjernice, liste kriterija ekološke prihvatljivosti i priručnici kojima se propisuju kriteriji ekološke prihvatljivosti na kvalitativan (opisni) način. Kvalitativne metode i alati mogu ukazivati na potencijalne izvore pretjerano velikih utjecaja na okoliš ili upućuju na druge metode i alate (Tablica 2-5).

Ekodizajn smjernice su preporuke o strategijama ili principima za poboljšanje i unapređivanje rješenja proizvoda po pitanju utjecaja na okoliš, bilo ukazivanjem na aspekte životnog ciklusa koje treba uzeti u obzir tijekom oblikovanja proizvoda ili na način da ukazuju na alternativna i ekološki prihvatljivija rješenja. *Ten Golden Rules* [123] su ekodizajn smjernice koje u 10 točaka opisuju općenite aspekte koje valja uzeti u obzir tijekom oblikovanja proizvoda. Smjernice su generičke (namijenjene za sve proizvode), ali nedostatno detaljne u opisu kako ih ostvariti.

Liste kriterija ekološke prihvatljivosti uređene su u obliku potvrdnih izjava o karakteristikama proizvoda koje ukazuju na ekološki prihvatljiv proizvod. Alternativno, liste kriterija ekološke prihvatljivosti uređene su da propituju karakteristike proizvoda koje ukazuju na probleme ili aspekte proizvoda povezane s neprihvatljivim utjecajima proizvoda na okoliš.

Primjer liste kriterija ekološke prihvatljivosti su *Eco-design Checklist* [147], *Eco-design guidelines* [168] i *Strategy list* [169].

Tablica 2-5. Kvalitativne ekodizajn metode i alati

| Naziv metode/alata | Vrsta metode/alata | Aktivnost | | | Vrednovanje | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Generiranje | Analiza | Rekonstrukcija | Kvalitativno | Semi-kvantitativno | Kvalitativno-kvantitativno | Kvantitativno |
| *Eco-Design Value guidelines* [82] | Preskriptivne smjernice | ■ | ■ | | | | | |
| *Ten Golden Rules* [123] | Preskriptivne smjernice | ■ | ■ | | | | | |
| *Eco-design Checklist* [147] | Lista kriterija | | ■ | | ■ | | | |
| *Eco-design guidelines* [168] | Lista kriterija | | ■ | | ■ | | | |
| *Strategy list* [169] | Preskriptivna lista kriterija | | ■ | | | | | |
| *Design for Environment guidelines* [170] | Preskriptivne smjernice | ■ | ■ | | | | | |
| *Volvo's White, Grey and Black Lists* [171], [172], [173] | Preskriptivna lista kriterija | | ■ | ■ | ■ | | | |
| *Product Ideas Tree* [174] | Alat za potporu generiranju ideja | ■ | | | | | | |
| *Pain Gain* [54] | Alat za analizu i usporedbu ideja | | ■ | | | | ■ | |

Kriteriji ekološke prihvatljivosti mogu biti grupirani prema fazama životnog ciklusa proizvoda na koje se odnose. Liste kriterija ekološke prihvatljivosti često se odnose na aspekte proizvoda koji zahtijevaju više informacija o proizvodu nego što ih uobičajeno ima u ranim fazama procesa konstruiranja. Zaključak je da liste kriterija ekološke prihvatljivosti samostalno

nisu dostatne za ekološko oblikovanje proizvoda i vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda, već im je zadatak da usmjeravaju proces konstruiranja prema detaljnijoj analizi proizvoda i analizi njegovog životnog ciklusa [9].

### *2.2.2. Semi-kvantitativne metode*

Tijekom procesa konstruiranja, odluke se donose u skladu sa često konfliktnim zahtjevima za maksimiziranjem funkcionalnosti troškova, a minimiziranjem troškova i utjecaja na okoliš [175], te za što manjim utjecajima na okoliš, potrošnjom energije i materijala, a ispunjavanjem svih sigurnosnih zahtjeva i propisa [176]. Byggeth i Hochschorner [46] analizirali su 15 ekodizajn alata kako bi otkrili podržavaju li procese odlučivanja u kojima je potrebno odlučiti o povoljnijem rješenju, a na temelju zahtjeva ili kriterija kojima se opisuje optimalno rješenje. Byggeth i Hochschorner su ekodizajn alate odabrali temeljem kriterija dobre dokumentiranosti alata u literaturi, pokazatelja da se i u praksi primjenjuju u poduzećima, te kriteriju jednostavnosti primjene [46]. Kod tzv. jednostavnih metoda i alata, vrijeme potrebno za prikupljanje podataka i primjenu alata iznosi 1 do 5 dana [84].

Kriteriji vrednovanja implementirani u alatima koje su Byggeth i Hochschorner [46] analizirali su kriteriji prema kojima se ideje, koncepti ili proizvodi vrednuju (npr. kriteriji kao što su 'toksičnost' ili 'potrošnja energije') ili se pak radi o strategijama za ekološko oblikovanje proizvoda. Strategije za ekološko oblikovanje su primjerice smjernice 'koristiti lokalno dostupne materijale za proizvodnju proizvoda' i 'izabrati tehnološke postupke proizvodnje s manje emisija'.

Alate koji propisuju smjernice, strategije ili procedure, Byggeth i Hochschorner svrstali su u kategoriju već spomenutih kvalitativnih ekodizajn alata [46]. U ovu kategoriju svrstani su *Ten Golden Rules* [123], *Strategy List* [169] i *Volvo's White, Grey and Black Lists* ([171], [172], [173]). Ovi alati ne zadovoljavaju zahtjeve alata za potporu pri više-kriterijskom odlučivanju te kada je vrednovanje potrebno provesti prema kriterijima ekološke prihvatljivosti, optimalnih troškova i održivosti rješenja [46].

Ekodizajn alati razvijeni su za različite namjene: procjenu utjecaja na okoliš, otkrivanje kritičnih parametara utjecaja na okoliš tijekom životnog ciklusa proizvoda, usporedbu ekodizajn strategija, koncepata i proizvoda ili propisivanje strategija za unapređivanje slike

utjecaja proizvoda na okoliš. Samo nekolicina alata koje su Byggeth i Hochschorner analizirali propisuju metode vrednovanja rješenja proizvoda, te način dodjeljivanja ocjena ideji, konceptu ili proizvodu temeljem kriterija ekološke prihvatljivosti. Byggeth i Hochschorner [46] podijelili su ekodizajn alate prema vrsti ocjene dodijeljene rješenjima proizvoda. Metode i alati podijeljeni su u tri grupe prema vrsti dodijeljenih ocjena kriterija ekološke prihvatljivosti. Obzirom na vrstu kriterija propisan je način vrednovanja (semi-kvantitativno vrednovanje), a ocjene prema parcijalnim kriterijima mogu biti:

- Kvalitativne vrijednosti (*Econcept Spiderweb* [3], *LiDS-Wheel* [147], *Morphological Box* [147], *Dominance Matrix* [168], *EcoDesign Checklist* [168], *ABC-Analysis* [169], *Philips Fast Five Awareness* [177], i *Eco-products tool* [178],
- Kvalitativne vrijednosti prema jednim kriterijima i kvantitativne vrijednosti prema drugim kriterijima propisanima alatom (*MET-Matrix* [147] i *MECO* [179]), ili
- Kvantitativne vrijednosti (*ERPA* [20]).

*Philips Fast Five Awareness* [177] se koristi pri vrednovanju i usporedbi koncepata proizvoda s obzirom na drugi referentni proizvod. Ova lista kriterija ekološke prihvatljivosti koja se primjenjuje za usporedbu koncepata je lista pitanja podijeljenih u grupe kriterija koji se odnose na pojedine faze životnog ciklusa proizvoda. Na pitanja se odgovara pozitivnim ili negativnim odgovorom. Na temelju pozitivno odgovorenih odgovora bira se strategija poboljšanja koncepta. *Philips Fast Five Awareness* [177] lista kriterija ekološke prihvatljivosti za usporedbu koncepata lako se primjenjuje za semi-kvalitativno vrednovanje. Koncepti se vrednuju usporedno, a lista pitanja jasno određuje kriterije vrednovanja. Ako koncept zadovoljava određeni kriterij dodjeljuje mu se ocjena 1, a u suprotnome, ako ne zadovoljava određeni kriterij, dodjeljuje mu se ocjena 0. Pobjeđuje koncept s najvećim brojem pozitivnih odgovora, odnosno najvećom ukupnom ocjenom [46].

Kod metode *Dominance matrix (Paired Comparison)* [168], koncepti se uspoređuju u parovima – svaki sa svakim. Bolji koncept ocjenjuje se ocjenom 1, a onaj drugi ocjenom 0. Pobjeđuje koncept s najviše pozitivnih ocjena. Konstruktori (korisnici alata) sami definiranju kriterije ekološke prihvatljivosti koje će koristiti za usporedbu koncepata proizvoda [24].

*LiDS-Wheel* [147] je alat koji pruža okvir za sistematičan pregled životnog ciklusa proizvoda. Može se također koristiti tijekom generiranja ideja kako bi usmjerio taj proces na razmatranje životnog ciklusa proizvoda, odnosno kritičnih mjesta i faza u tom ciklusu koje mogu uzrokovati utjecaje na okoliš. Vrednovanje i procjena grupirani su u 8 strategija, prvotno su u istraživanju prikupljene ukupno 33 smjernice, te je odabrano 8 [180]. Životni ciklus je u potpunosti pokriven preko ovih strategija, i služi za pomoć pri poboljšavanju ekološkog učinka proizvoda na okoliš i potporu odlučivanju. Rezultati su prikazani grafički. Alat se uglavnom koristi za potporu kreativnom dijelu procesa konstruiranja, pomaže pri vizualizaciji učinka proizvoda na okoliš i koristi se za identificiranje mjesta za poboljšavanje proizvoda, odnosno životnog ciklusa proizvoda. 8 je kriterija i prema svakom kriteriju daje se ocjena 0-5. Temeljem ovog alata nastao je veliki broj novih alata, primjerice *EcoASIT* [181].

*Econcept Spiderweb* [3] i *Philips Fast Five Awareness* [177] služe usporedbi koncepata proizvoda [9]. *Econcept Spiderweb* alatom propisano je 8 kriterija i prema svakom kriteriju konceptu je moguće dodijeliti ocjenu na skali od 0 do 6 [168].

*Eco-products tool* [178] namijenjen je usporedbi koncepata proizvoda. Koncept se vrednuje na način da se uspoređuje s nekim drugim referentnim konceptom. Ako koncept zadovoljava kriterij ocjenjuje se ocjenom 1, a ako ne ocjenom 0. Pobjeđuje koncept s najviše pozitivnih ocjena [182]. Ekološki prihvatljivi proizvodi su oni koji su prema 8 kriterija, na skali 0 do 5 vrednovani s ocjenom od minimalno 2, te imaju prosjek ocjena svih kriterija 3 ili više.

Matrične metode i alati namijenjeni ranim fazama konstruiranja [159] su matrično uređene metode i alati za procjenu životnog ciklusa proizvoda. Kod ovih alata, u jednoj dimenziji matrice (npr. redovi) popisuju se faze životnog ciklusa, a u drugoj dimenziji matrice (npr. stupci) konstruktori zapisuju aspekte i utjecaje na okoliš, odnosno kritične emisije, otpad i ispuštanja u okoliš koje očekuju u pojedinoj fazi životnog ciklusa. Pritom su korisnici alata primorani razmišljati o svakom elementu matrice što im omogućuje osmišljavanje potencijalno boljih rješenja u cilju poboljšanja eko-efikasnosti i izbjegavanja neželjenih utjecaja na okoliš.

Jednostavnost matričnih alata razlog je njihove popularnosti u industriji. Glavni nedostaci ovih metoda i alata su praćenje procesa izbora i implementacije rješenja, nemogućnost procjene stvarnih utjecaja na okoliš i nemogućnost procjene kvalitete predloženih

rješenja. Korisnici matričnih alata za rane faze konstruiranja koji nemaju dodatna stručna znanja o ekodizajnu i iskustva u primjeni određenog alata, lako zanemare važne aspekte proizvoda ili predloženih poboljšanja koji se tiču ekologičnosti. S druge strane, može se dogoditi da ne primijete potencijalno dobra rješenja ili pak krivo procjene važnost i utjecaje na okoliš analiziranog proizvoda. Matrične metode stoga se smatraju dobrim pomoćnim alatima za generiranje ideja i rješenja, a manje se primjenjuju kao alati za analizu i procjenu utjecaja proizvoda na okoliš [9].

*ERPA* (engl. *Environmentally Responsible Product Assessment*) [20] svrstava se u kategoriju jednostavnijih alata za procjenu životnog ciklusa na okoliš. Radi se o 5 x 5 matrici. Stupci matrice podijeljeni su na faze životnog vijeka (vađenje, nabava i proizvodnja sirovina, proizvodnja i sastavljanje proizvoda, prijevoz i distribucija proizvoda, eksploatacija i kraj životnog vijeka proizvoda). U redovima matrice zapisuju se kriteriji za procjenu životnog ciklusa, odnosno utjecaja proizvoda na okoliš. Kriteriji mogu biti ekološka prihvatljivost materijala, potrošnja energije tijekom eksploatacije proizvoda, toksičnost emisija, količina otpada i dr. U matrici se za svaku fazu i kriterij vrednuje ocjenama od 0 (značajni utjecaji na okoliš) do 4 (niski utjecaji na okoliš). Zbrojem svih vrijednosti u matrici dobije se ukupna vrijednost ekološke prihvatljivosti, a vrednuje se prema skali od 0 do 100 [183].

*MET* (engl. *Material, Energy, Toxicity*) [147] služi za vrednovanje životnog ciklusa proizvoda. Problemi ili kritični utjecaji na okoliš svrstavaju se u kategorije: potrošnja energije, toksične emisije i životni ciklus materijala. Kvalitativne informacije o proizvodu upisuju se za svaku kategoriju utjecaja na okoliš za pojedine faze životnog ciklusa. Detaljnost i kvaliteta informacija koje se upisuju u *MET* matricu ovise o znanju i iskustvu razvojnog tima koji provodi analizu proizvoda. *MET* matrica [147] zahtijeva znanje stručnjaka koji se bave problemima procjene utjecaja proizvoda na okoliš, a ponovljivost rezultata nije zadovoljavajuća, jer stručnjaci mogu doći do različitih zaključaka. Rezultati analize mogu se koristiti za predlaganje koraka poboljšanja proizvoda [73]. *MET* matrica [147] se može primijeniti zajedno sa listom kriterija ekološke prihvatljivosti, te time postati primjenjiva za generiranje novih ideja proizvoda, oblikovanje i konstruiranje ili odlučivanje o ekološki prihvatljivijim rješenjima proizvoda [9].

*MECO* (engl. *Material, Energy, Chemical and Others*) [179] se koristi za identifikaciju ekološki kritičnih aspekata proizvoda. Nešto je jednostavnija od *ERPA* matrice [20] jer za nju nisu propisani načini ocjenjivanja numeričkim vrijednostima, već kvalitativno. Ukoliko postoje podaci, kvantifikacija utjecaja na okoliš koji se upisuju u pojedine matrične ćelije, računaju se sofisticiranijim metodama procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA* ili *SLCA*), a u suprotnome se vrednuju temeljem subjektivno dodijeljenih ocjena i važnosti utjecaja na okoliš [184].

Lagerstedt i drugi [184] smatraju da bi formiranje grupa proizvoda sa zajedničkim karakteristikama koje se tiču funkcionalnih značajki i onih koje determiniraju ekološki profil proizvoda, omogućilo vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda u ranim fazama razvoja. Lagerstedt i drugi [184] smatraju da bi opis proizvoda koji ne uključuje kvantitativne mjere, parametre ili specifikacije bio pogodniji za rane faze razvoja.

*Eco Functional Matrix* [185] matrica je u kojoj se analizira funkcionalni i ekološki profil proizvoda. Za sastavljanje svakog od profila definirano je 8 karakteristika koje opisuju proizvod u pogledu njegove funkcionalnosti te 8 karakteristika koje opisuju ekološki profil proizvoda. Korisnici alata dodjeljuju kvalitativne ocjene karakteristikama proizvoda služeći se vrijednosnom skalom od 0 do 10). Uz alat su priložene upute za dodjeljivanje ocjena prema vrijednosnoj skali. Za karakteristike proizvoda koje se odnose na funkcije proizvoda, visoka ocjena pokazatelj je velike važnosti karakteristike, a kod karakteristike kojima se opisuje ekološki profil proizvoda, visoka ocjena označava značajnost utjecaja na okoliš koji se mogu pripisati pripadajućoj funkciji proizvoda, tj. velike utjecaje na okoliš uslijed realizacije funkcije proizvoda.

*Eco Functional Matrix* [185] primjenjuje se za identificiranje važnih veza između karakteristika funkcionalnosti i ekologičnosti proizvoda, te služi unapređivanju, odnosno identifikaciji veza visoke zavisnosti među funkcionalnim i ekološkim karakteristikama proizvoda. Short i Lynch [186] su putem primjene alata potvrdili mnoge prednosti ovog alata, ali i nedostatke. Nakon što su ustanovljene kritične veze i zavisnost među funkcionalnim i ekološkim karakteristikama, nema smjernica ili uputa kako ih razriješiti. Pojedine karakteristike kojima se opisuje ekologičnost proizvoda su nejasni korisnicima alata [186]. Zbog toga što nije bilo prijedloga za rekonstrukciju nakon korištenja *Eco Functional Matrix* alata [185], nije

provedena usporedba poboljšanog proizvoda i proizvoda prije rekonstrukcije, pa primjenjivost alata nije vrednovana s tog aspekta [186].

Pregled semi-kvantitativnih ekodizajn metoda i alata nalazi se u Tablici 2-6 (0). Od 15 alata koje su analizirali Byggeth i Hochschorner [46], 8 ih propisuje kriterije koji se tiču životnog ciklusa proizvoda (*ERPA* [20], *LiDS-Wheel* [147], *MET-Matrix* [147], *ABC-Analysis* [168], *EcoDesign Checklist* [168], *Strategy List* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177] i *MECO* [179].

Ocjene koje se dodjeljuju prema kriterijima vrednovanja implementiranima u metodama *LiDS-Wheel* [147], *ABC-Analysis* [168], *EcoDesign Checklist* [168] i *Philips Fast Five Awareness* [177] su kvalitativne, a vrednovanje može biti semi-kvantitativno. Kod *ERPA* alata [20], ocjene koje se dodjeljuju prema kriterijima su kvantitativne. Kod *MECO* alata [179], ocjene prema 2 kriterija dodjeljuju se kvalitativnom ocjenom, a ocjena prema preostalom kriteriju je kvantitativna.

Byggeth i Hochschorner [46] navode da je za primjenu semi-kvantitativnih ekodizajn alata potrebno imati generalni uvid u životni ciklus proizvoda i utjecaje na okoliš. To je stoga što korisnik alata mora provesti dodatno prikupljanje informacija o utjecajima na okoliš, te kako bi znao interpretirati rezultate.

Samo 4 od 15 ekodizajn alata koje su Byggeth i Hochschorner [46] analizirali (*LiDS-Wheel* [147], *ABC-Analysis* [168], *Strategy List* [168] i *MECO* [179]), mogu se koristiti pri više-kriterijskom odlučivanju. No, ovim ekodizajn alatima nije propisana važnost kriterija ekološke prihvatljivosti, odnosno nije poznat redoslijed prioriteta među kriterijima vrednovanja.

Tablica 2-6. Semi-kvantitativne ekodizajn metode i alati

| Naziv metode/alata | Vrsta metode/alata | Aktivnost | | | Vrednovanje | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Generiranje | Analiza | Rekonstrukcija | Kvalitativno | Semi-kvantitativno | Kvalitativno-kvantitativno | Kvantitativno |
| *ABC-Analysis* [168] | Analitička metoda | | | | ■ | | | |
| *Dominance Matrix* [168] | Metoda za usporedbu koncepata | | ■ | | ■ | ■ | | |
| *Philips Fast Five awareness* [177] | Lista zahtjeva za usporedbu koncepata | | ■ | | ■ | ■ | | |
| *Econcept Spiderweb* [3] | Alat za usporedbu koncepata | | ■ | | ■ | ■ | | |
| *Eco-Compass* [187] | Alat za usporedbu koncepata | | ■ | | ■ | ■ | | |
| *LiDS-Wheel* [147] | Alat za usporedbu koncepata | | ■ | | ■ | ■ | | |
| *Morphological Box* [147] | Metoda za generiranje koncepata | ■ | | ■ | | | | |
| *ERPA* [20] | Matrična metoda | | ■ | ■ | | | ■ | ■ |
| *MET-Matrix* [147] | Matrična metoda | | ■ | | | ■ | | |
| *MECO* [179] | Matrična metoda | | ■ | | | | ■ | |
| *Eco-products tool* [178] | Metoda za usporedbu koncepata | | ■ | | | ■ | | |
| *EcoASIT* [181] | Metoda za generiranje novih ideja | ■ | ■ | ■ | | ■ | | |
| *Eco Functional matrix* [185] | Matrična metoda za analizu proizvoda | | ■ | | | ■ | ■ | |

### 2.2.3. Kvalitativno-kvantitativne metode

Vrednovanje prema zahtjevima korisnika ostvareno je putem *zelenih* inačica metode *Kuća kvalitete* [47], npr. [53], [188], [189], [190], [191]. *QFD* podržava proces konstruiranja prilikom oblikovanja i detaljiranja, odnosno rekonstrukcije i inkrementalnih poboljšanja proizvoda [184], ali ne i pri generiranju ideja ili koncepata [2].

*QFD* pristupima nastoje se uključiti zahtjevi tržišta i korisnika, koji mogu biti vrlo složeni. Koriste se u kombinaciji s metodama kao što su uspoređivanje s najboljima i metodama modeliranja potreba i zahtjev korisnika. Nadalje, uključivanjem korisničkih zahtjeva u vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda, pretpostavlja se da su korisnici 'uvijek u pravu' i da imaju dovoljno znanja da bi proveli vrednovanje proizvoda [184].

Zahtjevi korisnika imaju važnu ulogu u procesu konstruiranja [192], [193], jer se u pravilu koncepti i proizvod vrednuju prema njima, no i mnoge druge svrhe [194]. Zahtjevi su obično nužni ulazni podaci metodama temeljenim na *QFD*-u. Preko Kuće kvalitete potrebe korisnika „prevode" se u obliku tehničkih zahtjeva koje proizvod u konačnici treba ispuniti. Inženjeri koji sudjeluju u procesu konstruiranja imaju vrlo malo doticaja s korisnicima i prikupljanjem potreba korisnika što je obično zadatak odjela marketinga. Naime, razvoj proizvoda obično se provodi paralelno sa ostalim procesima razvoja poduzeća, nabavom materijala i komunikacijom s dobavljačima [93]. Modeliranje veza između utjecaja na okoliš i pojedinih komponenata, te potom specifikacija temelji se jedino na subjektivnoj interpretaciji inženjera, koji i inače ne razmatraju životni ciklus proizvoda tijekom primjerice definiranja specifikacija [103].

Cristofari i drugi [189], te Vindoh i Rathod [195] povezali su *LCA* i *QFD* čime su ostvarili kombinaciju prednosti *QFD* metode i prednosti metoda za kvantifikaciju utjecaja na okoliš. Sakao [53] je *QFDE* metodi (engl. *Quality Function Deployment for Environment*) [190] dodao *TRIZ* metodologiju [196] za rješavanje konflikata u *Kući kvalitete*. Vrednovanje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda temelji se na ocjenama važnosti funkcija proizvoda od strane potencijalnih korisnika proizvoda. *LCA-QFDE-TRIZ* [53] obuhvaća *LCA* analizu proizvoda kako bi se dobio uvid u utjecaje na okoliš. Neprimjereni i vrijednosno značajni utjecaji na okoliš su ulazni podaci u *Kući kvalitete*, te zamjenjuju ulogu zahtjeva korisnika.

Kontradikcije između *LCA* podataka i tehničkih specifikacija prikazuju se *QFDE* matricom. Po uzoru na *LCA-QFDE-TRIZ* [53], Fitzgerald i drugi [61] demonstrirali su primjenjivost *TRIZ* metodologije za predlaganje rješenja matrice kontradikcija.

Podaci o obliku, materijalima, reciklabilnosti i rastavljivosti proizvoda, često su nužni za ocjenjivanje proizvoda prema zahtjevima i tehničkim specifikacijama u ekološki prihvatljivoj inačici *QFD* metode. Puglieri i drugi [49] ustanovili su da takvi podaci i podaci za provedbu *LC*A metode u pravilu nisu dostupni u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda. Zahtjevi korisnika i parametri koji se tiču faze eksploatacije proizvoda [48] su izostavljeni iz ekološki prihvatljivih inačica *QFD* metoda [49].

Zahtjevi ekološke prihvatljivosti u *QFD* metodama su kvalitativni ili kvantitativno opisuju parametre na temelju kojih je moguće usporediti novi proizvod s referentnim. Za donošenje zaključka o ekološkoj prihvatljivosti ili neprihvatljivosti rješenja, potrebno je definirati način vrednovanja prema svim vrstama kriterija - kvalitativnim i kvantitativnim. To otvara odabira metode kojom će se ocjene koncepta prema pojedinim kriterijima agregirati u jedinstvenu ocjenu ekološke prihvatljivosti koncepta. Byggeth i Hochschorner [46] smatraju da bi trebalo koristiti druge sofisticiranije metode kojima bi se omogućila konzistentnost vrednovanja, no ne definiraju koje bi to bile.

*Ecodesign PILOT* [141] je računalom podržani alat koji integrira nekoliko metoda radi dobivanje inicijalne procjena ekološke prihvatljivosti proizvoda. Nakon unosa podataka o proizvodu putem liste kriterija ekološke prihvatljivosti, alat grupira proizvod u jednu od 5 grupa proizvoda prema, po utjecaju na okoliš dominantnoj fazi životnog ciklusa. Shodno pripadajućoj grupi, ponuđene su smjernice i prijedlozi za poboljšanje slike utjecaja na okoliš. Grupe čine proizvodi s najznačajnijim utjecajima u pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda. Analiza proizvoda temeljena je na kvalitativnim, ali i kvantitativnim podacima o proizvodu (komponentama, potrošnji energije tijekom eksploatacije, odlaganju proizvoda, itd.) [141]. Ovim alatom nije moguće razmatranje i usporedba ekološke prihvatljivosti više od jednog koncepta ili proizvoda odjednom, što ga čini nepovoljnim za usporedbu ekološke prihvatljivosti koncepata.

### 2.2.4. Kvantitativne metode

Među ekodizajn metodama i alatima posebno se ističu *LCA* metode koji mogu služiti vrednovanju ekološke prihvatljivosti temeljem utjecaja na okoliš u životnom ciklusu proizvoda, a tijekom rekonstrukcije proizvoda [3], odnosno zaključivanje o tome da li je nova generacija proizvoda ekološki prihvatljivija od prethodne [35].

Istraživanja koja se bave razvojem metodologija za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoja proizvoda mogu se ugrubo podijeliti u dvije skupine. Prva skupina istraživača razvija metodologije kojima se temeljem zajedničkih funkcija i komponenata koncepta i komercijalnog proizvoda može zaključivati o utjecajima na okoliš [25], [35], [52], [197]. Bohm i drugi [25] demonstrirali su kako procijeniti utjecaje na okoliš koncepata proizvoda putem grupiranja koncepata proizvoda u grupe po utjecajima na okoliš sličnih proizvoda, a temeljem zajedničkih funkcionalnih karakteristika i komponenata. Devanathan i drugi razvili su metodu kojom je moguće povezati utjecaje proizvoda na okoliš sa funkcijama proizvoda preslikavanjem preko matrice funkcija i utjecaja na okoliš [50], [52], [198]. Gilchrist [199] je demonstrirao procjenu utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi temeljem digitalno pohranjenih podataka već komercijalnih proizvoda i njihovih *LCA* analiza.

Za *LCA* nužni su stvarni podaci dobiveni mjerenjem potrošnje materijala i energije, na stvarnim lokacijama na kojima se proizvod proizvodi, no korištenjem podataka iz već postojećih baza podataka sa uniformiranim podacima o procesima, moguće je napraviti dovoljno približnu procjenu utjecaja, a uz manje troškova, vremena i ostalih resursa potrebnih za prikupljanje podataka [200]. Procjena se u tom slučaju temelji na funkcionalnim zahtjevima za proizvod, koji su poznati u ranim fazama razvoja. Temeljem povezivanja funkcijskih zahtjeva i tehničkih parametara (kao što su oni zapisani u listi materijala proizvoda) generiraju se ulazni podaci za procjenu životnog ciklusa proizvoda. Podaci o obliku i arhitekturi generiranih rješenja proizvoda mogu biti dostupni iz kataloga i digitalnih baza u kojima su pohranjene generičke funkcije, glavni sklopovi i komponente proizvoda.

Druga skupina istraživača razvija metodologije kojima se procjena utjecaja na okoliš temelji na definiranju grupa proizvoda s karakterističnim utjecajima na okoliš proizvoda u grupi [18], [30], [60], [201], [202], [203].

Kota i Chakrabarti [204] proučavaju mogućnosti korištenja neizrazite logike prilikom procjene životnog ciklusa proizvoda, a radi smanjivanja nesigurnosti prilikom odlučivanja u kvalitativnim ranim fazama razvoja proizvoda.

Zhou i drugi [205] identificirali su potrebu za razvojem metoda za procjenu utjecaja na okoliš u ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, te metoda za izbor materijala uzimajući u obzir tehničke, ekonomske i ekološke značajke materijala. Eddy i drugi [206] također se bave razvojem metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda, tj. vrednovanje ekološke prihvatljivosti materijala za izradu komponenata proizvoda prilikom izbora materijala za proizvodnju. Utjecaji na okoliš uzrokovani izborom materijala smatraju se jednim od najznačajnijih vrsta utjecaja na okoliš, te jednim od najmanje kompliciranih za vrednovanje, a uslijed toga što je pitanje odabira materijala fundamentalno važno za konstruiranje i razvoj proizvoda, te je proučavanje vrednovanja ekološke prihvatljivosti sa aspekta izbora materijala za proizvodnju oduvijek prisutno u istraživanjima [74], [207].

Bohm i drugi [25] dali su doprinos primjeni *LCA* metode u ranim fazama razvoja proizvoda na način da su razvili metodologiju za procjenu utjecaja na okoliš virtualnih koncepata. Utjecaji na okoliš koncepata generiranih tijekom konceptualne faze procjenjuju se na temelju *LCA* podataka sličnih proizvoda pohranjenih u digitalnoj bazi proizvoda *Design Repository - DR* [208]. Procjena utjecaja virtualnih koncepata proizvoda na okoliš omogućena je pretragom baze podataka i pronalasku odgovarajućih (usporedivih) podataka za virtualne koncepte [25]. Podaci o proizvodima pohranjeni su u digitalnoj bazi podataka čime se omogućava sastavljanje inventara životnog ciklusa virtualnih koncepata proizvoda.

*Design Repository - DR* je razvijen na Sveučilištu Oregon s nastojanjem da se pruži potpora inovacijama u ranoj fazi procesa konstruiranja. *Design Repository - DR* sadrži podatke o komponentama proizvoda kao što su dimenzije, masa, materijal, tehnološki proces izrade komponente, funkcija i veza sa drugim komponentama u sklopnoj konfiguraciji proizvoda. Temeljem podataka pohranjenih u *DR-u* omogućeno je generiranje matrice korelacija funkcije-komponente proizvoda [209]. Matrica funkcije-komponente dalje služi za generiranje matrice funkcije-utjecaji na okoliš. Time je omogućeno dodjeljivanje korelacija između funkcija virtualnih koncepata i utjecaja na okoliš. *DR-om* je omogućena pohrana funkcionalnih dekompozicija proizvoda kako bi se koristile prilikom generiranja novih proizvoda. Za *Design*

*Repository* - *DR* korištena je metoda modeliranja funkcija [210] kojom je propisan leksikografski format zapisivanja funkcija u obliku glagol-imenica. Za zapisivanje funkcija proizvoda korištena taksonomija generičkih funkcija (engl. *Functional Basis*) [211]. Ulazni i izlazni tokovi energije, materijala i signala pridružuju se funkcijama koje predstavljaju operacije nad ulaznim tokovima koji se transformiraju u izlazne tokove i efekte čime se opisuju parcijalne zadaće proizvoda [210]. Komponente proizvoda predstavljaju tehničko rješenje za ostvarivanje funkcija, te su podaci o funkcijama i komponentama zapisane u *DR-u.*

Koristeći generički način zapisivanja funkcija proizvoda i taksonomiju funkcija i tokova energije, materijala i signala potrebnih za funkcionalnu dekompoziciju [211], moguće je pohraniti i pretraživati bazu funkcija i komponenata proizvoda, te ju koristiti tijekom razvoja novih koncepata i proizvoda. Detaljnost podataka o proizvodu omogućava analizu proizvoda i ponovnu upotrebu informacija o proizvodu. U *DR* bazi nalaze se poveznice za dokumentima povezanih sa proizvodom, model funkcija, sklopni model i vizualni prikaz komercijalnog proizvoda [212].

Bohm i drugi [213] nastojali su postići kompatibilnost *DR-a* i *CAD* alata, čime su postigli povećanje učinkovitosti *DR* sustava i integriranost sa sustavima računalom podržanih alata za konstruiranje. Prikupljanje i zapisivanje informacija o proizvodu najzahtjevniji je korak razvoja *DR-a,* te kako bi što više i raznovrsnih podataka i proizvoda bilo u bazi *DR-a.* Informacije o proizvodu zapisane u *DR-u* su opis, naziv komponente, ulazni tokovi, funkcije i funkcije, fizikalne značajke i parametri komponenata, podaci o životnom vijeku komponente itd. [213].

Rocco i drugi [214] demonstrirali su aproksimaciju utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi razvojnog procesa koristeći *Design Structure Matrix – DSM* metodu. *DSM* matrice služe za analizu veza između funkcija proizvoda i procijenjenih utjecaja na okoliš, te interakcija između proizvoda i okoliša [214].

Devanathan i drugi [198] koriste matricu funkcija i s njima povezanih utjecaja na okoliš kako bi identificirali funkcije koje najviše pridonose utjecajima proizvoda na okoliš uslijed komponenata i popratnih resursa koji uzrokuju te utjecaje, a radi predlaganja rekonstrukcijskih rješenja za smanjivanje utjecaja na okoliš [52]. U studiji slučaja, Devanathan i drugi [198]

pokazali su da je moguće provesti rekonstrukciju proizvoda bez negativnih utjecaja na funkcionalnost proizvoda. Devanathan i drugi [198] koristili su metodologiju za rane faze procesa razvoja proizvoda naziva *Function Impact Method - FIM*. *FIM* metodologija koristi se za smanjivanje utjecaja proizvoda na okoliš do kojih dolazi u fazi proizvodnje. Korištenjem ove metodologije konstruktori mogu analizirati koji utjecaji na okoliš nastaju uslijed kojih funkcija proizvoda povezujući utjecaje na okoliš s ključnim sklopovima i komponentama proizvoda koji ih uzrokuju.

Ramanujan i drugi [215] u studiji slučaja proučavaju *Function Impact Method - FIM* metodu [50]. Rekonstrukcija proizvoda potpomognuta *FIM* metodom sastoji se od četiri koraka: rastavljanje proizvoda, analiza komponenata proizvoda i njihovih značajki (masa i materijal), izrada liste materijala proizvoda (engl. *Bill of Materials - BOM*), te popisivanje tehnoloških postupaka izrade proizvoda. Ramanujan i drugi [215] zaključili su da je izrada liste materijala ključna za provođenje procjene utjecaja proizvoda na okoliš (*LCA*).

Gilchrist [199] je pokazao da je moguće modelirati reprezentativni inventar podataka za procjenu utjecaja na okoliš koji bi služio generiranju novih koncepata proizvoda. Nizom studija različitih proizvoda prikupljeni su podaci potrebni za procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*), te su pohranjeni u digitalnu bazu podataka *Design Repository - DR* [208]. Značajke proizvoda i njihovih parcijalnih rješenja koja su smatrana inovativnima obilježene su inventaru proizvoda [199]. Naknadnom analizom inovativnih proizvoda i njihovih utjecaja na okoliš, ustanovljeno je da inovativni proizvodi u inventaru proizvoda imaju veći utjecaj na okoliš od proizvoda koji nisu imali značajke inovativnih rješenja. Gilchrist [199] nadalje opisuje da su ti neprimjereno veliki utjecaji na okoliš koncentrirani u samo nekoliko funkcija proizvoda.

Oman i drugi [197] razvili su metodologiju koja služi konstruktorima prilikom generiranja novih koncepata. Radi se o nastavku istraživanja Gilchrist i drugih [35] usmjerenog na otkrivanje korelacija između inovativnih karakteristika proizvoda u pogledu funkcija i komponenata proizvoda, te utjecaja na okoliš. Znanje o ekološki prihvatljivim inovativnim karakteristikama proizvoda koristi se za računalom podržano generiranje inovativnih i ekološki prihvatljivih koncepata.

Lee i Melkanoff [216] predložili su formiranje grupa proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš, a temeljem duljine životnog vijeka proizvoda. Temeljem analize već komercijalnih proizvoda, njihovih karakteristika i ranije provedenih procjena utjecaja na okoliš (*LCA*) proizvoda formiraju se grupe u kojima su proizvodi grupirani prema sličnim karakteristikama [59] i utjecajima na okoliš. Koncepte proizvoda generirane u konceptualnoj fazi temeljem njihovih karakteristika moguće je svrstati pripadajuću grupu proizvoda.

Kako bi se uspjelo svrstati neki novi koncept proizvoda u pripadajuću grupu proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš, razvijene su tzv. familije proizvoda. Proizvode u pojedinoj familiji proizvoda karakteriziraju zajedničke funkcije, komponente ili neke druge značajke. Dahmus i drugi [217], te Alizon i drugi [218] proučavali su načine kako automatizirati taj proces preko generičkih funkcionalnih značajki proizvoda, a Thevenot i Simpson [219] preko značajki tehnološke pripreme proizvoda za masovnu proizvodnju. Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [201] razvili su generičke familije proizvoda prema sličnosti životnih ciklusa proizvoda, te ustanovili ciljane vrijednosti utjecaja na okoliš pojedinih generičkih grupa proizvoda.

Sousa i drugi [62] razvili su metodu kojom se omogućava generiranje modela proizvoda i utjecaja na okoliš namijenjenih za rane faze konstruiranja i koncepte proizvoda, a koristeći metodu modeliranja artificijelnih neuronskih mreža za potporu *LCA* procesu radi stvaranja optimalnog modela proizvoda koji ukazuje na utjecaje proizvoda na okoliš temeljem ranije definiranih grupa proizvoda. Sousa i Wallace [18] razvili su metodu za klasifikaciju optimiziranih modela proizvoda koristeći metode umjetne inteligencije i učenja na temelju ranije definiranih grupa proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš.

Fitch i Cooper [60] analizirali su metodologije za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi i zaključili da nisu jednako primjenjive za originalne, adaptivne i varijantne koncepte proizvoda [72]. Kod originalnih koncepata proizvoda, razlike u funkcijama i radnim principima između novog koncepta i referentnih proizvoda su prevelike za aproksimaciju utjecaja na okoliš temeljem podataka o referentnim proizvodima.

## 2.3. Metode procjene utjecaja na okoliš

Kako bi se donijela najbolja odluka o načinu smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš, potrebno je provesti vrednovanje utjecaja proizvoda na okoliš. Procjenom životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) postiže se kvantificiranje ulaznih i izlaznih tokova energije i materijala povezanih s proizvodom, uslugama ili procesima koji su predmet analize. Kvantificiranje utjecaja na okoliš provodi se za svaku fazu životnog vijeka proizvoda [1]. Odabir mjernih jedinica za kvantifikaciju utjecaja na okoliš ovisi o svrsi provođenja procjene utjecaja na okoliš; radi rekonstrukcije proizvoda, izvještavanja o učincima poduzeća ili certificiranja proizvoda. Primjerice radi se o potrošnji energije pri proizvodnji materijala [220], ugljičnom otisku [134], potrošnji vode i vodenom otisku [221] ili emisijama stakleničkih plinova [222].

Procjena utjecaja na okoliš je preduvjet za identificiranje kritičnih utjecaja na okoliš, traženje rješenja za njihovo otklanjanje ili smanjivanje, te rekonstrukciju proizvoda s ciljem poboljšanja ekološke prihvatljivosti. Odluke o ekološki prihvatljivijim alternativama i rješenjima donose se usporedbom procijenjenih utjecaja na okoliš proizvoda i utjecaja na okoliš referentnih proizvoda [120], [223]. Stupanj poboljšanja moguće je kvantificirati u mjernim jedinicama utjecaja na okoliš [8].

### *2.3.1. Metoda procjene životnog ciklusa (LCA)*

Procjenom životnog ciklusa nastoje se analizirati utjecaji na okoliš do kojih dolazi uslijed procesa koji čine životni ciklus proizvoda. Procjena se provodi sastavljanjem inventara životnog ciklusa kojeg čine emisije, potrošnja materijala i energije, a utjecaji na okoliš se zatim računaju posebnim metodama kojima se kvantitativno procjenjuje učinak ili djelovanje na zdravlje ljudi, okoliš i iskorištavanje resursa [87].

Podaci o procesima temeljem kojih se računaju utjecaji na okoliš sadržani su u licenciranim bazama podataka koji sadrže informacije o generičkim procesima i utjecajima na okoliš. Procesi su specifični za državu, vremenski period tijekom kojeg su prikupljani podaci o procesima, te industriju (farmaceutska, automobilska, ...) [224].

*LCA* je prihvaćena od strane zakonodavnih tijela, znanstvenika i korisnika, te je prepoznata kao temelj za definiranje kvalitete proizvoda i procesa u pogledu njihove ekološke

prihvatljivosti [225]. *LCA* se primjenjuje za razvoj i unapređivanje proizvoda, strategijsko planiranje, odlučivanje u javnom sektoru i oglašavanje proizvoda, razvoj politike zaštite okoliša poduzeća, ekološko označavanje proizvoda, odlučivanje tijekom razvoja proizvoda i za poboljšavanje proizvodnih sustava, marketing, te razvoj vladine politike i regulative po pitanjima zaštite okoliša.

Procjena životnog ciklusa može voditi ka unapređivanju proizvoda. Pogodna je za odlučivanje tijekom razvoja proizvoda ili rekonstrukcije proizvoda [9]. Procjena životnog ciklusa omogućava vrednovanje utjecaja na okoliš i usporedbu utjecaja na okoliš različitih proizvoda, kako bi im se ustanovile prednosti ili nedostaci u pogledu utjecaja na okoliš [226].

Procjena životnog ciklusa može voditi ka unapređivanju proizvoda jer pomaže generiranju informacija koje bi bile temelj za odlučivanje tijekom razvoja novih proizvoda ili rekonstrukcije [9]. Procjena životnog ciklusa omogućava vrednovanje utjecaja na okoliš i usporedbu utjecaja na okoliš varijanata proizvoda [226].

Procjene životnog ciklusa mogu se koristiti u razvojnim i proizvodnim poduzećima ili organizacijama iz javnog ili privatnog sektora. Temeljem rezultata *LCA* moguće je definirati zahtjeve koji se tiču ekološke prihvatljivosti, a mogu poslužiti konstruktorima tijekom razvoja proizvoda kako bi se utvrdili najznačajniji utjecaji, djelovanja i efekti na okoliš do kojih dolazi tijekom životnog ciklusa proizvoda. Menadžmentu poduzeća, rezultati *LCA* mogu biti smjernica za rukovođenje projektima usavršavanja proizvoda i proizvodnje, a s ciljevima smanjivanja potrošnje resursa, rizika istjecanja opasnih tvari u okoliš, smanjivanja otpada i emisija uslijed eksploatacije proizvoda ili tijekom proizvodnje. *LCA* je instrument kojim se može mjeriti ekološka djelotvornost proizvoda tijekom njihovog životnog vijeka ili pomoći u poboljšanju ekološke djelotvornosti. Eksterno, *LCA* se može koristiti za usporedbu karakteristika proizvoda ili razmatranih varijanti proizvoda koje se tiču ekološke prihvatljivosti proizvoda i procesa, tehnoloških postupaka proizvodnje ili u cilju propisivanja i ispunjenja zahtjeva oglašavanja i marketinga. Rezultati *LCA* također se mogu koristiti tijekom definiranja politike zaštite okoliša, javnog zdravlja i programima ekološkog označavanja proizvoda i proizvodnih procesa.

Procjena životnog ciklusa proizvoda zahtjeva da se više pažnje posveti razmatranju funkcija proizvoda. Prilikom analize već komercijalnog (referentnog) proizvoda, naglasak nije isključivo na otkrivanju veze između fizičkih karakteristika proizvoda (kao što su oblik, struktura i komponente proizvoda) i utjecaja na okoliš, nego na otkrivanju potrošnje resursa (energije i materijala) u životnom ciklusu proizvoda.

Procjena životnog ciklusa proizvoda provodi se retroaktivno. Obzirom na već poznati (komercijalni) proizvod i njegove utjecaje na okoliš, moguće je procijeniti utjecaje na okoliš novog proizvoda tijekom konstruiranja i razvoja, te donijeti odluke za poboljšavanje slike utjecaja na okoliš prije proizvodnje. *LCA* se ne može primijeniti tijekom ranih faza razvoja novih proizvoda [53]. Stoga se za tu svrhu primjenjuju pojednostavljene inačice metode koje se kombiniraju s metodama višekriterijskog odlučivanja [227].

Ograničenje *LCA* je što se njome može mjeriti utjecaj tehnologija primijenjenih za proizvodnju i transport proizvoda, ali ne i na isti način procijeniti odabir proizvoda ili usluga temeljen na razmatranju troškova (troškova proizvodnje ili ukupnih troškova životnog ciklusa) ili odabir temeljen na razmatranju ekonomskih pokazatelja uspješnosti proizvoda na tržištu [134].

Opće poteškoće i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda pomoću metoda procjene životnog ciklusa [228] su sljedeće:

*Definiranje ciljeva i opsega studije*

Troškovi *LCA* mogu biti previsoki za mala i srednja poduzeća. Kompleksni proizvodi (proizvodi sa složenim životnim ciklusima i većim brojem funkcija, npr. automobili) zahtijevaju opsežnije analize zbog čega su i vremenski zahtjevnije. *LCA* može zahtijevati više vremena nego li je to predviđeno rokovima procesa razvoja, naročito kod kratkih razvojnih ciklusa.

*Prikupljanje podataka za analizu inventara životnog ciklusa*

Dostupnost podataka i pristup podacima mogu biti ograničavajući (npr. vlasništvo nad podacima). Problemima kvalitete podataka kao što su pristranost, točnost, preciznost i

potpunost ne pristupa se uvijek na najprikladniji način jer je za kvalitetno sastavljanje i analizu inventara životnog ciklusa potrebna visoka razina znanja o *LCA* metodi i alatima.

*Procjena utjecaja na okoliš*

Složeni modeli i parametri metoda za procjenu utjecaja na okoliš nisu u svim slučajevima raspoloživi procjeniteljima. Modele koji se koriste u procjeni životnog ciklusa često je potrebno prilagoditi specifičnostima proizvoda koji je predmet studije. To je zadatak koji zahtijeva visoku razinu znanja o raspoloživim modelima i alatima. Analize neizvjesnosti se rijetko provode jer su vremenski zahtjevne.

*Tumačenje i komunikacija rezultata procjene*

Donositeljima odluka u procesu razvoja proizvoda često nedostaje znanje o vrstama i klasifikaciji utjecaja na okoliš, zbog čega je otežana pravovaljano korištenje rezultata studija u cilju odlučivanja o proizvodu i njegovom životnom ciklusu. Korištenje neodgovarajuće metode grupiranja utjecaja na okoliš u kategorije utjecaja na okoliš mogu iskriviti rezultate procjene. Prikaz rezultata procjene utjecaja na okoliš u jedinstvenoj kategoriji utjecaja na okoliš nije preporučen zbog toga što kategorije utjecaja na zdravlje, eko-sustav i potrošnju resursa nisu međusobno aditivne. Tumačenje rezultata procjene stoga je uobičajeno potpomognuto definiranjem kriterija i temelja usporedbe kategorija utjecaja na okoliš [226].

Analitički i kvantitativni pristup vrednovanju ekološke prihvatljivosti kakav zahtijeva metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) omogućava uvid u utjecaje na okoliš proizvoda tijekom njegovog životnog ciklusa i analizu tog utjecaja. Ograničenja *LCA* metode sa stanovišta neposredne primjene metode u procesu konstruiranja uvjetovane su metodološkim odlikama *LCA* metode [39], [86]. Kako bi se *LCA* primijenila u procesu konstruiranja potrebno je donijeti brojne pretpostavke o procesima, potrošnji energije i materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, tokovima materijala i energije u pojedinim fazama životnog ciklusa, o granici sustava, o kvaliteti podataka u inventaru životnog ciklusa proizvoda, te o kriterijima usporedbe rezultata temeljenih na procjeni utjecaja prema kategorijama utjecaja na okoliš.

Kako bi rezultati procjene životnog ciklusa različitih proizvoda bili usporedivi, potrebno je usporediti proizvode koji ostvaruju istu funkciju. Definiranje funkcionalne jedinice za usporedbu proizvoda u prvom metodološkom koraku *LCA*, preduvjet je za ostvarivanje usporedivosti rezultata procjene životnih ciklusa proizvoda, odnosno alternativa koji se uspoređuju [229]. Tako su Collado-Ruiz i Ostadt-Ahmad-Ghorabi razvili metodu za pomoć pri definiranju funkcionalne jedinice [230]. Cluzel i drugi [231] su pokazali da se odabir funkcionalne jedinice temelji na subjektivnom izboru osobe koja provodi *LCA* studiju proizvoda. U studiji Cluzel i drugih [231], čak 5 od 8 *LCA* stručnjaka koristilo je različite funkcionalne jedinice za isti proizvod.

Procjena životnog ciklusa temelji se na podacima o proizvodu u inventaru životnog ciklusa koji čine samo dio slike ukupnih utjecaja na okoliš. Naime, tijekom definiranja granice sustava i procesa u životnom ciklusu proizvoda često je nemoguće ustanoviti sve utjecaje na okoliš [229]. Odabir relevantnih kategorija utjecaja na okoliš temelji se na procjeni dominantnih utjecaja na okoliš, a te pretpostavke proizlaze iz prijašnjih studija utjecaja na okoliš referentnih proizvoda.

Ograničenja primjene *LCA* tijekom konstruiranja proizvoda također se tiču ograničenja po pitanju detaljnosti i dostupnosti podataka za procjenu. Podaci o proizvodu za koji se provodi procjena životnog ciklusa, podaci o potrošnji materijala i energije, te podaci o životnom ciklusu proizvoda trebaju biti što brojniji, detaljniji i točniji. U praksi, često ne postoje ili nisu dostupni podaci propisane kvalitete. Stoga su u uporabi prosječne vrijednosti ili vrijednosti temeljene na procjenama ili pretpostavkama. Analiza inventara životnog ciklusa provodi se na temelju često nepotpunih baza podataka o procesima, potrošnji materijala i energije, te vrsti otpada. Podaci koji se koriste u *LCA* studijama nalaze se u tablicama kojima su propisani podaci o procesima, potrošnji materijala i energije i utjecajima na okoliš. Rezultati su stoga definirani na osnovu propisanih podataka za određene potencijalne utjecaje i s obzirom na određene specifične analizirane procese, materijale i sirovine, te potrošnju energije koje ovise između ostaloga i o geografskom položaju, tehnologiji i drugim parametrima.

Tijekom razvoja novih proizvoda potrebno je osigurati nekoliko iteracija procjene životnog ciklusa proizvoda. Postoje tri bitna ograničenja po pitanju neposredne primjene procjene životnog ciklusa u ranim fazama procesa konstruiranja [233]:

1.) Nedostupnost podataka o proizvodu i njegovom životnom ciklusu tijekom ranih faza konstruiranja i razvoja proizvoda

Nedostupnost podataka u ranim fazama procesa konstruiranja je uobičajena, te se *LCA* radije provodi nakon konstrukcijske razrade ili po završetku analize već komercijalnog proizvoda.

2.) Rezultati procjene životnog ciklusa podložni su interpretaciji

Za provedbu procjene životnog ciklusa potrebno je donijeti pretpostavke o opsegu studije, a najčešće nije moguće procijeniti kako pretpostavke i utjecaji na okoliš koji nisu uključeni u opseg studije utječu na procijenjene utjecaje na okoliš. Bez pomoći stručnjaka, konstruktori ne mogu procijeniti da li su značajne i u kojem iznosu posljedice odabira granice sustava i faza životnog ciklusa proizvoda. Podrobnija analiza ovih za *LCA* važnih parametara je vremenski prezahtjevna za rane faze konstruiranja.

3.) Nekompatibilnost računalom podržanih alata za procjenu životnog ciklusa, te računalom podržanih sustava (engl. *Product Data Management* – PDM) i alata za razvoj proizvoda (engl. *Computer Aided Design* – CAD)

Proces integracije *LCA* softverskih rješenja i postojećih *PDM* i *CAD* sustava u poduzećima iziskuje dodatne resurse i ulaganja. *LCA* softverska rješenja nedovoljno su kompatibilna s računalom podržanim sustavima i alatima koji se koriste tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [57], [234].

Procjena životnog ciklusa proizvoda provodi se prema standardiziranim smjernicama za procjenu [1]. Trenutno ne postoje smjernice koje bi konstruktorima olakšale primjenu *LCA*, te bile potpora procesu odlučivanja o tome koje procese životnog ciklusa, tokove energije i materijala, te utjecaje na okoliš uključiti prilikom analize, odnosno koje je uputno izostaviti iz analize jer su zanemarivo mali u usporedbi sa ostalima [235]. Također, nema smjernica o tome kako modelirati utjecaje na okoliš koji proizlaze iz procesa poput onih čestih u uslužnom ili

tržišnom sektoru, a koji nisu direktno povezani s proizvodom. Do tih utjecaja na okoliš dolazi zbog potrošnje energije i materijala tijekom procesa koji se mogu dovesti u vezu i pridijeliti pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda kao što su proizvodnja materijala za izradu proizvoda i transport sirovina, distribucija proizvoda ili usluge servisa, popravaka i održavanja proizvoda tijekom korisnog vijeka proizvoda [235].

Utjecaji na okoliš do kojih dolazi uslijed potrošnje energije i materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, a koji su zanemareni tijekom analize ekološke prihvatljivosti proizvoda zbog nedostupnosti podataka, razmatrani pojedinačno mogu rezultirati malim odstupanjima u rezultatima procjene životnog vijeka. No, kumulativno, takvi utjecaji na okoliš mogu značajno utjecati na konačne rezultate procjene ekološke prihvatljivosti proizvoda. Nadalje, analiza mogućih utjecaja na zdravlje ljudi i utjecaja na kvalitetu eko-sustava zahtjeva dodatne studije utjecaja na okoliš [224] jer se uobičajeno radi o utjecajima na okoliš specifičnim za pojedini proizvod, poduzeće i specifičnosti razvojnog procesa.

### *2.3.2. Procjena potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda*

Ness i drugi [236] podijelili su pristupe i alate za računanje održivosti u tri kategorije prema tome razmatra li se održivost (ekološka prihvatljivost) proizvoda i procesa retroaktivno (pokazatelji ili indikatori), u realnom vremenu tijekom razvoja proizvoda (integrirani) ili se vrednovanje i usporedba proizvoda ili procesa odvija u realnom vremenu tijekom razvoja uz predviđanje pokazatelja održivosti novih razvojnih projekata.

Za poduzeća je izvještavanje o okolišu obavezno, a ono obuhvaća izvještavanje o ključnim pokazateljima promjene kvalitete okoliša do kojeg dolazi uslijed životnog ciklusa proizvoda i procesa. Pokazatelji (indikatori) u praćenju promjena u okolišu služe za praćenje kvalitete okoliša i ostvarivanje ciljeva poduzeća. Nadalje, služe za praćenje socio-ekonomskih i okolišnih trendova tijekom procesa razvoja proizvoda u pogledu održivosti procesa [237].

Pokazatelji su sastavni dio normi za izvještavanje o utjecaju na okoliš, te su određeni za sljedeća područja okoliša: energetska djelotvornost (efikasnost), djelotvorna uporaba materijala i resursa, otpad, emisije, biološka raznolikost i uporaba zemljišta [134]. Pokazatelji su temeljeni na nekim od brojnih kriterija kvalitete procesa, te se koriste pri vrednovanju održivosti i ekološke prihvatljivosti proizvoda i procesa retroaktivno (obzirom na prijašnje proizvode i

procese) ili su dio integriranih metoda za praćenje i procjenu održivosti i ekološke prihvatljivosti u realnom vremenu tijekom razvojnog procesa. Pokazatelji služe za prikaz djelovanja između industrijskih i ekoloških sustava na lokalnim, regionalnim ili globalnim razinama sustava. Detaljniji pregled pokazatelja (indikatora) održivosti može se naći u radu Kates i drugih [238].

*Material Flow Analysis* (*MFA*) [239] koristi se za analizu direktnih ili indirektnih tokova materijala u sustavu definiranim granicom sustava. Iako *neto* količina materijala nije nužno najpogodniji pokazatelj ukupnih utjecaja na okoliš, analiza indirektnih ili neiskorištenih tokova materijala može ukazivati na rizike po okoliš.

Analiza tokova energije i potrošnje energije razmatranog sustava provodi se za referentni granicom odijeljeni sustav ili ekonomiju, a radi identifikacije indirektnih ili energetski nedjelotvornih tokova energije. Procjena energetske efikasnosti sustava temelji se na prvom zakonu termodinamike o neuništivosti energije i nepromjenjivosti količine *neto* energije, te pretvorbama energije iz jednog oblika u drugi [240]. Analizu energije i energetske djelotvornosti pretvorbi energije moguće je računati preko *eksergije* [241], [242] ili *emergije* [243]. Metodama kojima se računa eksergija ili emergija sustava uzimaju se u obzir kvaliteta i kvantiteta energijskih tokova (*neto* količina, odnosno potrošnja energije) [244], [245], [246].

Eksergija sustava definirana je kao najveći mehanički rad koji sustav može proizvesti [241], [247]. Analiza eksergije sustava služi procjeni efektivnosti potrošnje resursa, te daje pregled kritičnih mjesta gdje postoje energetski gubici kako bi se omogućilo poboljšavanje energetske djelotvornosti sustava. Analiza eksergije sustava koristi se za analizu energetske djelotvornosti sustava, kao što su sustavi grijanja ili sustavi za proizvodnju električne energije [248], [249].

Odum [243] je razvio metodologiju za analizu emergije sustava gdje su resursi i materijalna dobra (njihovi tokovi, pretvorbe i potrošnja) izraženi u jedinicama sunčeve (solarne) energije i količini sunčeve energije potrebne za njihovu proizvodnju [250]. Metode procjene eksergije i emergije sustava podrazumijevaju analizu životnog ciklusa. Emergija se primjerice koristi za analizu energetske efikasnosti tehnoloških procesa proizvodnje [240], a eksergija za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš [251], [252], [253].

Eksergija i emergija su mjerne jedinice kojima je moguće izraziti termodinamičke značajke utjecaja na okoliš, a u literaturi postoji nekoliko slučaja da su se pokušale primijeniti za procjenu utjecaja na okoliš tijekom razvoja proizvoda, npr. [252], [253], [254]. Kao i u slučaju procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA* metode) i ovdje postoje ograničenja u primjeni ovih metoda u ranim fazama konstruiranja i razvoja. Naime, za njihovu primjenu potrebno je imati podatke o životnom ciklusu proizvoda.

## 2.4. Rasprava pregleda literature područja istraživanja

Kompleksnost zadataka, dostupnost i kvaliteta resursa za razvoj (primjerice informacija o proizvodu, proizvodima konkurencije ili prijašnjim proizvodima iz portfelja poduzeća) utječu na proces razvoja. Plan, troškovi i kvaliteta proizvoda definiraju se temeljem procjene trajanja i vrste aktivnosti potrebnih za daljnji nastavak procesa konstruiranja, a pogotovo je važno znati trajanje aktivnosti poput izmjena, razrade i rekonstrukcije proizvoda [255]. Izmjena faza konstruiranja i uspješno odvijanje procesa konstruiranja podrazumijevaju da je donesena odluka o rješenju proizvoda koje je odabrano za daljnji razvoj i razradu, te da su završeni i pozitivno vrednovani svi zadaci iz prethodnih faza procesa konstruiranja [256].

Pravovremena odluka o konceptu omogućava da se pristupi konstrukcijskoj razradi i poštuje rok isporuke proizvoda [23]. O nekim komponentama, značajkama i parametrima proizvoda mora se odlučiti i prije samog isplaniranog službenog vremena odluke, npr. u slučaju kratkih rokova isporuke, a duljeg vremena potrebnog za oblikovanje i razvoj [23]. Trajanje aktivnosti konstrukcijske razrade određuje se prema procijenjenom vremenu koje je potrebno za najkompleksnije zadatke, razradu sklopova i komponenata proizvoda s najviše zahtjeva ili najkraćem roku isporuke.

Ekološku prihvatljivost proizvoda tijekom procesa njegovog razvoja, prema trenutačnim saznanjima moguće je procijeniti sa zadovoljavajućom točnošću tek nakon odlučujućih ranih faza razvoja. U pravilu, tehničke sustave je potrebno vrednovati kvalitativno, kvantitativno i s obzirom na procijenjene troškove [72]. U ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, vrednovanje ekološke prihvatljivosti najčešće je kvalitativno uslijed toga što u ranim fazama razvoja uobičajeno nedostaju podaci potrebni za provođenje procjene životnog ciklusa

proizvoda (*LCA*) [1]. Troškovi razvoja generirani u konceptualnoj fazi, manji su nego u kasnijim fazama procesa konstruiranja, ali odluke po završetku koncipiranja proizvoda imaju presudni utjecaj na izgled, funkcionalnost, kvalitetu i troškove. U konceptualnoj fazi teži se generiranju što više koncepata kako se ne bi previdjela najbolja rješenja, no isto tako je potrebno dovoljno rano procijeniti najnepovoljnija koncepcijska rješenja kako se dragocjeno vrijeme i resursi ne bi trošili na razvoj ekološki neprihvatljivih koncepata.

U ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, kada se razmatra široki spektar različitih rješenja, postoji i veći potencijal za razvojem ekološki prihvatljivih rješenja, nego u poodmaklim fazama tijekom konstrukcijske razrade. Stoga se može zaključiti da su prednosti vrednovanje ekološke prihvatljivosti puno izraženije u ranim fazama konstruiranja i razvoja, nego u onim kasnijim, barem po pitanjima razmatranja koncepcijskih rješenja, a prilikom razmatranja funkcionalnih značajki i radnih principa proizvoda.

Nedostatak informacija o značajkama proizvoda koje su uobičajeno definirane tek tijekom konstrukcijske razrade utječe na to da je vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi uglavnom kvalitativno. U poodmaklim fazama procesa konstruiranja i razvoja proizvoda (tijekom konstrukcijske razrade i pripreme za proizvodnju), vrednovanje ekološke prihvatljivosti može biti temeljeno na kvantifikaciji utjecaja proizvoda na okoliš, koja se smatra pouzdanijim načinom vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda. No, potencijal za uvođenje ekološki prihvatljivih rješenja i alternativa je manji u poodmaklim fazama razvoja jer je otprilike do 70% utjecaja na okoliš već predodređeno izborom koncepcijskog rješenja proizvoda [30]. U kasnijim fazama konstruiranja, značajne promjene na rješenju proizvoda u vidu promjena funkcija ili radnih principa proizvoda i ostale neplanirane izmjene na proizvodu, modelu proizvoda i ključnim značajkama, popraćene su dodatnim troškovima razvoja i neplaniranim produljenjem procesa razvoja proizvoda, što može rezultirati fatalnim posljedicama po poduzeće [257].

Odluke donesene u ranim fazama razvoja proizvoda imaju značajni utjecaj na ekološku prihvatljivost proizvoda. Razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda u pravilu uključuje razmatranje proizvoda u svim fazama njegovog životnog ciklusa, a bitne značajke proizvoda pritom su značajke oblika i strukture proizvoda, sirovine, materijali i tehnološki postupci proizvodnje. Razmatranje transporta (materijala, komponenata i distribucija proizvoda), te

značajki proizvoda koje determiniraju utjecaje na kraju životnog ciklusa proizvoda zahtijevaju razmatranje logistike i upravljanja životnim ciklusom proizvoda. Iako je metodologija procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA)* najviše primijenjena upravo za potrebe razmatranja ekološke prihvatljivosti i održivosti proizvoda (jer je njome moguće objektivno i kvantitativno opisati utjecaje proizvoda na okoliš), procjena utjecaja na okoliš uslijed životnog ciklusa proizvoda je zahtjevna za primjenu u svrhu odlučivanja tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda, pogotovo za razvoj novih proizvoda.

Utjecaji proizvoda na okoliš u konačnici se provjeravaju s obzirom na funkcionalne i ostale zahtjeve u kasnijim fazama konstruiranja. Procjena životnog ciklusa (*LCA*) namijenjena je za provjeru da li proizvod ispunjava zahtjeve ekološke prihvatljivosti [103] tijekom i nakon provedene rekonstrukcije proizvoda. Procjena utjecaja na okoliš nije namijenjena za potporu odlučivanju u ranim fazama procesa konstruiranja i razvoja proizvoda [30].

Primjena kvantitativnih metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti ipak je u fazi detaljiranja i konstrukcijske razrade proizvoda, jer su tada zadovoljeni svi zahtjevi za podacima o proizvodu potrebni za provođenje metoda za procjenu utjecaja proizvoda za okoliš (ili se mogu aproksimirati sa zadovoljavajućom točnošću).

Promjene na rješenju proizvoda u fazi konstrukcijske razrade, ograničene su u pogledu smanjivanja utjecaja na okoliš. U pravilu, značajnije promjene kao što je promjena koncepta u fazi konstrukcijske razrade nisu uobičajene. Promjene u fazi detaljiranja uglavnom se tiču redefiniranja oblika, strukture, detalja i također proizvodnih postupaka i izmjena materijala za izradu komponenata proizvoda. Definiranje životnog ciklusa proizvoda u konceptualnoj fazi zahtjeva donošenje pretpostavki o budućem životnom ciklusu proizvoda [258], te može produljiti proces konstruiranja uslijed primjerice izbora ekološki prihvatljivih materijala komponenata. Kriteriji za izbor ekološki prihvatljivih materijala, odnosno vrednovanje ekološke prihvatljivosti materijala propisuju detaljno razmatranje potencijalno prihvatljivih karakteristika materijala i proizvodnih postupaka, što otežava proces donošenja odluka [74].

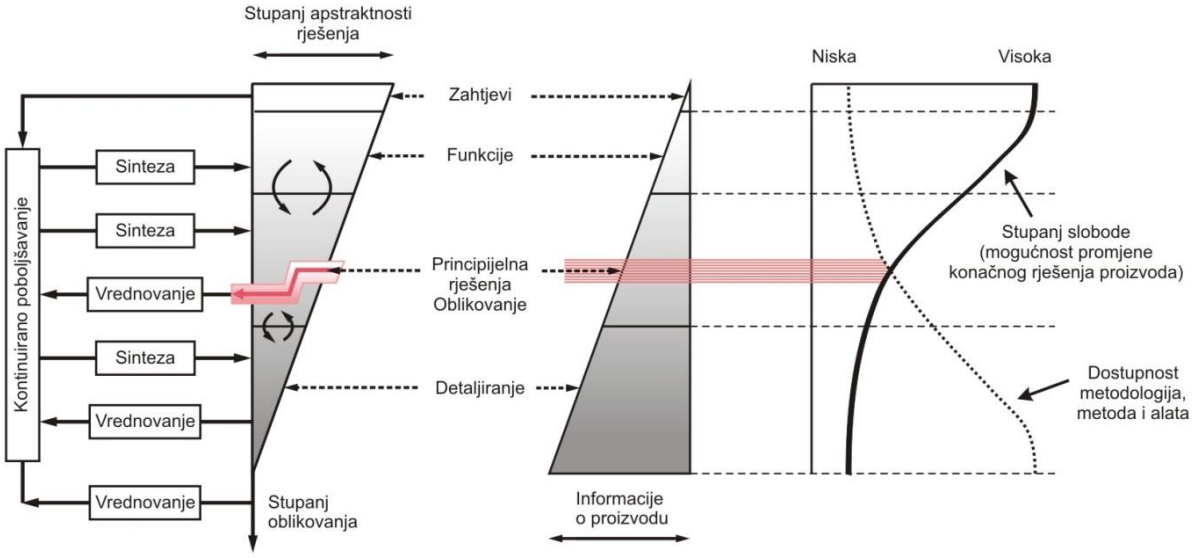
Detalji o proizvodu i njegovom životnom ciklusu koji su nužni ulazni podaci za *LCA* metodu, poznati su tek nakon konstrukcijske razrade, nakon čega se može zaključivati o

značajkama ekološke prihvatljivosti proizvoda i posredno koncepcijskog rješenja proizvoda koji su važni za utjecaje proizvoda na okoliš [259].

Popisi poželjnih karakteristika proizvoda koji se koriste pri dodjeljivanju oznake ekološke prihvatljivosti proizvodima nisu dostatna potpora vrednovanju i odlučivanju tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda jer se udovoljavanje tim zahtjevima ne može provjeriti bez provođenja dodatnih analiza utjecaja na okoliš [260].

Pregledom postojećih istraživanja na temu metoda za vrednovanja ranih rješenja proizvoda, ustanovljeno je da ne postoje formalne metode za vrednovanje na svakom nivou apstrakcije koncepcijskog rješenja proizvoda, te da se ocjenjivanje koncepata uglavnom provodi na temelju zahtjeva koji su u najvećem broju funkcionalni zahtjevi (određuju funkcionalnost proizvoda), te s druge strane ostalih zahtjeva od strane proizvođača, poduzeća ili korisnika proizvoda (koji proizlaze iz potreba korisnika). Bhander i drugi [3] definirali su generički model za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda koristeći Andreasen i Heinov prikaz razina razrade rješenja proizvoda [44].

Koncepti proizvoda također su pored funkcija, određeni fizičkim rješenjima nositelja funkcija (komponentama proizvoda) [112]. Modularno oblikovanje proizvoda, odnosno moduli proizvoda proizlaze iz definicije organa i strukturalnog prikaza organa proizvoda. Prema tome, moduli proizvoda i konfiguracija proizvoda proizlaze i analogni su strukturi organa proizvoda. Prema Sakao i Fargnoli [32], vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi se tek nakon odluke o strukturi proizvoda, no pritom ne definiraju koje su informacije o proizvodu nužne da bi se vrednovanje provelo.




Slika 2-9. Stupanj razrade rješenja i informacije o ekološkoj prihvatljivosti tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [144]

Tablica 2-7. Generički zahtjevi za vrednovanje proizvoda u modelu za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda [3]

| Zahtjevi za informacijama za vrednovanje rješenja proizvoda i generiranje koncepata [3] | Razine razrade rješenja proizvoda [44] |
|---|---|
| Zahtjevi korisnika, zahtjevi dionika | Problem |
| Funkcionalni zahtjevi | Tehnički proces |
| | Funkcije |
| | Principi |
| | Organi |
| Struktura proizvoda (temeljem značajki modula i sklopova), materijali, oblici, značajke komponenata, ergonomski zahtjevi | Struktura |
| | Oblik |
| | Materijali |
| Geometrijske značajke, kvaliteta površina i tolerancije | Dimenzije |
| | Kvaliteta površina |
| Zahtjevi za proizvodnju, isporuku, zahtjevi dobavljača | Detalji |

Prilikom usporedbe koje su informacije o proizvodu potrebne za vrednovanje ekološke prihvatljivosti (Slika 2-9) i kakva je dostupnost tih informacija (Slika 1-1, Tablica 2-7) donijeti su zaključci o nekonzistentnosti između tradicionalnog i ekodizajn pristupa konstruiranju.

Nedostatak informacija u ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda motiviralo je razvoj metoda kojima bi se omogućila procjena utjecaja na okoliš temeljem podataka dostupnih prilikom koncipiranja proizvoda [18], [261]. Za *LCA*, potrebno je imati *CAD* model proizvoda i listu materijala komponenata proizvoda, a u konceptualnoj fazi razvoj još nije došao do te točke [38]. U tom slučaju, alternativa je izabrati slični, već komercijalni proizvod za usporedbu i provesti razradu koncepcijskog rješenja koja uključuje donošenje pretpostavki o materijalima, komponentama i tehnološkim postupcima proizvodnje. To je dodatan teret za provođenje *LCA*, uz već postojeće teškoće poput nedostatka podataka, vremena potrebnog za modeliranje, (tehničke) nesigurnosti, kompleksnosti metode i drugih [18], [262]. Zatim, Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [263] pokazali su da detaljne informacije o utjecajima na okoliš koje pruža *LCA* može otežati proces poboljšavanja rješenja. Naime, se konstruktori se prilikom poboljšavanja rješenja u tom slučaju usredotočuju na smanjivanje utjecaja i rekonstrukciju proizvoda, a ne razvoj novih, kreativnih i inovativnih rješenja. Ovaj efekt poznat je pod nazivom fiksacija ([264], [265]) i negativno utječe na sposobnost konstruktora da se usredotoče na razvoj novih koncepata.

Metode i alati koji su predmet analize u ovom istraživanju, a služe kvantifikaciji utjecaja proizvoda na okoliš tijekom konceptualne faze, nisu primjenjivi prije no što su definirani koncept proizvoda, funkcije, struktura proizvoda i materijali za izradu komponenata [35]. Knight i Jenkins [139] smatraju da je glavna zamjerka ekodizajn metodama i alatima namijenjenim konceptualnoj fazi što je za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u pravilu potrebno razmotriti više desetaka različitih aspekata proizvoda i njegovih značajki, a dati jedinstvenu konačnu ocjenu ekološke prihvatljivosti razmatranog koncepta. U literaturi se nedostaci ekodizajn metoda i alata objašnjavaju time da nisu usmjereni na pružanje potpore za oblikovanje i konstruiranje, već planiranje strategija razvoja i retrospektivnu analizu postojećih proizvoda i rješenja [266].

Ako se pretpostavi da koncepti i alternative proizvoda imaju jednaku formu i funkcije, utjecaji na okoliš tijekom eksploatacije svode se na male razlike u potrošnji energije uslijed

razlika u masi, inerciji, toplinskoj vodljivosti itd., i istrošenosti dijelova proizvoda tijekom određenog perioda korištenja [62]. Značaj razlika u tom slučaju ovisio bi o specifičnom problemu i svrsi proizvoda, dok bi se utjecaji na okoliš u preostalim fazama životnog ciklusa (osim eksploatacije) mogli svesti na poopćene modele koje opisuju utjecaje na okoliš [206]. Za aproksimaciju utjecaja na okoliš novih originalnih koncepata, uobičajeno nedostaju odgovarajući referentni proizvodi za usporedbu [60], [103].

Prikupljanje podataka o proizvodu i njegovom životnom vijeku zahtjevno je i problematično, pogotovo za potrebe računanja utjecaja proizvoda na okoliš [267]. Procjena utjecaja na okoliš omogućena je tek nakon dodjeljivanja materijala komponenata i definiranja oblika komponenata, tj. proizvoda. *LCA* se uobičajeno provodi radi poboljšanja utjecaja poznatog postojećeg proizvoda (rekonstrukciji) [233].

Također, provođenje procjene životnog ciklusa može zahtijevati dodatne troškove i cijeli postupak može biti vremenski zahtjevan, što je ostvarivo za velika poduzeća, no ne i mala i srednja poduzeća. Literatura bilježi nastojanja da se ova ograničenja provođenja *LCA* zaobiđu, pa su razvijene metodologije koje opisuju procedure za provođenje jednostavnijeg oblika *LCA* (engl. *Streamlined LCA – SLCA)* za dobivanje okvirnih rezultata *LCA* (engl. *screening*) [268]. Te metode ignoriraju utjecaje na okoliš uslijed pojedinih faza životnog vijeka (uslijed nedostupnosti podataka ili inicijalnih pretpostavki o manjoj važnosti tih utjecaja za proces razvoja proizvoda), zatim ignoriraju određene tokove energije i materijala u analiziranom životnom ciklusu ili proizvodnji, te utjecaje na okoliš ili kategorije utjecaja na okoliš.

Najnovijim pristupima rješavanju problema implementacije *LCA* u ranim fazama razvoja proizvoda glavno ograničenje je nesigurnost pri definiranju oblikovanja proizvoda za koji se provodi *LCA* (oblika, komponenti i interakcije utjecaja komponenti, glavnih sklopova sustava itd.). Do koje razine se može garantirati pouzdanost procjene utjecaja obzirom na nepoznanice oko oblikovanja proizvoda, koje nužno moraju biti donesene za *LCA*, ostaje uglavnom nepoznanica.

Još jedno ograničenje koje se povezuje s provođenjem *LCA* u ranim fazama konstruiranja je u tome što *LCA* nije orijentirana na razmatranje značajki proizvoda koje su u središtu razvojnog procesa, i tek su otkrivene i definirane tijekom tog procesa, *LCA* se

primjenjuje za analizu strukture proizvoda i komponenti proizvoda, ne troškova ili troškova u pogledu okoliša koji nastaju uslijed definiranja funkcija koje se definiraju temeljem zahtjeva korisnika i tehnologijama koje su definirane u razvojnom procesu kojima se ostvaruje funkcionalnost proizvoda. Posebne metode su potrebne kako bi se povezali utjecaji na okoliš sa funkcijama koje proizvod ostvaruje, što omogućava procjenu ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda određenih značajkama oblika i forme (preliminarnih oblikovnih rješenja proizvoda) [52].

Dewulf [159] je pokazao kako *LCA* može služiti kao alat kojim se generiraju podaci o proizvodu koji su potrebni za druge jednostavnije ekodizajn metode (primjena *LiDS-Wheel* metode [147] u radu Bernstein i drugih [50]), no mora se temeljiti na analizi poznatog proizvoda. U svakom slučaju, *LCA* nije prilagođena za korištenje prilikom razvoja u potpunosti novih proizvoda [262]. Za provedbu *LCA* potreban je multidisciplinaran tim stručnjaka [99].

*LCA* pruža adekvatnu potporu procjene utjecaja proizvoda na okoliš, no metoda kao takva nije pogodna za primjenu u ranim fazama konstruiranja [206]. Kako bi se pokrio širok spektar rješenja koje je moguće generirati u kreativnim ranim fazama konstruiranja, provedba *LCA* bi zahtijevala provedbu *LCA* za svaki koncept, koji najčešće imaju sasvim drukčiji životni ciklus. Kao posljedica toga, koncepti su teško usporedivi, odnosno pravovaljana ocjena ekološke prihvatljivosti zahtijeva dodatne resurse u pogledu vremena za modeliranje i prikupljanje podataka, te dodatne troškove. Alternative *LCA* su razvijene za rješavanje tog problema, za potrebe izbora koncepta proizvoda.

Materijali za izradu komponenata obično su opisani velikim brojem diskretnih podataka o značajkama materijala u pogledu toplinske vodljivosti, mase i ekološke prihvatljivosti materijala. Zbog toga je stvaranje modela kojima bi se opisao koncept proizvoda na temelju kojeg se provodi *LCA* je izazov i prednosti razvoja metoda i modela za aproksimaciju optimalnog koncepta očituju se u ranim fazama konstruiranja, posebno konceptualnoj fazi.

# 3. KVALITATIVNO VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI

*Ovo poglavlje doktorskog rada donosi pregled kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti koje svoju primjenu mogu naći u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Opisana je studija slučaja u kojoj su ispitanici rangirali koncepcijska rješenja prema ekološkoj prihvatljivosti. Obrazložena je motivacija koja je istraživanje usmjerila prema razvoju kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu procesa konstruiranja.*

## 3.1. Preliminarna analiza

Mnogim, u ovom istraživanju prikazanim kriterijima vrednovanja ekološke prihvatljivosti razmatraju se značajke proizvoda koje nisu dostupne u konceptualnoj fazi konstruiranja. Primjerice, informacije o proizvodu potrebne za kvalitativnu analizu *Ecodesign PILOT* metodom [141] su:

- Ukupna masa proizvoda uključujući pakiranje,
- Dimenzije proizvoda,
- Procjena životnog ciklusa komponenata i dijelova proizvoda,

- Maksimalni korisni životni vijek proizvoda, i
- Osnovne odlike funkcionalnosti proizvoda (kvalitativan, opisni prikaz funkcija i kvalitete zadovoljenja korisničkih potreba).

Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti su opće prihvaćeniniti, te su najčešće smjernice za oblikovanje [122] kao što su: a) što manja potrošnja materijala, b) što manja potrošnja energije, c) izbjegavati uporabu toksičnih i opasnih materijala i postupaka, d) što manja potrošnja resursa i što veća bio-kompatibilnost, e) optimizacija životnog ciklusa proizvoda i komponenata proizvoda, f) dulji životni vijek materijala i g) konstruiranje za rastavljivost.

Potencijalni problem kvalitativnog vrednovanja i usporedbe ekološke prihvatljivosti koncepcijskih varijanti proizvoda je što vrednovanje može ukazivati da su razmatrana rješenja prilično slična u pogledu ekološke prihvatljivosti. Kod kvalitativnih pristupa vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti, lakše je ustanoviti razliku među rješenjima, no prilikom vrednovanja nedostaje kvantitativna dimenzija u odlučivanju koja bi ukazivala na magnitudu tih razlika.

Problem provođenja isključivo kvalitativnih analiza ekološke prihvatljivosti pojavljuje se kod usporedbi utjecaja na okoliš u pojedinim fazama životnog ciklusa [123]. Nedostatak kvantitativne komponente kod kvalitativnih metoda procjene utjecaja na okoliš ograničavaju učinkovitost tih metoda [183]. Vrijedi i obrnuto, kvalitativne smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti nužne su i za kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti. To možemo primijetiti primjerice kod usporedbe električnih proizvoda (proizvodi koji koriste električnu energiju u fazi eksploatacije) i proizvoda kod kojih nema potrošnje električne energije u fazi eksploatacije, ali ima u ostalim fazama životnog ciklusa.

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljem rezultata procjene životnog ciklusa zahtjevno je za konstruktore jer utjecaji na okoliš ovise o posljedicama specifičnih *stresora*, a ne direktno uslijed potrošnje materijala, energije ili procesa koji do njih dovode. Primjerice, atmosferski utjecaj jednog kilograma ugljikovog dioksida jednako se vrednuje bez obzira da li se radi o rezultatu procjene životnog ciklusa kućnog rashladnog uređaja ili televizora [269]. Kako bi riješili ovaj problem, DeVierno i drugi [270] razvili su metodu kojom je moguće

ustanoviti relaciju između značajki proizvoda i utjecaja na okoliš. Za provedbu metode potrebno je prethodno procijeniti utjecaje na okoliš proizvoda primjerice *LCA* metodom. Na primjeru mobitela zaključili su da volumen mobitela ima najznačajniji utjecaj na magnitudu utjecaja na okoliš u fazi odlaganja.

Zapaniotis i Dentsoras [98] zaključili su da vrednovanje koncepta temeljem njegovih značajki znači traženje veza između atributa (karakteristika) proizvoda i podataka o konceptu koji nisu nužno transparentni, jednoznačni ili očiti iz definicije samog koncepta. Stoga vrednovanje koncepata nije proces koji je temeljen na znanstveno utemeljenim ili empirijski dokazivim činjenicama o konceptu, nego često ovisi o subjektivnom doživljaju i procjenama vrednovatelja. Znajući to, i uzimajući u obzir nedostatak podataka o proizvodu u ranim fazama konstruiranja i značajkama važnim za otkrivanje utjecaja proizvoda na okoliš, rizik uslijed izbora ekološki nepovoljnog koncepta je velik.

U nastavku opisana studija provedena je s ciljem propitivanja učinkovitosti ekodizajn metoda kojima se propisuju kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti, a služe vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [63], [81].

## 3.2. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata provode konstruktori individualno ili u grupi, multidisciplinarni tim u kojem su konstruktori i stručnjaci ili vrednovanje provode stručnjaci koji istovremeno ne sudjeluju u donošenju odluke o ekološki najprihvatljivijem konceptu [271]. Obzirom na brojna ograničenja primjene metoda za kvantificiranje utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda, a radi analize ekodizajn metoda i alata za kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti, provedena je analiza predloženih metoda vrednovanja odabranog proizvoda [81]. Analizom slučaja ustanovljena su temeljna obilježja jediničnog sustava [79], temeljem kojih su definirani ciljevi provedenog istraživanja.

Obzirom na relativno manji broj ekodizajn metoda i alata namijenjenih za ranije, nego za kasnije faze konstruiranja i razvoja proizvoda, Dewulf [159] je predložio da se metode i alati koji su prvotno namijenjeni za poboljšavanje i unapređivanje ideja ili proizvoda prenamijene za konceptualnu fazu. Ako bi se razvile procedure koje omogućavaju vrednovanje ekološke

prihvatljivosti pomoću kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti (propisanih primjerice ekodizajn smjernicama za oblikovanje), omogućilo bi se semi-kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi [159]. Tako bi se kvalitativni kriteriji Ekodizajn smjernica, kvalitativni i semi-kvantitativni kriteriji ekodizajn metoda i alata (0), mogli prenamijeniti i koristiti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti. Nova metoda vrednovanja bila bi semi-kvantitativna.

Provedena je analiza ekodizajn smjernica i ekodizajn metoda i alata (0) radi odabira kriterija ekološke prihvatljivosti koji će biti ispitani studijom slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. U provedenoj studiji slučaja propituje se uporabljivost ekodizajn smjernica kao kvalitativnih kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Tablica 3-1. Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani ekodizajn smjernicama i semi-kvantitativnim ekodizajn metodama i alatima

<table>
<tr><th>Metode i alati s do 6 kriterija</th><th>Metode i alati s više od 6 kriterija</th></tr>
<tr><td>Dominance Matrix [168]:<br>Alatom nisu propisani kriteriji ekološke prihvatljivosti.</td><td rowspan="2">LiDS-Wheel [147]:<br>1. Razvoj novog koncepta proizvoda, 2. Udio materijala s niskim utjecajima na okoliš, 3. Potrošnja materijala, 4. Ekološka prihvatljivost tehnoloških postupaka proizvodnje i potencijal za smanjivanjem utjecaja u fazi proizvodnje, 5. Optimizacija distribucije proizvoda, 6. Smanjena potrošnja tijekom eksploatacije, 7. Optimizacija faze proizvodnje i nabave sirovina, 8. Optimizacija završne faze životnog vijeka.</td></tr>
<tr><td>ERPA matrix [20]:<br>1. Izbor materijala, 2. Potrošnja energije, 3. Otpad (kruto stanje), 4. Otpad (tekuće stanje), 5. Otpad (plinovito stanje).</td></tr>
<tr><td>Philips Fast Five Awareness [177]:<br>1. Potrošnja energije, 2. Reciklabilnost, 3. Toksični i opasni otpad, 4. Životni vijek, održavanje i visoka vrijednost proizvoda tijekom cijelog životnog vijeka, 5. Alternativni načini na koji je ponuđena usluga uz proizvod.</td><td>Econcept Spiderweb [3], [168]:<br>1. Efikasnost potrošnje resursa (materijala i energije), 2. Kvaliteta zadovoljenja korisničkih potreba, 3. Održivost korištenja obnovljivih resursa, 4. Izbjegavanje opasnog i toksičnog otpada i emisija, 5. Reciklabilnost, 6. Učinkovitost obzirom na troškove, 7. Izgled proizvoda, 8. Dulji životni vijek.</td></tr>
<tr><td>Design for Environment guidelines [170]<br>1. Održivost potrošnje resursa, 2. Mali rizik po zdravlje ljudi i iskorištavanje prirodnih resursa, 3. Minimalna upotreba resursa u proizvodnji i transportu, 4. Efikasnost potrošnje resursa tijekom eksploatacije, 5. Primjerena trajnost (životni vijek) proizvoda i njegovih komponenti, 6. Proizvod konstruiran za lako rastavljanje, recikliranje i održavanje.</td><td>Eco-products tool [178]:<br>1. Smanjena potrošnja resursa, 2. Dulji životni vijek proizvoda, 3. Recikliranje resursa, 4. Rastavljivost, 5. Jednostavna proizvodnja, 6. Proizvod siguran za okoliš i ljude u pogledu emisija i toksičnosti, 7. Energetska učinkovitost, mala potrošnja energije, 8. Transparentnost informacija o potrošnji resursa i energije.</td></tr>
<tr><td>Eco-compass [187]:<br>1. Rizik na zdravlje ljudi i kvalitetu okoliša tijekom životnog ciklusa proizvoda, 2. Očuvanje resursa (energije i materijala) tijekom životnog ciklusa, 3. Potrošnja energije tijekom životnog ciklusa proizvoda, 4. Potrošnja materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, 5. Potencijal da se proizvod prenamijeni za dodatni (drugi) životni ciklus i recikliranje, 6. Produljenje životnog vijeka potpomognuto uslugama povezanim s proizvodom.</td><td rowspan="2">Ten Golden Rules [123]:<br>1. Izbjegavati korištenje toksičnih materijala te u slučaju ako nije moguće izbjeći korištenje toksičnih materijala projektirati primjereni životni ciklus s zatvorenim ciklusom kruženja toksičnih materijala, 2. Minimizirati potrošnju energije i resursa u fazi proizvodnje i fazi transporta, 3. Implementirati značajke strukture proizvoda i kvalitetne materijale s ciljem minimiziranja mase proizvoda, 4. Minimizirati potrošnju energije i resursa u fazi eksploatacije, posebno za proizvode s najvećim utjecajima na okoliš u fazi eksploatacije, 5. Maksimizirati potencijal proizvoda za duljim životnim vijekom putem planiranja servisa i unapređivanja proizvoda, 6. Razvoj proizvoda s dugim životnim vijekom i većim utjecajima na okoliš u fazama osim faze eksploatacije, 7. Birati ekološki prihvatljivije materijale, površinsku zaštitu i lako rastavljiva rješenja u strukturi proizvoda u cilju zaštite proizvoda od trošenja, nečistoća iz okoline i korozije, te radi uštede troškova održavanja proizvoda i duljeg životnog vijeka proizvoda, 8. Planirati servisiranje, nadogradnju i recikliranje proizvoda putem razvoja lako rastavljivih proizvoda, putem označavanja komponenata i materijala proizvoda, modularizacijom i uputama za korištenje proizvoda, 9. Planirati nadogradnju, servisiranje i recikliranje minimiziranjem različitih materijala proizvoda, izborom materijala koji se mogu reciklirati, te materijala s malim utjecajima na okoliš, 10. Izbjegavati korištenje nerastavljivih spojeva na proizvodu.</td></tr>
<tr><td></td></tr>
<tr><td></td><td>Eco-Design Value guidelines [82]:<br>Tablica 3-2.</td></tr>
</table>

Ekodizajn metode i alati *Dominance Matrix* [168], *Econcept Spiderweb* [168], *Eco-products tool* [178] i *Philips Fast Five Awareness* [177] specifično su namijenjeni usporedbi koncepata proizvoda. *LiDS-Wheel* [147] i *Eco-compass* [187] nisu namijenjeni vrednovanju koncepata proizvoda, te je uputno koristiti ih za kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda temeljem rezultata procjene životnog ciklusa [50], [272], [273]. U literaturi se liste kriterija ekološke prihvatljivosti opisuju kao alati koji bi se potencijalno mogli koristiti u svrhu vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata. Kako su kriteriji ekološke prihvatljivosti općeniti, generički ili propisuju karakteristike koje se tiču životnog ciklusa proizvoda [101], liste kriterija ekološke prihvatljivosti izdvojene su u uži izbor ekodizajn metoda koji bi bili prikladni pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda.

Voss i drugi [17] objašnjavaju da se tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda odlučivanje o tome koje ekodizajn smjernice primijeniti, prvenstveno temelji na razmatranju rezultata analize životnog ciklusa i utjecaja na okoliš referentnog proizvoda ili više njih. Odabir ekodizajn strategije u razvoju proizvoda također se odvija temeljem takvih razmatranja, analiza i *LCA* procjena [32], [274].

Bernstein i drugi [50] demonstrirali su da su metode i alati poput *LiDS-Wheel* [147] učinkovitiji ako se primjenjuju u kombinaciji s rezultatima prethodno provedene procjene životnog ciklusa alternativa koje se razmatraju i vrednuju. Razlog zašto je tomu tako, može biti u vrsti kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih ekodizajn metodom ili alatom.

Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti koje propisuju *Ten Golden Rules* [123], *LiDS-Wheel* [147], *Econcept Spiderweb* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177], *Eco-products tool* [178] i *Eco-compass* [187] impliciraju razmatranje životnog ciklusa proizvoda, tj. koncepta proizvoda i kvantifikaciju utjecaja proizvoda na okoliš. Broj kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih tim metodama kreće se između 5 i 10, te su ujedno i preopćeniti kako bi se na temelju njih donijela ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepcijskih rješenja proizvoda. Nadalje, kriterij eko-efikasnosti (koji je propisan većinom analiziranih metoda i alata (Tablica 3-1) ne može se primijeniti kao kvalitativni kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi stoga što značajke proizvoda koje su ključne za procjenu troškova i utjecaja na okoliš nisu definirane prije završetka konstrukcijske razrade proizvoda.

*Design for Environment* smjernice [170] su ekodizajn smjernice, odnosno smjernice za ekološki prihvatljivo oblikovanje. Iako je alatom propisan daleko najveći broj smjernica, one služe za razmatranje isključivo oblika i forme proizvoda, te time nedovoljno pružaju potporu vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja proizvoda.

*ERPA* matrica [20] također je isključena iz užeg izbora kao metoda koja bi se mogla koristiti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. Kriteriji propisani *ERPA* metodom zahtijevaju razmatranje ekološke prihvatljivosti koncepta u svakoj od faza životnog ciklusa proizvoda, a za takvu kvantifikaciju u konceptualnoj fazi uobičajeno nema dostupnih podataka.

### *3.2.1. Istraživačka pitanja studije slučaja*

Ekodizajn smjernice i *LCA* studije referentnih proizvoda smatraju se prikladnim metodama za potporu razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda u konceptualnoj fazi razvoja [275]. To je stoga što smjernice posredno ukazuju na kriterije ekološke prihvatljivosti te pružaju generičke upute za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda, a *LCA* studije ukazuju na parametre životnog ciklusa proizvoda koji formiraju sliku utjecaja na okoliš referentnih proizvoda.

Ekodizajn smjernice koriste se pri definiranju ciljeva i prioriteta tijekom razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda. Najčešće dolaze u obliku pravila ili poopćenih izjava o ekodizajn strategijama, principima i rješenjima koje je uputno implementirati u proces konstruiranja i razvoja proizvoda. *Eco-Design Value* smjernice [82] primarno su namijenjene definiranju ciljeva prilikom razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda. *Eco-Design Value* smjernice [82] odabrane su za studiju slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata u kojoj je sudjelovalo 11 magistara inženjera strojarstva.

Istraživačka pitanja studije slučaja:

1.) Kakva je učinkovitost primjene kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih *Eco-Design Value* smjernicama [82] u usporedbi s vrednovanjem ekološke prihvatljivosti koncepata kod kojeg kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno određeni?

2.) Koji faktori mogu utjecati na ishod kvalitativnog vrednovanja koncepata proizvoda u uvjetima propisanim nacrtom studije slučaja?

Tablica 3-2. Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani *Eco-Design Value* smjernicama [82]

| Smjernice | Grupe kriterija ekološke prihvatljivosti | Broj kriterija u grupi kriterija |
|---|---|---|
| Što manji utjecaji na prirodu i okoliš | Koncept je 'čist i siguran' | 4 |
| | Konceptom se podržava obnavljanje prirodnih resursa nakon upotrebe i eksploatacije | 3 |
| | Koncept podržava čistoću zraka (ne utječe na promjenu sastava zraka) | 3 |
| | Koncept oponaša rješenja iz prirode | 3 |
| Što manja potrošnja resursa | Konceptom se podržava smanjivanje ili ujednačavanje potrošnje resursa | 3 |
| | Konceptom se podržava optimizacija i efikasnost potrošnje resursa | 3 |
| | Konceptom se podiže svijest o ekološkim aspektima upotrebe proizvoda | 2 |
| | Konceptom se podržava zajedničko korištenje proizvoda od strane više korisnika | 3 |
| Dulji životni vijek i faza eksploatacije proizvoda | Proizvod je konstruiran za dulji životni vijek i veću pouzdanost pri radu | 3 |
| | Mogućnost popravaka i veća obnovljivost proizvoda za dulji životni vijek | 3 |
| | Koncept podržava ideju privrženosti korisnika proizvodu | 4 |
| | Konceptom se implementiraju poznata (tradicionalna) rješenja, a koja su još uvijek dobra | 4 |
| Dulji korisni životni vijek proizvoda i njegovih komponenata | Koncept podržava rastavljivost i reciklabilnost proizvoda | 4 |
| | Koncept podržava multi-funkcionalnost proizvoda | 3 |
| | Korisnik može prilagoditi proizvod svojim potrebama tijekom faze eksploatacije proizvoda | 2 |
| | Konceptom se podržava ideja univerzalnosti implementiranih rješenja | 3 |

*Eco-Design Value* smjernice [82] propisuju 50 smjernica za oblikovanje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda. Smjernice su namijenjene uputiti konstruktore o načinima

oblikovanja i ekodizajn strategijama. Smjernice su podijeljene u četiri grupe smjernica kojima se na opisan (kvalitativni) način propisuju kriteriji ekološke prihvatljivosti (Tablica 3-2).

### *3.2.2. Sudionici studije slučaja*

U studiji slučaja sudjelovalo je jedanaest (11) magistara inženjera strojarstva. Odabir ispitanika nije slučajan, već su birani sudionici studije sa ne više od 6 godina iskustva rada u struci, a obrazovanje su stekli na istoj instituciji – Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Tablica 3-3 i Tablica 3-4 prikazuju kvalifikacije i iskustvo sudionika studije.

Tablica 3-3. Profesionalne kvalifikacije sudionika studije

| Odjel u poduzeću ili industrijski sektor | Broj sudionika |
|---|---|
| Razvoj proizvoda (oblikovanje, detaljiranje ili komercijalizacija proizvoda) | 4 |
| Istraživanje, znanost, suradnja s industrijskim partnerima ili obrazovnim institucijama | 3 |
| Projektni menadžment | 2 |
| Razvoj proizvoda i proizvodno inženjerstvo | 1 |
| Proizvodnja i distribucija energije | 1 |

Tablica 3-4. Iskustvo sudionika studije

| Godine od stjecanja titule magistra inženjera strojarstva | Broj sudionika |
|---|---|
| 1-4 godina | 2 |
| 4-6 godina | 8 |
| 6 godina | 1 |

Prema istraživanjima o razlikama između početnika i stručnjaka magistara inženjera [276], postoje pokazatelji da su inženjeri početnici vični rješavanju problema na način da analitički pristupaju razmatranju problema, dok iskusniji inženjeri nastoje preformulirati problem, te dati rješenje problema na pragmatičan način. Upravo zbog toga što se studijom slučaja nastojalo motivirati sudionike da analitički pristupe problemu vrednovanja ekološke

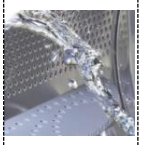
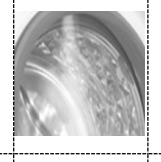
prihvatljivosti predstavljenih im koncepata, za studiju slučaja odabrani su magistri inženjeri strojarstva sa ne više od oko 6 godina iskustva rada u struci. Pochat i drugi [161] navode da su metode i alati u obliku smjernica namijenjeni inženjerima početnicima.

### *3.2.3. Koncepti procesa pranja rublja*

Faza eksploatacije proizvoda i definiranje utjecaja na okoliš povezanih sa korisnom fazom životnog vijeka za određene proizvode je najveći uzrok utjecaja na okoliš [206]. Te alternative moraju biti posebno razmatrane u ranim fazama konstruiranja, jer te faze su i najfleksibilnije za provođenje izmjena i promjena u odnosu na male troškove izvođenja promjena u tim fazama. Problem povezivanja funkcija proizvoda i komponenata proizvoda sa procjenom utjecaja na okoliš uslijed eksploatacije proizvoda predmet je istraživanja brojnih autora [35], [52]. Postojeći pristupi odlikuju se ograničavajućom točnosti s kojom se utjecaji na okoliš mogu izračunati. Puglieri i drugi [49] uočili su nedostatke *QFD* metoda za vrednovanje upravo faze eksploatacije proizvoda, koja je posebno važna za proizvode sa najkritičnijim utjecajima na okoliš u toj fazi [48].

U studiji slučaja bilo je potrebno izabrati koncepcijska rješenja za usporedbu ekološke prihvatljivosti. Odabrana su koncepcijska rješenja za ostvarivanje pranja i čišćenja tekstila. Temeljem svojstvenih funkcionalnih značajki i tehnologija kojima je ostvarena glavna funkcija pranja ili čišćenja tekstila, koncepti se razlikuju u radnim principima i tehničkim rješenjima, što ih čini pogodne kandidate za studiju slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (Tablica 3-5).

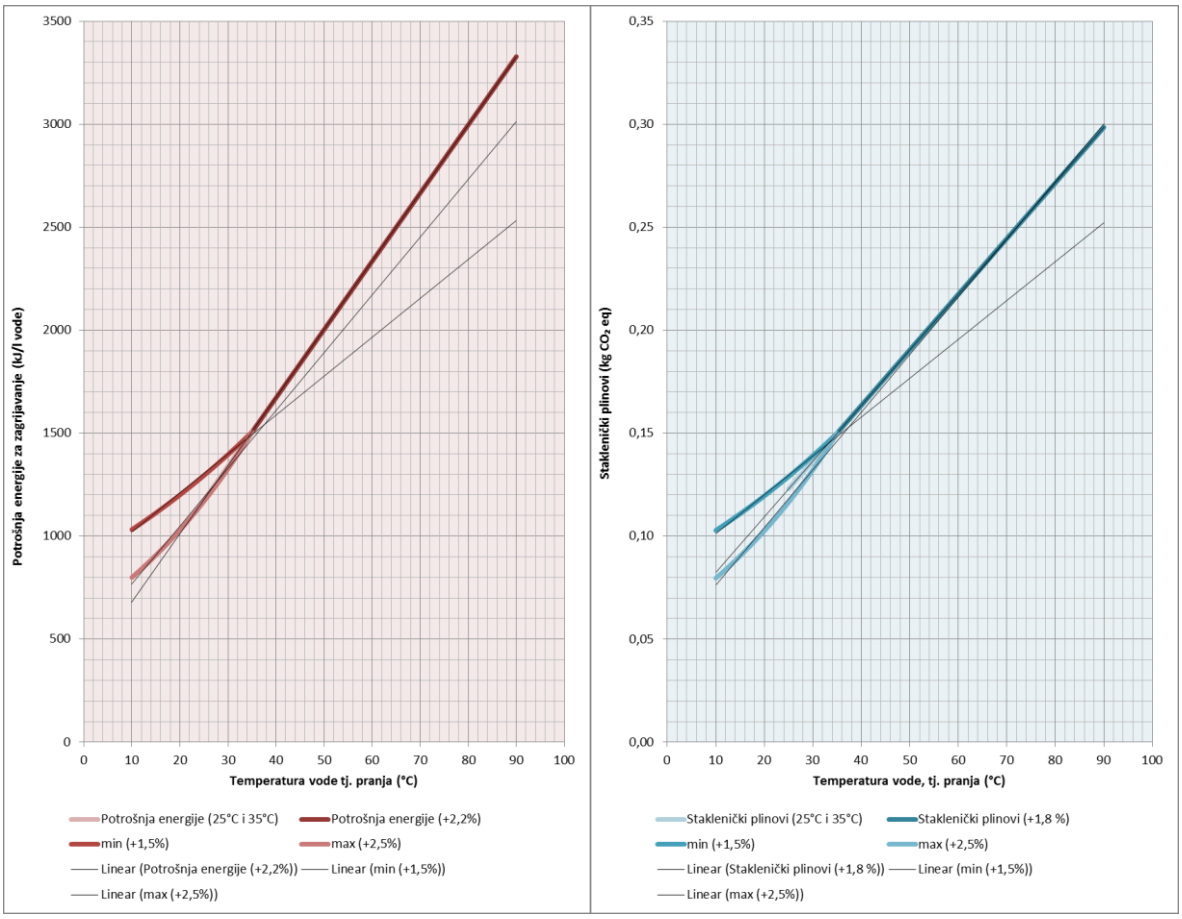
Tablica 3-5. Primjeri koncepcijskih rješenja pranja rublja [73]

| Radni princip | Slika | Materijali i energija | Sekundarni efekti prema okolišu | Glavni fizikalni efekt ili fizikalni zakon |
|---|---|---|---|---|
| A - Pranje rublja deterdžentom i toplom vodom |  | Voda, deterdžent, zagrijavanje vode, mehaničko djelovanje na rublje | Siva topla voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom | Kemijsko i mehaničko odstranjivanje nečistoća (mješavinom deterdženta i vode, te toplom vodom) |
| B - Pranje rublja pjenom vode i deterdženta | | Voda, deterdžent, zrak, zagrijavanje vode, mehaničko djelovanje na rublje | Siva voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom | Kemijsko i mehaničko odstranjivanje nečistoća (pjenom vode i deterdženta, te vodom) |
| C - Pranje rublja ultrazvukom | | Voda, ultrazvučni valovi | Siva voda s odstranjenim (otopljenim) nečistoćama | Efekt kavitacije |
| D - Pranje rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom, tj. suhim ledom | | Ugljikov dioksid u ukapljenom ili krutom stanju, zrak ili dušik | Ugljikov dioksid (plinovito stanje), nečistoće, zrak ili dušik | Krioliza (smrzavanje i zatim naglo izjednačavanje temperature nečistoća i rublja sa okolišnom) |
| E - Pranje rublja polimernim kuglicama | | Voda, polimerne kuglice, deterdžent, mehaničko djelovanje na rublje | Siva voda, polimerne kuglice, nečistoće, deterdžent | Mehaničko djelovanje na rublje polimernim kuglicama |
| F - Pranje rublja vodenom parom |  | Voda (pod visokim tlakom i temperature), mehaničko djelovanje na rublje | Siva voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom | Omekšavanje rublja i nečistoća vodenom parom |
| G - Pranje rublja ioniziranim česticama | | Voda ionizirane čestice (srebro, vodik i dr.) | Siva voda s otopljenim nečistoćama, ionizirane čestice | Ionizacijsko privlačenje (negativno nabijene čestice srebra ili vodika iz vode) |

Pregledom literature izdvojeno je nekoliko kandidata koncepcijskih rješenja koja će biti predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti u studiji. Pronađena rješenja razlikuju se po stupnju inovativnosti, dakle radi li se o idejama i parcijalnim tehničkim rješenjima (koja se mogu pronaći u patentima) ili o u detalje razrađenim rješenjima čija je komercijalna vrijednost potvrđena na tržištu. U studiji slučaja sudionicima će biti predstavljeni koncepti A, B, C, D i E

(Tablica 3-5). Koncepti F i G neće biti uključeni u studiju slučaja jer se radi o idejama proizvoda kod kojih nije s dovoljnom pouzdanošću ispitana efektivnost predloženih rješenja.

Analizom arhetipskog koncepta automatske perilice rublja za kućanstva, utvrđeni su parametri procesa pranja koji utječu na ekološku prihvatljivost. U *LCA* analizama perilica rublja koja se mogu pronaći u literaturi, većina svih utjecaja na okoliš uslijed životnog ciklusa pojavljuje se u fazi eksploatacije [277], [278]. Rüdenauer i drugi [279] izračunali su da udio utjecaja na okoliš u fazi eksploatacije čini oko 65% ukupnih utjecaja na okoliš perilice rublja.




a) b)

Slika 3-1. a) Potrošnja energije automatske perilice rublja za različite temperature pranja; b) Utjecaj temperature pranja na emisije stakleničkih plinova [280]

U studiji Koernera i drugih [280], potrošnja električne energije u fazi eksploatacije iznosi 61% potrošnje energije tijekom životnog vijeka automatske perilice rublja, potrošnja vode čini čak 91%, a emisije stakleničkih plinova 71% ukupnih emisija stakleničkih plinova

tijekom životnog ciklusa proizvoda. Koncept A je koncepcijsko rješenje pranja rublja deterdžentom i toplom vodom, te se radi o konceptu proizvoda čija je komercijalna vrijednost potvrđena prisutnošću proizvoda na europskom tržištu.

Potrošnja električne energije i stakleнički plinovi proporcionalno rastu s povećanjem temperature pranja (Slika 3-1). Radi se o linearnom rastu, a za izračun potrošnje energije i stakleničkih plinova u području temperatura između 10°C i 35°C korišteni su podaci iz literature [280] temeljem kojih su aproksimirani pravci i dobivene vrijednosti za navedene temperature.

Tehnička izvedivost i komercijalna vrijednost proizvoda koji se temelji na konceptu A potvrđeni su prisutnošću automatskih perilica za pranje rublja u kućanstvima na europskom tržištu preko 50 godina. Brojna poboljšanja ekološke prihvatljivosti ovog proizvoda ostvaruju se periodično, od poboljšanja energetske efikasnosti do poboljšanja rekonstrukcijom proizvoda [281]. Optimizacija potrošnje električne energije, vode i deterdženta postignuta je razvojem standardiziranih programa pranja.

Konceptom A proces odstranjivanja nečistoća sa tekstilnih vlakana ostvaruje se zagrijanom vodom, deterdžentom i mehaničkim djelovanjem na rublje (centripetalna sila) [282]. Učinkovitost djelovanja deterdženta ostvaruje se namakanjem rublja u zagrijanoj vodi čime se postiže opuštanje tekstilnih vlakana [283]. Voda kojom se vrši namakanje rublja može biti zagrijana na niže (30 ili 40 °C) ili više (60 ili 90 °C) temperature pranja, već ovisno o odabranom programu pranja.

Namakanjem rublja u mješavini vode i deterdženta oslobađa se kemijska energija deterdženta koja sudjeluje u procesu pranja, a rotacijom bubnja u kojem je pohranjeno rublje ostvaruje se mehaničko djelovanje na rublje i trenje između vlakana, rublja i bubnja [277]. Za ispiranje uzima se nova tura čiste vode, a siva voda se ispušta u kanalizacijski odvod. Za koncepte A i B karakteristična je centrifuga kojom se omogućava odvajanje vode za ispiranje rublja u završnom koraku procesa pranja.

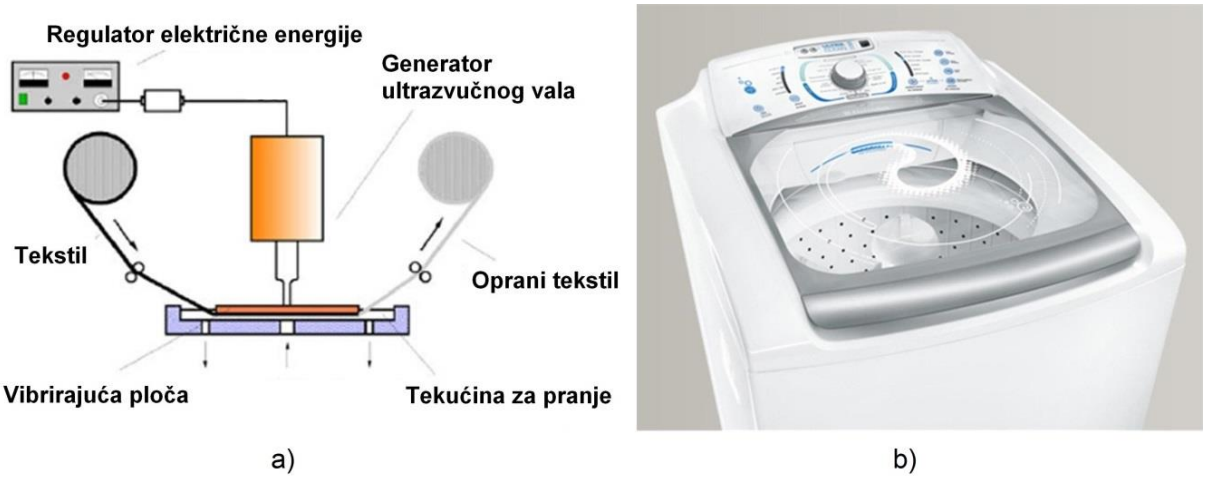
Konceptom B pranje deterdžentom i toplom vodom ostvaruje se na način da se rublje natopi pjenom vode i deterdženta prije ispiranja vodom zagrijanom na 30°C (Slika 3-2).

Slika 3-2. Koncept B - Eco Bubble™ pranje tekstila pjenom deterdženta i vode [284]

Mehaničko djelovanje na rublje nakon natapanja pjenom ostvaruje se također u bubnju kao kod koncepta A, uz ispiranje vodom i potom centrifugu čime se ostvaruje cijeđenje, odnosno završno odvajanje vode za ispiranje i rublja. Ovaj način pranja implementiran je u Samsung perilici rublja Samsung Eco Bubble™ [284] koja je dostupna na tržištu. Prema tvrdnjama proizvođača, učinkovitost pranja ostvarena konceptom B usporediva je sa standardnim procesima pranja. Pranje pjenom zahtijeva manje mehaničkog djelovanja na rublje, te se pranjem na nižim temperaturama ostvaruju uštede u potrošnji električne energije i do 55%.

Koncept C implementacija je rješenja kod kojeg se odstranjivanje nečistoća sa tekstila ostvaruje uslijed djelovanja efekta kavitacije. Efekt je ostvaren uslijed djelovanja ultrazvučnih valova u vodi.

Djelovanjem ultrazvučnih valova u tekućem mediju proizvode se mjehurići zraka u mediju (vodi ili mješavini tekućeg deterdženta i vode). Uslijed rasta tlaka u mjehurićima oni agresivno pucaju, te u kontaktu s tekstilom ostvaruju odstranjivanje nečistoća sa tekstila. Vođenje tekstila omogućeno je preko sustava kolotura (Slika 3-3.a). Metoda pranja tekstila ultrazvukom i sustav za pranje tekstila patentirani su, a tehnička izvedivost potvrđena je prototipom i ispitivanjem učinkovitosti pranja tekstila [285].




Slika 3-3. a) Sustav za ultrazvučno pranje tekstila [285]; b) *Electrolux Ultra Clean* perilica rublja sa olovkom za uklanjanje manjih mrlja ultrazvukom [286]

Ultrazvučni valovi trebaju biti usmjereni okomito na površinu tekstila kako bi se ostvario efekt kavitacije. Efikasnost pranja potpomognuto je djelovanjem tekućeg deterdženta i djelovanjem vibracija horizontalne ploče. Ploča ima trostruku ulogu u procesu pranja. Funkcije ploče su dovođenje tekućeg deterdženta i vode, odvođenje medija za pranje i nečistoća nakon njihovog otklanjanja s tekstila, te prijenos vibracija na tekstil. Maksimiziranjem područja djelovanja ultrazvučnih valova pospješuje se agresivno rastvaranje mjehurića zraka [285].

Konceptom D opisano je koncepcijsko rješenje čišćenja rublja gdje se nečistoće odstranjuju suhim ledom (ugljikovim dioksidom). Koncept pod nazivom ‘Orbit’ osmislio je Elie Ahovi (Slika 3-4), te je rješenje prijavio na natjecanje Electrolux Design Lab koje jednom godišnje organizira Electrolux. Dizajner je osmislio proces pranja kojim se čišćenje rublja ostvaruje usmjerenom strujom ugljikovog dioksida na rublje, a u bubnju karakterističnog oblika kugle [287].

Elie Ahovi opisuje da se mehaničko djelovanje na rublje kod ‘Orbit’ koncepta ostvaruje okretanjem bubnja uslijed djelovanja snažnog magnetskog polja [289]. Energija potrebna za napajanje ovog proizvoda značajno bi premašivala nominalnu potrošnju za slične proizvode, te stoga komercijalizacija ovog koncepta nije ostvarena. Kako zbog ove, za ekološku prihvatljivost izrazito negativne funkcionalnosti, ‘Orbit’ koncept ne bi u početku bio okarakteriziran kao ekološki najnepovoljniji, ispitanicima u studiji slučaja predstavljen je koncept D.

Slika 3-4. Koncept D - 'Orbit' koncept pranja tekstila suhim ledom [287]; slike dostupne na [288], [289]

Konceptom D definirano je rješenje procesa čišćenja rublja suhim ledom, te karakteristike oblika 'Orbit' koncepta. Ispitanici su informirani da karakteristike koje ukazuju na tehničku izvedivost izvornog 'Orbit' koncepta ne moraju biti eliminacijski faktor pri odlučivanju o ekološkoj prihvatljivosti koncepta D. Naime, tehničko rješenje kojim se ostvaruje mehaničko djelovanje na rublje) može biti osmišljeno po uzoru na koncepte A i B (ostvarenjem centripetalnog djelovanja bubnja uređaja).

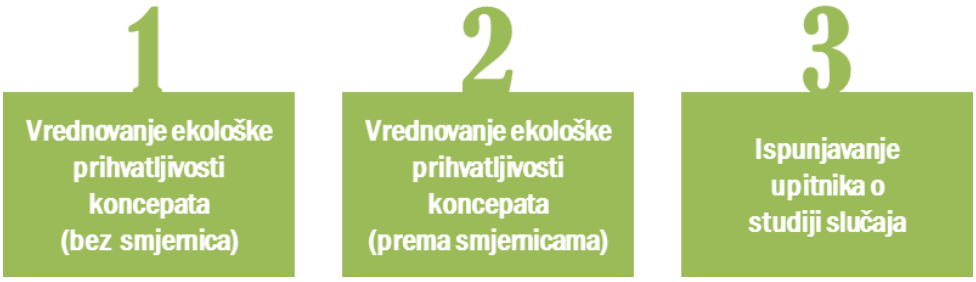
Kod koncepta E, za razliku od koncepata A i B, pranje i čišćenje rublja odvija se pomoću polimernih kuglica koje zamjenjuju ulogu vode u procesu pranja. Voda u tom procesu je sredstvo kojim se potpomaže ostvarivanje trenja između polimernih kuglica i tekstilnih vlakana. Potrošnja vode je nekoliko puta manja nego kod koncepata A i B, te se pranje rublja može odvijati na nižim temperaturama i s manjom potrošnjom deterdženta za jednako učinkovito pranje. Uslijed smanjene potrošnje deterdženta, ukupna potrošnja vode za ispiranje također je manja nego kod koncepata A i B. Ovaj koncept razvijeno je i patentirano od strane poduzeća Xeros Ltd [290].

Komercijalna vrijednost koncepta pranja polimernim kuglicama potvrđena je na američkom tržištu. Ispitanicima u studiji slučaja predstavljeni su neki od parametara procesa pranja. Pretpostavljeno je da je jedna šalica vode dostatna za čitav ciklus pranja, te je 20 kilograma polimernih kuglica dostatno za 100 ciklusa pranja, nakon čega ih je potrebno zamijeniti novim, a uslijed trošenja i smanjene efektivnosti pranja.

Slika 3-5. Koncept E - pranje tekstila polimernim kuglicama [290]

### *3.2.4. Nacrt i izvođenje studije slučaja*

Studija slučaja osmišljena je i provedena s ciljem ispitivanja učinkovitosti i primjenjivosti ekodizajn smjernica za oblikovanje ekološki prihvatljivih proizvoda (*Eco-Design Value* [82]) za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja proizvoda. Svrha studije je bila usporediti rangiranje koncepata proizvoda prema ekološkoj prihvatljivosti prije i nakon uvođenja kvalitativnih kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti koje su proveli magistri inženjeri strojarstva u uvjetima individualnog vrednovanja i ocjenjivanja ekološke prihvatljivosti. U studiji je sudjelovalo jedanaest ispitanika. U prvom koraku studije, ispitanicima nisu bili ponuđeni kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima bi izvršili vrednovanje, te su bili upućeni rangirati koncepte proizvoda temeljem vlastitog razmatranja ekološke prihvatljivosti pojedinih koncepata. U drugom krugu studije, sudionici su bili upućeni izvršiti novo rangiranje istih pet koncepata, no ovaj put koristeći *Eco-Design Value* smjernice [82].




Slika 3-6. Tri faze studije slučaja

Prema nacrtu studije slučaja, zadaci za sudionike podijeljeni su u tri faze (Slika 3-6). U prvoj fazi studije, sudionici su imali za zadatak vrednovati ekološku prihvatljivosti prezentiranih im koncepata proizvoda na način da rangiraju pet koncepata proizvoda od ekološki najprihvatljivijeg prema ekološki najmanje prihvatljivom konceptu. Rangiranje su trebali izvršiti temeljem vlastitih zaključaka o ekološkoj prihvatljivosti koncepata.

Tablica 3-6. Podaci o konceptima proizvoda u studiji slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]

| Podaci o konceptima prezentiranih sudionicima studije | Koncept | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| Opis funkcija i funkcionalnosti proizvoda, tekstualno | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Funkcije, grafički prikaz/ skica | □ | □ | □ | □ | □ |
| Opis radnih principa proizvoda, tekstualno | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Radni principi, grafički prikaz/skica | □ | ■ | ■ | □ | ■ |
| Oblikovanje i konstrukcijska razrada, tekstualno | ■ | □ | □ | □ | □ |
| Oblikovanje i konstrukcijska razrada, grafički prikaz/skica | □ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Prednosti koncepta u usporedbi s drugim konceptima, tekstualno | □ | ■ | □ | □ | □ |
| Nedostaci koncepta u usporedbi s drugim konceptima | □ | □ | □ | ■ | □ |
| Prednosti koncepta u usporedbi sa konceptom A, tekstualno | □ | ■ | □ | ■ | ■ |
| Nedostaci koncepta u usporedbi sa konceptom A, tekstualno | □ | □ | □ | ■ | □ |
| Kvalitativni ili kvantitativni podaci o potrošnji energije, vode ili deterdženta, tekstualno | □ | ■ | □ | ■ | ■ |
| Kvalitativni ili kvantitativni podaci o životnom ciklusu proizvoda i utjecajima na okoliš (životni vijek, ugljični otisak, emisije, …) | □ | □ | □ | □ | □ |
| Kvalitativni ili kvantitativni podaci o materijalima komponenata, tehnološkim postupcima proizvodnje, recikliranim materijalima, rastavljivosti, itd. | □ | □ | □ | □ | □ |

Oznake: Dostupnost informacija sudionicima studije: ■ - Dostupno, □ – Nije dostupno.

Sudionici studije prvo su dobili uvid u koncepte i obrasce na kojima su bili upućeni zapisati rangiranje koncepata. Koncepti su im predstavljeni tekstualno i vizualno (Tablica 3-6). Funkcije i radni principi koncepata, sudionicima su prezentirani tekstualnim opisom, te gdje je to bilo moguće, oblikovanje i forma proizvoda predstavljeni su slikom, izometrijskim prikazom uređaja, ali bez prikaza karakterističnih presjeka ili komponenata proizvoda.

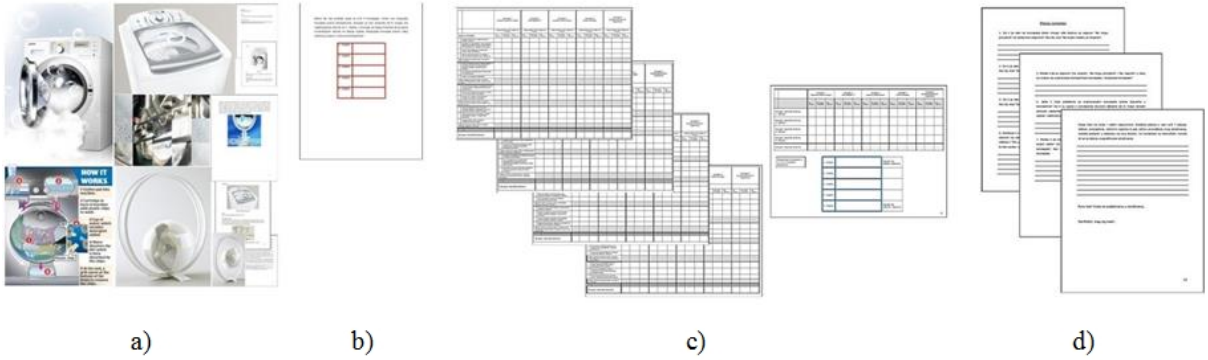
Tek po završetku prvog vrednovanja i rangiranja koncepata, sudionicima studije su predstavljeni kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima su proveli drugo po redu vrednovanje ekološke prihvatljivosti i rangiranje sada već dobro poznatih koncepata proizvoda. Kriteriji ekološke prihvatljivosti definirani su temeljem smjernica za ekološki prihvatljivo oblikovanje (*Eco-Design Value* smjernice [82]). Radi se o izjavama o karakteristikama ekološki prihvatljivih proizvoda. Svaka smjernica (izjava) predstavlja po jedan kriterij ekološke prihvatljivosti.

Sudionici studije upućeni su da razmotre svaku smjernicu (kriterij ekološke prihvatljivosti) i ocijene svaki koncept jednim od sljedeće tri ocjene. Ako je izjava o konceptu opisivala, odnosno bila svojstvena razmatranom konceptu, sudionici su bili upućeni da označe odgovor s 'Da, izrazito' tvrdnjom, čime su zabilježili pozitivnu korelaciju između ekološke prihvatljivosti i razmatranog koncepta. Ako u suprotnom, izjava o konceptu nije opisivala razmatrani koncept, tj. karakteristike koncepta smatrane su upravo suprotnima kriteriju ekološke prihvatljivosti opisanome smjernicom, sudionici su bili upućeni da označe odgovor s 'Ne, naprotiv' tvrdnjom čime su zabilježili negativnu korelaciju između ekološke prihvatljivosti i razmatranog koncepta. Kao treću opciju, sudionici su mogli označiti odgovor 'Ne mogu procijeniti' čime su zabilježili da ne mogu definirati niti pozitivnu niti negativnu korelaciju između izjave i razmatranog koncepta, a uslijed nedostataka podataka o konceptu koja bi im omogućila pravovaljanu procjenu ili uslijed nerazumijevanja značenja pojedinog kriterija ekološke prihvatljivosti, odnosno *Eco-Design Value* smjernice [82].

Nakon označavanja korelacija između svih 50 smjernica i 5 koncepata, sudionici studije upućeni su da dodijele bodove ocjenama korelacija. Sustav bodovanja definiran je na način da je bilo potrebno dodijeliti jedan (1) bod za svaku pozitivnu korelaciju, minus jedan (-1) bod za svaku negativnu korelaciju i nula (0) bodova za svaku neutralnu korelaciju između izjave (*Eco-*

*Design Value* smjernice) i koncepta. Potom su sudionici bili upućeni da zbroje ukupni broj bodova za svaki od pet koncepata zasebno, te se ocjenama koncepta ravnaju prilikom rangiranja koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti. Prije izvođenja studije slučaja, sudionici nisu bili upoznati sa *Eco-Design Value* smjernicama [82], te se može zaključiti da ih koriste po prvi put.

Svakom sudioniku studije dodijeljen je po jedan primjerak od ukupno četiri grupe obrazaca: a) prezentacija koncepata proizvoda, b) obrazac za prvo rangiranje, c) obrazac za vrednovanje i drugo rangiranje, i d) upitnik (Slika 3-7).




Slika 3-7. Obrasci za zapisivanje vrednovanja i rangiranja u studiji slučaja

Po završetku vrednovanja, dakle nakon prvog i drugog rangiranja koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti, sudionici su bili upućeni da ispune kratak upitnik. Upitnik je služio za bilježenje komentara sudionika o rezultatima prvog i drugog rangiranja koncepata. Tijekom odvijanja studije, sudionici nisu imali uvid u rangiranja ostalih sudionika. Iako se studija slučaja odvijala u laboratorijskim uvjetima, te su sudionici bili smješteni na dovoljnoj udaljenosti jedni među drugima, nije bilo komunikacije ili rasprave među sudionicima studije, te se može zaključiti da se radi o rezultatima rangiranja uslijed individualnog vrednovanja sudionika studije.

Prva faza studije u kojem su se sudionici upoznali s konceptima i vrednovali koncepte na način da su ih rangirali od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog trajao je 15 minuta. Drugu i treću fazu studije činili su drugi krug vrednovanja i ispunjavanje upitnika u ukupnom trajanju od 45 do 60 minuta (Tablica 3-7). Sudionici nisu bili ograničeni vremenom potrebnim za izvršavanje zadataka u studiji. Prethodno su prilikom obavještavanja

o temi, mjestu i datumu provođenja studije bili obaviješteni da se ukupno trajanje studije procjenjuje na nekoliko sati, te ne više od jednog dana.

Tablica 3-7. Trajanje vrednovanja u studiji slučaja

| 1. rangiranje (kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno zadani) | 2. rangiranje (vrednovanje temeljem 50 kriterija ekološke prihvatljivosti [82]) i ispunjavanje upitnika |
|---|---|
| do 15 minuta | 45-60 minuta |

### *3.2.5. Rezultati studije slučaja*

Većina ispitanika u studiji slučaja prilikom prvog rangiranja ocijenilo je koncept B i koncept C kao ekološki najprihvatljivije koncepcijske varijante (Tablica 3-8). Sedam od ukupno jedanaest sudionika studije ocijenilo je koncept ultrazvučnog pranja kao ekološki najprihvatljiviji među konceptima, dok je preostalo četvero sudionika procijenilo da je koncept pranja pjenom deterdženta i vode ekološki najprihvatljiviji koncept od ponuđenih. Sudionici nisu imali uvid u vrednovanje, rangiranje ili zaključke ostalih sudionika u studiji, te stoga nisu bili vođeni mišljenjem ostalih sudionika u studiji pri rangiranju koncepata.

Tablica 3-8. Rezultati prvog i drugog rangiranja ekološke prihvatljivosti koncepata od strane sudionika studije slučaja

| Rangiranje (1 ÷ 5) | Subjektivno vrednovanje ekološke prihvatljivosti | | | | | Semi-kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti (kriteriji propisani *Eco-Design Value* smjernicama [82]) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 najbolje ocijenjen koncept | C (7) | | | B (4) | | C (6) | | B (4) | | A (1) |
| 2 | D (5) | C (3) | A (1) | B (1) | E (1) | B (5) | A (3) | C (2) | | D (1) |
| 3 | E (4) | B (3) | D (2) | A (1) | C (1) | E (4) | A (3) | C (2) | B (1) | D (1) |
| 4 | A (6) | B (3) | | E (2) | | E (5) | D (3) | A (2) | | C (1) |
| 5 najlošije ocijenjen koncept | D (4) | E (4) | | A (3) | | D (6) | A (2) | E (2) | | B (1) |

Oznake: Koncept A - Pranje deterdžentom i toplom vodom; Koncept B - Pranje pjenom deterdženta i vode; Koncept C - Ultrazvučno pranje; Koncept D - Čišćenje suhim ledom; Koncept E - Pranje polimernim kuglicama; broj u zagradi () - broj sudionika koji su dodijelili rang konceptu (od najviše mogućih 11 koliko je ukupan broj sudionika studije).

Kod rangiranja u prvom dijelu studije slučaja, koncepti A, D i E ocijenjeni su ekološki manje povoljnim varijantama, te s ravnomjernom distribucijom rezultata rangiranja. Po četiri sudionika smatrali su da su koncept pranja polimernim kuglicama i koncept pranja suhim ledom najmanje ekološki prihvatljivi od ukupno pet ponuđenih koncepata. No, istovremeno je pet sudionika studije ocijenilo koncept pranja suhim ledom drugom ekološki najprihvatljivijom varijantom. Koncept pranja suhim ledom četiri sudionika rangirala su kao srednje ekološki prihvatljivu varijantu, ali druga četiri sudionika ocijenila su taj koncept kao ekološki najmanje prihvatljivi koncept od ponuđenih.

Tablica 3-9. Pregled rezultata nakon bodovanja uslijed drugog po redu rangiranja kada su sudionici studije vrednovali koncepte prema *Eco-Design Value* smjernicama [82]

| 2. rangiranje | Bodovi za pozitivne korelacije po konceptu ('+1') | Bodovi za negativne korelacije po konceptu ('-1') | Zbroj bodova po konceptu ('+1' + '-1') | Bodovi za neutralne korelacije po konceptu ('0') |
|---|---|---|---|---|
| 1 = C najbolje ocijenjen koncept | $\bar{x}$ = 20,54<br>$X$ = 20<br>$R$ = 8 ÷ 34<br>$\sigma$ = 7,06 | $\bar{x}$ = 6,81<br>$X$ = 6<br>$R$ = 2 ÷ 17<br>$\sigma$ = 3,83 | $\bar{x}$ = 20,54-6,81 = 13,73<br>$X$ = 20-6 = 14 | $\bar{x}$ = 22,36<br>$X$ = 25<br>$R$ = 10 ÷ 33<br>$\sigma$ = 6,19 |
| 2 = B | $\bar{x}$ = 24,63<br>$X$ = 25<br>$R$ = 15 ÷ 37<br>$\sigma$ = 7,03 | $\bar{x}$ = 10,27<br>$X$ = 10<br>$R$ = 0 ÷ 28<br>$\sigma$ = 7,47 | $\bar{x}$ = 14,36<br>$X$ = 15 | $\bar{x}$ = 14,09<br>$X$ = 15<br>$R$ = 3 ÷ 23<br>$\sigma$ = 6,89 |
| 3 = A | $\bar{x}$ = 23,45<br>$X$ = 22<br>$R$ = 13 ÷ 45<br>$\sigma$ = 8,58 | $\bar{x}$ = 14,09<br>$X$ = 14<br>$R$ = 0 ÷ 26<br>$\sigma$ = 6,85 | $\bar{x}$ = 9,36<br>$X$ = 8 | $\bar{x}$ = 12,45<br>$X$ = 13<br>$R$ = 2 ÷ 28<br>$\sigma$ = 7,99 |
| 4 = E | $\bar{x}$ = 12,36<br>$X$ = 12<br>$R$ = 0 ÷ 24<br>$\sigma$ = 6,94 | $\bar{x}$ = 11,36<br>$X$ = 9<br>$R$ = 4 ÷ 29<br>$\sigma$ = 6,75 | $\bar{x}$ = 1<br>$X$ = 3 | $\bar{x}$ = 26<br>$X$ = 30<br>$R$ = 7 ÷ 40<br>$\sigma$ = 10,21 |
| 5 = D najlošije ocijenjen koncept | $\bar{x}$ = 12,63<br>$X$ = 12<br>$R$ = 0 ÷ 31<br>$\sigma$ = 8,31 | $\bar{x}$ = 14,09<br>$X$ = 16<br>$R$ = 13 ÷ 28<br>$\sigma$ = 6,2 | $\bar{x}$ = -1,45<br>$X$ = -4 | $\bar{x}$ = 23,27<br>$X$ = 24<br>$R$ = 13 ÷ 28<br>$\sigma$ = 4,41 |

Oznake: Koncept A - Pranje deterdžentom i toplom vodom; Koncept B - Pranje pjenom deterdženta i vode; Koncept C - Ultrazvučno pranje tekstila; Koncept D - Čišćenje suhim ledom; Koncept E - Pranje polimernim kuglicama; $\bar{x}$ - aritmetička sredina; $X$ - geometrijska sredina; $R$ - raspon; $\sigma$ - standardna devijacija rezultata. $\bar{x}$, $X$, $R$ i $\sigma$ odnose se na uzorak veličine 11 (broj sudionika u studiji slučaja).

Rezultati prvog rangiranja govore o dva viđenja ekološki manje prihvatljivih koncepata. Statistički značajna većina ispitanika smješta koncept D među ekološki najprihvatljivije, dok

druga statistički značajna većina isti koncept ocjenjuje jednim od ekološki najmanje prihvatljivih. U prvom dijelu studije kada ispitanicima nisu bili eksplicitno ponuđeni kriteriji ekološke prihvatljivosti, ispitanici su bili skloni precijeniti ili podcijeniti ekološku prihvatljivost koncepata, što je vidljivo na rangiranju koncepata D i E. Prilikom drugog vrednovanja koncepata prema eksplicitno ponuđenim kriterijima ekološke prihvatljivosti, sudionici su zabilježili velik broj nepoznanica o korelaciji kriterij – koncept (Tablica 3-9).

Prilikom drugog rangiranja istih pet koncepata, ispitanici su se služili semi-kvantitativnom metodom i kriterijima ekološke prihvatljivosti propisanima *Eco-Design Value* smjernicama [82]. Tijekom drugog rangiranja koncepata nije došlo do situacije kao što je to slučaj kod prvog rangiranja gdje su postojala suprotstavljena mišljenja oko istog koncepta (primjerice koncept D u prvom po redu rangiranju). Koncept D ocijenjen je ekološki neprihvatljivim rješenjem u drugom rangiranju, dok su pri prvom rangiranju ispitanici bili podijeljeni u svojim ocjenama ekološke prihvatljivosti tog koncepta.

Rezultati drugog rangiranja pokazuju bolju distribuciju glasova za koncepte C, D, B i E za pripadajući rang, no i veću (a time i lošiju) distribuciju glasova za koncept A. To bi značilo da u slučaju da ispitanici trebaju postići konsenzus i generirati jedinstveno rangiranje, dodjeljivanje ranga konceptu A temeljilo bi se na odluci o tome da li je koncept A ekološki prihvatljiviji od koncepta E. Konceptu E ispitanici su dodijelili najviše bodova za neutralne korelacije kriterij – koncept (Tablica 3-8), što je pokazatelj da su u slučaju tog koncepta imali i najviše nepoznanica o konceptu, možda funkcionalnim značajkama koncepta ili nisu mogli odrediti ekološku prihvatljivosti ili neprihvatljivost po, za studiju značajno velikog broja kriterija.

Rezultati prvog i drugog rangiranja pokazuju da su ispitanici rangirali koncepte C i B kao ekološki najprihvatljivije od ukupno pet razmatranih koncepata. Rezultati prvog rangiranja ostalih koncepata ne pokazuju tako jednoznačne rezultate. Naime, konceptu D jedan dio ispitanika dodjeljuje rang 2 (kao drugom po redu ekološki najprihvatljivijem konceptu), a drugi jednako statistički značajan dio ispitanika taj koncept smješta na zadnje mjesto kao ekološki neprihvatljiv koncept.

Rezultati prvog rangiranja gdje su sudionici rangirali koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti i rezultati drugog rangiranja gdje su to učinili koristeći semi-kvantitativnu metodu i kriterije ekološke prihvatljivosti propisane *Eco-Design Value* smjernicama [82], pokazuju da je drugim po redu rangiranjem provedenim u studiji slučaja moguće dobiti koherentnije rezultate rangiranja, nego li je to slučaj kada se ispitanici nisu služili semi-kvantitativnom metodom i kriterijima ekološke prihvatljivosti [63]. Ovaj ishod vrednovanja mogao je biti očekivan zbog toga što u prvom rangiranju sudionici subjektivno rangiraju koncepte, a u drugom rangiranju imaju ujednačenije kriterije zbog eksplicitnih kriterija ekološke prihvatljivosti. Skup koncepata pranja rublja koje su sudionici studije vrednovali i rangirali kvalitativno prema ekološkoj prihvatljivosti odabrani su kao reprezentativni slučaj temeljem kojeg će se provesti validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja koji čine glavne doprinose istraživanja opisanog u ovoj doktorskoj disertaciji.

Po završetku prvog i drugog vrednovanja konstruktori su bili upućeni na ispunjavanje ankete o rezultatima vrednovanja, konceptima i studiji općenito. Pitanja u anketi i odgovori sudionika studije priloženi su na kraju ove doktorske disertacije (Prilog 1). Rezultati vrednovanja u prvom dijelu studije ukazuju da konstruktori nisu jedinstveno odgovorili na pitanje o manje ekološki povoljnim koncepcijskim rješenjima, odnosno o tome koje koncepte smatraju ekološki neprihvatljivima. Tablica 3-8 ukazuje da su mišljenja bila podijeljena između tri koncepta; koncepta A, D i E. Kada su vrednovali ove koncepte prema eksplicitno ponuđenim kriterijima ekološke prihvatljivosti u drugom dijelu studije, konstruktori su zabilježili značajno velik broj nepoznanica o korelaciji kriterij – koncept (Tablica 3-8). Prema tome, vrednovali su ekološku prihvatljivost ovih koncepata unatoč manjku detaljnijih podataka o konceptima ili podacima o kriterijima ekološke prihvatljivosti. Odgovori i komentari konstruktora koje su dali u anketi također govore o tome da nisu imali dostatno podataka o primjerice konceptu pranja rublja suhim ledom.

## 3.3. Rasprava studije slučaja i zaključci

Analiza je pokazala da u slučaju kada su kvalitativne ekodizajn smjernice korištene u svojstvu kriterija ekološke prihvatljivosti, postoji veća vjerojatnost pronalaženja konsenzusa

oko ekološki neprihvatljivih varijanti, nego u slučaju kada je vrednovanje bilo temeljeno na subjektivnim kriterijima ekološke prihvatljivosti sudionika studije.

Tijekom rangiranja koncepata u prvom rangiranju, gdje su sudionici imali zadatak rangirati koncepte proizvoda prema ekološkoj prihvatljivosti vodeći se isključivo subjektivnim mišljenjem pri vrednovanju, možemo govoriti o nastanku situacije poznate kao Arrowov ili Condorcetov paradoks [291]. Rezultati rangiranja prema pravilu većine ukazuju na nekonzistentnost vrednovanja unatoč poznatim i jasno definiranim kriterijima, tj. nema konsenzusa o Condorcetovom pobjedniku.

Rezultati drugog rangiranja tijekom kojeg su se ispitanici služili semi-kvantitativnom metodom za dodjeljivanje ocjena prema kriterijima propisanima *Eco-Design Value* smjernicama [82] ukazuju na to da takav uređeni sustav vrednovanja kojim se pripisuju kriteriji i način ocjenjivanja prema njima dovodi do boljih rezultata, odnosno potencijalno boljih rezultata rangiranja za postizanje konsenzusa o vrednovanju koncepata, nego kada tog sustava nije bilo (prvi krug rangiranja). To je posebno očito prilikom rangiranja koncepata koje su sudionici smatrali ekološki neprihvatljivim.

Studija slučaja kao takva je kvalitativna metoda istraživanja, te je time potrebno uzeti u obzir faktore na koje se nije moglo utjecati nacrtom studije, a koji potencijalno mogu imati utjecaj na rezultate studije slučaja.

*1. Informacije o konceptima proizvoda*

Koncepti koje su ispitanici vrednovali u studiji razlikuju se u detaljima i tehničkim rješenjima. U nekim slučajevima, koncept je definiran temeljem informacija o prototipu razvijenom za potrebe testiranja koncepta (koncept C), a u drugim slučajevima nedostaju ključne informacije o tehničkim rješenjima koncepta (koncept D). Skup koncepcijskih rješenja koji je predstavljen ispitanicima stoga sadrži koncepte koji su više i manje poznati sudionicima studije. Procjenjuje se da je razina tehničke nesigurnosti koncepata značajno varirala od koncepta do koncepta, što je moglo utjecati na ocjenu tehničke izvedivosti i pretpostavke o kvaliteti i učinkovitosti procesa pranja donesene od strane sudionika studije, te na ocjene ekološke prihvatljivosti pojedinih koncepata.

*2. Broj koncepata i redoslijed kojim su koncepti predstavljeni ispitanicima*

Informacije o konceptima podijeljene su ispitanicima na obrascima, te kako bi se omogućilo bilježenje dodjeljivanja bodova u drugom rangiranju redoslijed kojim su koncepti predstavljeni ispitanicima bio je predodređen nacrtom studije (redoslijed: A, B, C, D, E).

*3. Rangiranje u drugom krugu ispitanici su imali provesti temeljem pravila većine*

Ispitanici su u prvom krugu vrednovanja dobili uputu da rangiraju koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti, a kriteriji ekološke prihvatljivosti i način dodjeljivanja ranga konceptima nisu im bili eksplicitno zadani. U drugom krugu studije upućeni su da provedu vrednovanje i rangiranje istih koncepata na način da se vode uputama o dodjeljivanju bodova korelaciji koncept – kriterij ('+1', '0' ili '-1').

*4. Broj kriterija i redoslijed ocjenjivanja prema kriterijima u drugom krugu rangiranja*

*Eco-Design Value* smjernice [82] sastoje se od ukupno 50 smjernica (kriterija), te su one u potpunosti preuzete kao kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima su ispitanici u drugom krugu imali vrednovati koncepte.

*5. Redoslijed metoda rangiranja propisanih nacrtom studije slučaja (prvo rangiranje bez eksplicitnih kriterija ekološke prihvatljivosti i drugo rangiranje temeljeno na primjeni metode i kriterija ekološke prihvatljivosti koji su Eco-Design Value smjernice)*

Prvo rangiranje koncepata koje su proveli ispitanici rezultat je njihovog subjektivnog ocjenjivanja ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata. Kako su u tom trenutku već rangirali koncepte jednom, ta ocjena mogla je utjecati na rangiranje koje su u sljedećem koraku proveli koristeći se kriterijima ekološke prihvatljivosti i semi-kvantitativnom metodom pravila većine. Ipak, obzirom da je u drugom krugu vrednovanja bio potrebno vrednovati pet koncepata obzirom na 50 kriterija ekološke prihvatljivosti, a tek potom zbrojiti rezultate vrednovanja radi

rangiranja koncepata, zaključak je da su mogućnosti *namještanja* drugog rangiranja od strane sudionika bile minimalne i time zanemarive.

# 4. KRITERIJI I PRIJEDLOG METODE VREDNOVANJA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI

*U ovom poglavlju predstavljaju se kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Obzirom da je kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda uobičajenim metodama poput procjene životnog ciklusa proizvoda namijenjeno kasnijim fazama procesa konstruiranja, u ovom istraživanju razvijena je metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za fazu koncipiranja. Metoda je objašnjena na ilustrativnim primjerima.*

## 4.1. Motivacija za razvoj kriterija i metode

Fitch i Cooper [60] ukazuju na problem vrednovanja i usporedbe ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda koji su originalan dizajn. Takvi koncepti na inovativan način ostvaruju glavnu funkciju proizvoda što se očituje u parcijalnim funkcijama, fizikalnim efektima i radnim principima ili principijelnim rješenjima.

Analizom funkcija koncepata koji su originalni dizajn, Gilchrist [199] je uočio veći broj parcijalnih funkcija koncepata koji su originalni dizajn nego kod koncepata koji su adaptivni i varijantni dizajn. Iako veći broj parcijalnih funkcija može značiti i veći broj komponenata proizvoda (što će neposredno rezultirati dodatnim utjecajima na okoliš), ne može se općenito tvrditi da je broj parcijalnih funkcija jedini pokazatelj ekološke prihvatljivosti koncepta proizvoda. Bernstein i drugi [50], te Sakao [53] pokazali su da utjecaji na okoliš mogu biti koncentrirani u parcijalnim rješenjima kojima se ostvaruju parcijalne, odnosno sporedne funkcije proizvoda. Povezivanje utjecaja na okoliš i parcijalnih funkcija proizvoda može biti temelj za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda.

Za procjenu utjecaja na okoliš koja bi bila temelj vrednovanja ekološke prihvatljivosti nužno je generirati listu materijala proizvoda, znati proces proizvodnje, potrošnju energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda. Obzirom da su podaci o proizvodu koji bi omogućili procjenu utjecaja na okoliš dostupni tek u fazi detaljiranja, a koncepti koji su originalan dizajn uobičajeno nemaju referentnih proizvoda, metode koje su razvili Bernstein i drugi [50], Sakao [53] i Gilchrist [199] nisu prikladne za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata originalnog dizajna u konceptualnoj fazi.

Tijekom procesa konstruiranja, rješenje proizvoda mora zadovoljiti korisničke potrebe i zahtjeve koje determiniraju funkcionalne značajke rješenja [26], [123]. Životni vijek proizvoda je kriterij ekološke prihvatljivosti i to preko zahtjeva koji se odnose na performanse, kvalitetu, proizvodnju, pouzdanost proizvoda tijekom eksploatacije i rada, održavanja, reciklabilnosti i troškova [33]. Navedeni zahtjevi i kriteriji ekološke prihvatljivosti uzimaju se u obzir u kasnijim fazama razvoja proizvoda [33].

Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja podrazumijeva više-kriterijsko ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata. Kvalitativne metode zahtijevaju relativno veliko znanje i iskustvo pri korištenju tih metoda i alata, jer je interpretacija ekološke prihvatljivosti koncepata subjektivna. Ocjene koncepta prema ostalim kriterijima vrednovanja mogu utjecati na percepciju ekološke prihvatljivosti koncepta prilikom korištenja kvalitativnih metoda vrednovanja. Na vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata mogu utjecati ocjene koncepta prema drugim kriterijima vrednovanja kao što su troškovi, tehnička izvedivost i funkcionalni zahtjevi. Nedostatak

informacija o pojedinom konceptu proizvoda (za koje u pravilu nije provedena konstrukcijska razrada) također može utjecati na vrednovanje ekološke prihvatljivosti, te se ekološka prihvatljivost takvog koncepta može podcijeniti ili precijeniti.

Osim problema koji se javljaju pri vrednovanju koncepcijskog rješenja (koje je u pravilu apstraktno u ranim fazama procesa konstruiranja), u različitim fazama razvoja proizvoda postoje različiti zahtjevi za svaki oblik ishoda iz pojedine faze konstruiranja (od koncepta, preko definiranja oblika, materijala, strukture, detaljiranja i plana proizvodnje), te su i kriteriji za odlučivanje nakon svakog koraka različiti ovisno o tome radi li se o koncipiranju, oblikovanju, detaljiranju ili planiranju proizvodnje.

Prikupljanje informacija i vrednovanje koncepata prethode odlučivanju o konceptima [292]. Hansen [293] se bavio analizom procesa donošenja odluke o konceptu i razlozima zbog kojih se odlučivanje provodi. Odlučivanje se provodi zbog [293]:

- Odabira rješenja iz skupa mogućih rješenja ili alternativa,
- Potvrde odabira rješenja,
- Prikupljanja informacija o razmatranim rješenjima i pretraživanja skupa mogućih rješenja i alternativa,
- Utvrđivanja liste specifikacija, te
- Analize donesenih odluka i formulacije zaključka o konzistentnosti odluka ili ciljeva konstruiranja.

Istraživači Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [263] predlažu da se vrednovanje i procjena ekološke prihvatljivosti razmatranih ideja proizvoda provede putem *LCA* metoda, dakle kvantitativnim metodama procjene utjecaja proizvoda na okoliš. Takav pristup implicira razvoj razmatranih ideja, njihovo razrađivanje, upotpunjivanje i nadograđivanje barem do razine konstrukcijske razrade. U kasnijim fazama procesa konstruiranja smanjena je mogućnost uvođenja promjena s ciljem smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš, jer su odluke o koncepcijskom rješenju, funkcijama proizvoda, strukturi proizvoda i radnim principima proizvoda tada već donesene.

Analiza proizvoda i primjena metoda koje služe analizi proizvoda moguće su samo ukoliko postoji dovoljno podataka o proizvodu, odnosno ako su poznati ključni parametri proizvoda. U ranim fazama, odluke po pitanju kvalitete i uspješnosti proizvoda, te utjecaja na okoliš, donose se temeljem kvalitativnog vrednovanja, odnosno temeljem podataka koje kvalitativno opisuju proizvod [294]. Pri tom se uobičajeno ne razmatraju učinci životnog vijeka proizvoda zbog nedostatka pouzdanih podataka.

Pregledom literature i temeljem rezultata studije slučaja ustanovljeno je da postojeće metode nisu odgovarajuća potpora vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. Slično kao i u slučaju ekodizajn listi kriterija ekološke prihvatljivosti, vrednovanje ekološke prihvatljivosti pomoću *LiDS-Wheel* alata [147] ovisi o stručnosti i iskustvu korisnika alata [52]. Alati temeljeni na *QFD-u* razlikuju se od *LCA* alata po tome što se koriste prilikom definiranja i razmatranja specifikacija proizvoda [53].

Rezultati studije slučaja ukazuju da bi kvalitativni generički kriteriji ekološke prihvatljivosti koje su sudionici studije primijenili pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti, mogli biti primjereni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja. Metoda vrednovanja koja se temelji na kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti pokazala se boljim načinom vrednovanja od vrednovanja kada kriteriji nisu bili eksplicitno određeni. No, studija otvara sljedeća pitanja: 1) da li je broj kriterija odgovarajući, 2) da li je vrsta kriterija odgovarajuća i 3) da li je metoda vrednovanja kojom se rangiraju koncepcijska rješenja odgovarajuća za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi prilikom vrednovanja više od dva koncepcijska rješenja odjednom?

Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani kvalitativnim i semi-kvantitativnim metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata koje su bile kandidati za studiju slučaja (Tablica 3-1) propisuju razmatranje pojedinih aspekata ekološke prihvatljivosti proizvoda tijekom njegovog životnog ciklusa. Radi se o potrošnji energije ili materijala [147], strategijama za postizanje veće eko-efikasnosti [122], [146]) i smjernicama za ekološko prihvatljivo oblikovanje proizvoda [82]. Ove metode nisu primjerene za vrednovanje u konceptualnoj fazi jer kriteriji koje propisuju u velikoj mjeri zahtijevaju kvantificiranje utjecaja na okoliš ili značajki proizvoda koje ukazuju na taj utjecaj. Podaci o proizvodu koji su dostupni u konceptualnoj fazi uobičajeno nisu potpuni, a time ne omogućavaju konstruktorima da ocijene

ekološku prihvatljivost temeljem podataka o utjecajima na okoliš ili temeljem podataka o potrošnji materijala i energije tijekom životnog vijeka proizvoda.

Straton [295] smatra da je vrednovanje općenito usko povezano sa definicijom kvalitete i kapaciteta koji su svojstveni razmatranim rješenjima. Kvaliteta može biti određena uspoređivanjem skupa svojstvenih značajki rješenja sa skupom svojstvenih zahtjeva ili kriterija kvalitete.

Prema Stratonu [295], pojam kapaciteta se odnosi na učinak proizvoda ili rješenja proizvoda koji je moguće kvantificirati. Obzirom da kvantifikacija latentnih efekata na okoliš nije uobičajena tijekom konceptualne faze [115], kapacitet proizvoda je primjerenije izraziti pojmom koji bi opisivao svrhu i funkcionalnost proizvoda, te potencijal preliminarnog rješenja da ostvari neki zadani rad ili učinak. Podaci u obliku transformacija energije, materijala i signala koje proizvod treba ostvariti time su primjereniji pojmovi od kapaciteta, jer predstavljaju s jedne strane apstraktnu formulaciju zadaća proizvoda (transformaciju energije, materijala i signala, i izlazne tokove transformacija), a s druge strane konkretnu definiciju načina na koji će se te zadaće ostvarivati (fizikalni efekti i radni principi). Nastojanje da se zadovolje funkcionalni zahtjevi u pozadini je svakog daljnjeg odlučivanja o proizvodu, njegovim oblikovnim rješenjima, konstrukciji i komponentama, a radni principi i lanci fizikalnih efekata govore o tome kako će ti zahtjevi biti ostvareni, odnosno o koncepcijskom rješenju proizvoda.

Teorija tehničkih sustava ([64], [65], [66]) poslužila je kao teorijski okvir hipoteze istraživanja da je moguće provesti vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljem značajki transformacija operanada tehničkog procesa za određenu funkcijsku strukturu u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja.

Teorija tehničkih sustava bavi se artefaktima koji su nastali kao proizvod tehnike, tj. tehničkim sustavima za koje je bitno da poznajemo njihovo ponašanje, kao i metode i procese koji su zaslužni za njihov nastanak. Tehnički sustavi određeni su ulogom koju imaju u transformacijskom sustavu određenom tehničkim procesom i tehničkim sustavom koji su u interakciji s živim bićima i okolišem. Transformacijski sustav sastoji se od fizički opipljivih dijelova, kao i dijelova koji su u interakciji sa okolinom. Zadaća tog sustava je ostvariti glavnu

funkciju, te transformirati ulazne operande u izlazne kako bi tehnički sustav isporučio tražene fizikalne efekte tehničkom procesu, a uz pomoć određene tehnologije.

Operandi (energija, materijal ili signal) transformiraju se u tehničkom procesu, a podržani su efektima od strane čovjeka, okoliša ili tehničkog sustava. Iako postoji velik broj različitih tumačenja pojma funkcije i metoda kojima se propisuje način na koji se modeliraju funkcije proizvoda [296], usporedivost proizvoda ili koncepata proizvoda osigurava se tako da se razmatraju proizvodi ili koncepti sa istom glavnom funkcijom, odnosno svrhom.

Potrebe za ostvarivanje funkcije tehničkog sustava zadovoljene su određenim stanjem operanada (materijala, energije i informacija) čije se pretvorbe ili transformacije prikazuju tokovima istih. Željeno stanje operanada postiže se transformacijskim procesima iz postojećih (početnih) stanja operanada, unutar zadanog ili danog okoliša koji je od vanjskog svijeta ili okoliša odijeljen granicom sustava.

Prema definiciji značajki tehničkih artefakata (tehničkih proizvoda) [297] proizvodi su definirani funkcionalnim značajkama (ispunjavanju određenu funkciju i svrhu) i fizikalnim značajkama oblika. Određivanje funkcionalnosti proizvoda smatra se fundamentalnim korakom u konstruiranju i razvoju proizvoda [7], [11], [72], [164], [296]. Roth [298] propisuje posebne vektorske i geometrijske načine opisivanja funkcija proizvoda, Hubka i Eder [65] definiraju tvorbu organa, a Pahl i drugi [72] principijelna rješenja kao naredni korak nakon definiranja funkcija proizvoda.

Principijelna rješenja su prva indikacija forme, a principijelno rješenje mora biti konkretizirano pomoću geometrijskih značajki [299]. Radni principi, na prvoj razini konkretizacije proizvoda predstavljeni su upravo principijelnim rješenjima. Skup fizikalnih efekata (s geometrijskim i materijalnim karakteristikama) naziva se radnim principom. Fizikalni efekti su osnovne fizikalne značajke koje se mogu odrediti i opisati temeljnim zakonima održanja energije i materijala, te međusobno povezanih fizikalnih veličina.

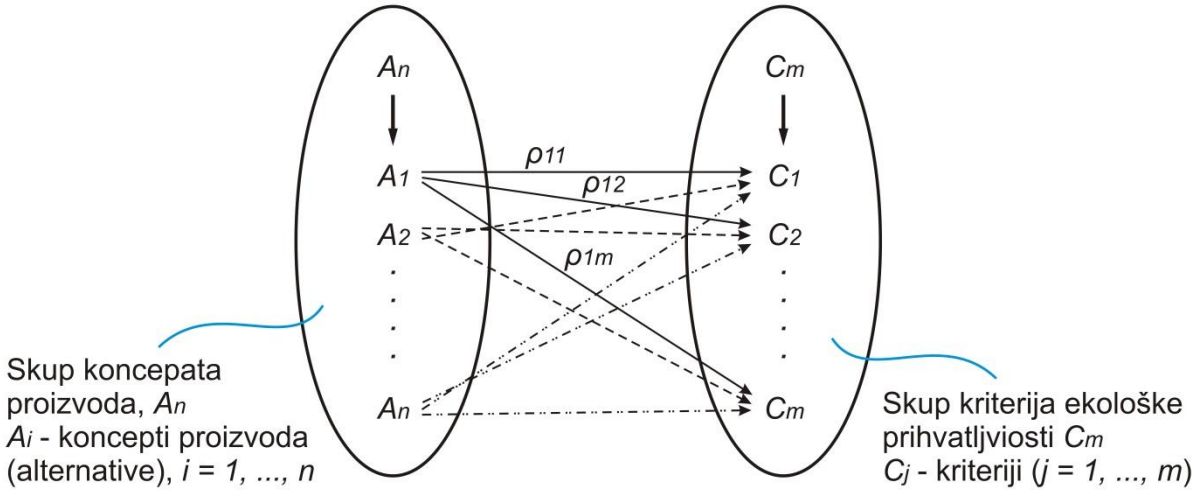
Analize lanaca efekata, latentnih tokova energije, materijala i signala prema okolišu te transformacija kojima su opisane pretvorbe ulaza u izlaze [72], odabrani su kao temelj vrednovanja ekološke prihvatljivosti stoga što je u konceptualnoj fazi često potrebno generirati koncepcijska rješenja koja su neutralna po pitanju oblikovanja i detaljiranja principijelnih

rješenja. Proces generiranja novih, kreativnih načina ostvarivanja parcijalnih rješenja može biti potpomognut raznim alatima, npr. primjenom morfološke matrice.

## 4.2. Metoda vrednovanja

Većina problema odlučivanja svodi se na razmatranje ključnih karakteristika koncepcijskih rješenja. Dobrota koncepcijskog rješenja temelji se na razmatranju svojstvenih značajki koncepta i uspoređivanju značajki koncepta prema kriterijima dobrote koncepcijskog rješenja. Vrednovanje koncepata u procesu konstruiranja uglavnom je više-kriterijsko, tj. dobrota koncepta vrednuje se temeljem razmatranja dobrote koncepata prema nekoliko različitih kriterija. Kriteriji vrednovanja koncepta mogu biti troškovi proizvodnje, stupanj zadovoljenja potreba kupaca, kvaliteta izrade, prilagođenost ciljnom tržišnom segmentu, rizici, ekološka prihvatljivost, utjecaji na okoliš, operativni troškovi i drugi kriteriji. Valja naglasiti i da pored nabrojanih generičkih kriterija vrednovanja koncepata postoje i drugi kriteriji koji se mogu definirati od strane konstrukcijskog tima, a koji mogu biti specifični za određeni proizvodni ili tržišni sektor (automobilska industrija, razvoj kućanskih aparata, prehrambena industrija itd.) ili određeno poduzeće već prema specifičnostima poslovnog modela poduzeća i procedura povezanih s izvođenjem razvojnih procesa u pojedinom poduzeću.

Slika 4-1 prikazuje korelaciju između skupa koncepcijskih rješenja i skupa kriterija prema kojima se svaki od razmatranih koncepata vrednuje. Skup kriterija uvjetovan je skupom značajki koncepcijskih rješenja. Značajke opisuju koncept, svrhu, tehnička rješenja, funkcije i funkcionalnost [300], te karakteristike koncepta.




Slika 4-1. Prikaz relacija između skupa koncepata i skupa kriterija vrednovanja (ilustrirano prema [301])

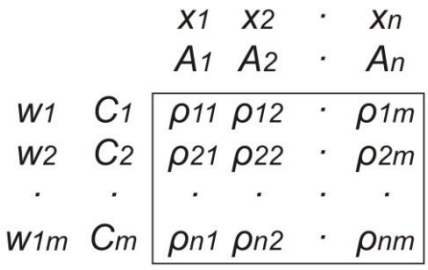
Preslikavanjem između skupa vrednovanih koncepata i skupa kriterija vrednovanja izvedena je matrica relacija $M_R$. Matrica relacija služi za prikaz ocjena dobrote koncepata $A_i$ prema kriterijima vrednovanja $C_j$ [301].

$$[M_R] = \begin{Bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdot & \rho_{m1} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdot & \rho_{m2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdot & \rho_{nm} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata promatra se kao problem više-kriterijskog vrednovanja. Pritom $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ je konačan skup koncepata proizvoda, odnosno alternativa koja se vrednuju. Svaki koncept proizvoda iz skupa $A$, moguće je vrednovati (ocijeniti) obzirom na $m$ kriterija ekološke prihvatljivosti $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, gdje je $C$ konačan skup kriterija ekološke prihvatljivosti. Skupovi $A$ i $C$ su jednako brojni (ekvipotentni) sa skupom prirodnih brojeva $N$ [302].

Ocjena ekološke prihvatljivosti koncepta $A_i$ (učinak koncepta u pogledu ekološke prihvatljivosti), obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti $C_j$ jednaka je *stupnju zadovoljenja kriterija* $x_j(A_i)$, $\forall A_i \in A$, $\forall C_j \in C$. Više-kriterijsko vrednovanje ocjenom ekološke prihvatljivosti za koncept $A \in A_n$ definirano je vektorom $x(A) = \{x_1(A), x_2(A), \dots, x_m(A)\}$,

koji se sastoji od pojedinačnih učinaka ili svojstva koncepta u pogledu svakih od $m$ kriterija ekološke prihvatljivosti.




Slika 4-2. Opći prikaz matrice odlučivanja [303]

Nedostatak tehnike vrednovanja pomoću matrice odlučivanja (Slika 4-2) je u tome što je kriterijima vrednovanja potrebno dodijeliti težinski koeficijent kojim se na kvantitativan način prikazuje važnost kriterija, donosno koliko pojedini kriterij doprinosi konačnoj ocjeni po svim kriterijima. Pritom vrijedi $w_j(C_j) = \{w_1(C_1), w_2(C_2), \dots, w_m(C_m)\}$, i $\sum_{j=1}^{j=m} w_j = 1$, odnosno zbroj težinskih faktora kriterija $\forall C_j \in C$ iznosi 1.

Težinski faktori kriterija određen je udio pojedinog kriterija u konačnoj ocjeni promatranog koncepta. Težinski koeficijenti koji se pridaju pojedinim kriterijima nemaju fizikalno značenje, već proizlaze iz iskustva ili su procijenjeni na subjektivan način. Time kvantitativna vrijednost dodijeljena kriterijima u obliku težinskih koeficijenata predstavlja subjektivno dodijeljenu ocjenu važnosti kriterijima vrednovanja [304].

U literaturi nisu opisani znanstveno utemeljeni razlozi zbog kojih bi neki kriteriji ekološke prihvatljivosti imali prevagu nad ostalima. Primjer tomu su kriteriji propisani ekodizajn metodama i smjernicama kod kojih težinski faktori važnosti kriterija nisu definirani (Tablica 3-1). Byggeth i Hochschorner [46] ne predlažu smjernice za dodjeljivanje kvantitativne ocjene kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti, ali zalažu se da takve smjernice i težinski koeficijenti važnosti kriterija budu razvijeni.

U teoriji odlučivanja postoji nekoliko metoda koje se razlikuju prema vrsti problema odlučivanja kojima su namijenjene (jedan ili više kriterija odlučivanja, razina nesigurnosti, područje primjene, itd.). De Boer [305] navodi šest osnovnih koraka koji su temelj metoda

vrednovanja i odlučivanja koje koriste pri odlučivanju o konceptima tijekom procesa konstruiranja.

Tablica 4-1. Koraci vrednovanja prema de Boeru [305]

| Korak | Opis |
|---|---|
| 1. | Definirati kriterije vrednovanja i njihove vrijednosne skale |
| 2. | Definirati težinske koeficijente svakog kriterija vrednovanja |
| 3. | Odabrati (ili definirati) pravilo odlučivanja temeljem kojeg će se donijeti odluka |
| 4. | Ustanoviti dobrotu svakog koncepta $e_{ij}(A_i)$ temeljem računanja svojstava koncepta $x_{ij}(A_i)$ i relativne važnosti kriterija $w_j$, te ukupnu vrijednost koncepta $V(A_i)$ |
| 5. | Usporediti dobrotu prema svakom od kriterija vrednovanja i za svaki koncept pojedinačno |
| 6. | Donijeti odluku o konceptu temeljem pravila odlučivanja. |

Metode vrednovanja koje su temeljene na koracima (Tablica 4-1) mogu se provesti pomoću matrice odlučivanja (Slika 4-2). Radi se o primjerice Pughovoj metodi (engl. *Datum method*) [14], Analizi troškovi-dobit (engl. *Cost-Benefit analysis*) [72], Ocjenjivanju koncepata (engl. *Concept Scoring*) [7] i drugima. Predložena metoda koristi matricu odlučivanja.

Vrednovanje je moguće provesti ordinarnim metodama (metode rangiranja i metode klasifikacije) i kardinalnim metodama (metode ocjenjivanja) [91]. Ordinarne metode rangiranja i klasifikacije dijele se na metode rangiranja alternacijom i metode rangiranja usporedbom koncepata u parovima. Rangiranjem prema kriterijima obrazlaže se argumentacija za izbor koncepata, najčešće jednog ili dva koncepta za daljnju razradu. Negativna karakteristika metoda rangiranja usporedbom koncepata u parovima (npr. većinsko pravilo [91]) je sklonost generiranju rezultata vrednovanja identičnom Arrowom teoremu [291]. Rang dviju ili više alternativa može biti istovjetan zbog uspoređivanja s ostalim alternativama iz skupa, a rezultati rangiranja kontradiktorni i nejasni. Za predloženu metodu odabrana je tehnika rangiranja alternacijom.

Pregledom literature je utvrđeno da ekodizajn metodama i alatima nije propisana važnost kriterija ekološke prihvatljivosti u cilju rangiranja alternativa. Treba naglasiti da je

istraživanjem prikazanom u ovoj disertaciji predviđena jednaka važnost svih predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti jer u literaturi nije nađeno opravdanje za različite težinske faktore kriterija.

Predložena metoda time je relativna što znači da rezultati rangiranja vrijede samo za skup koncepata koji se vrednuje. Promjenom skupa koncepata promijenit će se i rangiranje pojedinih koncepata.

Apsolutne metode vrednovanja [91] koriste se u slučajevima kada je moguće kvantificirati prag dobrote kriterija. Precizna i pouzdana kvantifikacija dobrote alternativa (procjena) provodi se tek u fazama nakon konceptualne faze [115] kada postoji dovoljno podataka o alternativi za donošenje zaključaka o alternativi temeljem kriterija. U obzir stoga dolaze samo metode vrednovanja koje ne zahtijevaju propisivanje relativne važnosti kriterija, odnosno daju koherentne rezultate i za slučaj jednakih relativnih važnosti kriterija vrednovanja.

Kardinalne metode za razliku od ordinarnih su metode ocjenjivanja, te stoga nisu pogodne za primjenu u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Kod metoda ocjenjivanja ocjena određenog rješenja ili alternative prikazana je numeričkom vrijednošću koja opisuje magnitudu preferencije određenog rješenja od strane osoba koje odlučuju o rješenju.

Disjunkcija ili konjunkcija odnosi se na odabir načina agregiranja kriterija tijekom više-kriterijskog vrednovanja [292]. Kod konjuktivnih metoda, vrednovanje prema svim kriterijima se razmatra paralelno i simultano, te su optimalna rješenja ona kod kojih postoji balans između dobrih i loših karakteristika rješenja, odnosno kompenzacija loših karakteristika dobrima [91]. Za predloženu metodu vrednovanja u obzir dolaze konjuktivne metode vrednovanja. 0 prikazuje karakteristike razmatranih metoda više-kriterijskog vrednovanja.

Tablica 4-2. Usporedba vrsta i karakteristika metoda vrednovanja i odlučivanja [292]

| Metode vrednovanja i odlučivanja o optimalnim koncepcijskim rješenjima | Karakteristike metode odlučivanja | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ordinarna | Kardinalna | Apsolutna | Relativna | Disjunktivna | Konjuktivna | Odabir | Eliminacija |
| Analiza troškovi - dobit [72] | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | |
| Ocjenjivanje koncepata [7] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | |
| Pughova metoda [14] | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | |
| Matrica odlučivanja [11] | ✓ | (✓) | ✓ | | | ✓ | ✓ | |
| Leksikografsko pravilo [91] | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | |
| Eliminacija po kriterijima [91] | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| *Selection Chart* [72] | ✓ | | | ✓ | ✓ | | (✓) | ✓ |
| Većinsko pravilo [91] | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | (✓) |
| Copelandovo pravilo [91] | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | |
| Suma rangova [91] | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | (✓) |
| Profil proizvoda [91] | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | |

Oznake: ✓ - Da, (✓) - Metodu je moguće prilagoditi vrsti odlučivanja uz minimalne izmjene

Predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti temeljiti će se na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti i metodi sume rangova. Rezultati predložene metode koristit će se za kombiniranje i poboljšavanje ili odabir koncepcijskih rješenja za daljnju razradu. Koraci predložene metode definirani su sukladno preporukama De Boera [305].

Tablica 4-3. Koraci predložene metode

| Koraci metode | Opis |
|---|---|
| 1. Definirati transformacije energije, materijala i signala, te sekundarne efekte prema okolišu za svako koncepcijsko rješenje | Transformacije energije, materijala i signala identificiraju i zapisuju u obliku lanaca efekata. Kao pomoć pri generiranju lanaca efekata preporučaju se sljedeće metode: izrada funkcijske strukture, modeliranje funkcija pomoću toka, katalozi fizikalnih efekata, analiza tehničkog procesa, analiza radnih principa i analiza principijelnih rješenja. |
| 2. Definirati matricu kriterija i koncepata | Definirano je pet kriterija ekološke prihvatljivosti te se prema vrijednosnim skalama računa dobrota svakog pojedinog koncepta. |
| 3. Izračunati dobrotu koncepata obzirom na svaki od pet značajki koncepata definiranih kriterijima vrednovanja | Značajke koncepata koje se razmatraju pri vrednovanju:<br>• Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu<br>• Broj pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu<br>• Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu<br>• Broj sekundarnih efekata prema okolišu<br>• Broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu |
| 4. Primijeniti sumu rangova | Pravilo odlučivanja temeljem kojeg će se donijeti odluka je suma rangova [91]. Prvo se konceptima dodjeljuje rang obzirom na vrednovanje prema pojedinom kriteriju. Rang dobrote koncepta je zbroj njegovih pojedinačnih rangova. Koncepti koji su najbolje rangirani prema najvećem broju kriterija su pobjednici. |
| 5. Analizirati rezultate vrednovanja i provjeriti konzistentnost koraka 1.-4. za svaki koncept | Usporediti dobrotu prema svakom od kriterija vrednovanja i za svaki koncept pojedinačno. |
| 6. Donijeti odluku o konceptu za daljnju razradu | Konačna odluka o konceptu donosi se temeljem rezultata rangiranja. |

## 4.3. Kriteriji ekološke prihvatljivosti predložene metode

Predloženom metodom predviđeni su sljedeći kriteriji ekološke prihvatljivosti:

1.) Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu

2.) Broj pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu

3.) Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu

4.) Broj sekundarnih efekata prema okolišu

5.) Broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu.

Pahl i drugi [72] navode smjernice za razvoj ekološki i u pogledu smanjenja troškova prihvatljivijih proizvoda. Za razvoj koncepcijskih rješenja proizvoda značajne su dvije smjernice za razvoj ekološki prihvatljivih (i u pogledu troškova prihvatljivih) rješenja u konceptualnoj fazi koje su predložili Pahl i drugi [72], a to su izbjegavati promjenu oblika energije i agregatnog stanja materijala prilikom definiranja funkcija proizvoda. U literaturi nisu pronađeni slučajevi gdje su ovi kriteriji formalizirani u obliku kriterija ekološke prihvatljivosti proizvoda i primijenjeni u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja prilikom vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja. Pahl i drugi [72] također predlažu razmatranje alternativnih fizikalnih efekata i radnih principa za ostvarivanje funkcija proizvoda.

Predloženi kriteriji vrednovanja ekološke prihvatljivosti omogućavaju vrednovanje temeljem značajki transformacija operanada tehničkog procesa (prema [66]), odnosno uspoređivanjem zahtjeva ekološke prihvatljivosti sa značajkama svojstvenim tehničkom sustavu.

Kako bi se definirali kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se tiču transformacija energije, materijala i informacija propisanih tehničkim procesom kojim se isporučuju željeni fizikalni efekti, definirani su kriteriji sukladno radu Pahl i drugih [72], u kojem su kriteriji za vrednovanje transformacija energije i informacija razmatrani zasebno od kriterija za vrednovanje transformacija u tehničkom procesu.

### *4.3.1. Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala*

Radi definiranja kriterija prema kojemu bi se moglo vrednovali promjene oblika energije opisane tehničkim procesom transformacije i implicitno funkcijama tehničkih sustava, prvo se pristupilo razmatranju definiciji kvalitete energije. Metode procjene eksergije i emergije sustava, opisuju energiju koju sustav razmjenjuje sa okolišem na način da je moguće i kvalitativno opisati odnos sustav – okoliš.

Prema popularnoj definiciji, energija je sposobnost nekog tijela ili mase da obavi rad [306]. U termodinamici, eksergija nekog sustava predstavlja maksimalni korisni rad otvorenog sustava koji se može postići tijekom procesa koji taj sustav dovodi u ravnotežu s nekim toplinskim spremnikom, u pravilu okolišem. Za razliku od energije, eksergija je potrošena energija u procesu pretvorbe uslijed čega dolazi do generiranja entropije. Eksergija $E_x$ može se izraziti preko entropije $\Delta S$ , te vrijedi jednadžba (4) [307]:

$$\delta E_x = T_o \sum \Delta S \quad [J] \tag{4}$$

gdje je $T_o$ temperatura okoline. Eksergija se koristi pri analizi procesa u industriji, procjeni potrošnje resursa i materijala, te procjeni utjecaja na okoliš.

Coatanéa [252] i Medyna [253] koriste eksergiju kao termodinamičku značajku energije kako bi opisali proizvode kao sustave koji uzrokuju utjecaje na okoliš uslijed neminovnog povećanja entropije. Metodologije koje koriste eksergiju u svrhu procjene utjecaja na okoliš ne razlikuju između kvalitete različitih oblika energije (kinetičke, mehaničke, nuklearne, solarne itd.), te obnovljivih ili neobnovljivih vrsta energije. Pritom, pretvorba energije iz jednog oblika u drugi regulirana je prvim zakonom termodinamike o očuvanju i neuništivosti energije u termodinamičkim i ostalim procesima pretvorbe energije.

S druge strane, emergija je sva energija koja je potrošena za dobivanje pojedinog resursa [243]. Primjerice, emergija fosilnih goriva uključuje i energiju Sunca koja je bila potrebna za nastanak fosilnih goriva. Analiza emergije kao metoda energetske analize sustava koristi se za usporedbu dvaju ili više sustava uzimajući u obzir energiju koja se koristi ne samo u razmatranom procesu, nego i energiju koja je bila potrebna za nastanak energije koja indirektno sudjeluje u procesu pretvorbe. Odum [70] je definirao emergiju kao količinu solarne energije

potrebnu za proizvodnju energije, proizvoda ili usluge. Što je veća emergija potrebna za proizvodnju i održanje određene energije, proizvoda ili usluga, to je veći utjecaj na okoliš [243].

Analiza emergije nekog općenitog sustava [308] obuhvaća procjenu djelovanja eko-sustava, djelovanja čovjeka i njegovih aktivnosti i energije potrošene na održavanje sustava. Analiza emergije sustava koristi se za određivanje pokazatelja održivosti nekog geografski određenog područja, a primjena te metode nije uobičajena tijekom razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda [256]. U jednadžbi (5), solarna emergija određenog oblika energije ($E_m$) izražena je kao produkt eksergije ($E_x$) i faktora solarne transformabilnosti oblika energije $f_{TR}$.

$$E_m = E_x * f_{TR} \quad [seJ] \tag{5}$$

Kako bi se osigurala usporedivost sustava analiziranih metodom analize emergije sustava, razvijeni su faktori pretvorbe oblika energije u jedinice solarne emergije, tzv. faktori transformabilnosti oblika energije [243]. Za potrebe definiranja kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi se odnosio na vrednovanje ekološke prihvatljivosti pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi, u prikazanom istraživanju korišteni su faktori pretvorbe oblika energije u jedinice solarne emergije [70]. Faktor pretvorbe oblika energije je količina solarne energije potrebne da zamijeni 1 džul korisne energije drugog oblika energije. Tablica 4-4 prikazuje faktore transformabilnosti oblika energije metode analize emergije energetskih sustava. Faktori pretvorbe oblika energije u jedinicama solarne emergije mogu se naći u literaturi [70], [243] i [309].

Tablica 4-4. Primjeri faktora pretvorbe oblika energije (transformabilnosti) [70], [243], i ekvivalentne solarne jedinice emergije [309]

| Br. | Oblik energije → (faktor solarne transformabilnosti oblika energije, *seJ/J*) | Ekvivalentni oblici energije kriterija vrednovanja eko-transformabilnosti oblika energije |
|---|---|---|
| 1 | Energija Sunca (solarna energija, svjetlosna energija, energija ultraljubičastog zračenja Sunca) → (1,0) | Solarna energija |
| 2 | Latentna toplinska energija → (12,5) | Latentna toplinska energija |
| 3 | Prosječna kinetička energija vjetra → (620) | Latentna kinetička energija |
| 4 | Energija fotosinteze (toplinska i kemijska energija, raspršena, niske kvalitete i energetske efikasnosti) → (900) | Latentna kemijska energija, svjetlosna energija |
| 5 | Energija vjetra → (2 450) | Kinetička energija |
| 6 | Energija iz heterogenih organskih materijala → (4 400) | Energija iz heterogenih organskih materijala |
| 7 | Geotermalna i vulkanska toplina → (12 000) | Toplinska energija |
| 8 | Kemijska energija (energija uslijed razlika u *pH* vrijednostima u rijekama i kiši) → (15 000) | Kemijska energija |
| 9 | Mehanička energija → (29 000) | Mehanička energija |
| 10 | Potencijalna energija rijeka → (47 000) | Potencijalna energija |
| 11 | Energija valova → (51 000) | Energija valova (ultrazvučnih valova, ...) |
| 12 | Energija goriva → (24 000 - 200 000),<br>npr. drvo → (11 000), ugljen → (40 000), prirodni plin → (48 000), nafta → (54 000), etanol → (60 000), benzin → (66 000) | Energija goriva |
| | | Energija iz homogenih anorganskih materijala |
| 13 | Energija plime i oseke (zbroj emergije potencijalne energije oceana, topline Zemljine kore, solarne energije emitirane prema oceanu i emergije plime i oseke) → (74 000) | - |
| 14 | Prosječna kemijska energija u rijekama → (81 000) | - |
| 15 | Elektromagnetska energija → (-) | Elektromagnetska energija |
| 16 | Električna energija → (173 000) | Električna energija |
| 17 | Nuklearna energija → (200 000) | Nuklearna energija |
| 18 | Prosječna energija rijeka → (400 000)<br>Energija morskih struja → (18 400 000) | - |
| 20 | Energija u homogenim anorganskim materijalima (proteini) → (1 000 000 000) | Biološka energija |
| 21 | Ljudska snaga, usluge → (80 000 - 5 000 000 000) | Ljudska snaga, usluge |
| 22 | Informacije → (10 000 - 10 000 000 000 000) | Signal, informacije |

Tablica 4-5. Faktori za pretvorbu oblika energije u jedinice solarne emergije [70], [311]

| Oznaka | Oblik energije | Kvaliteta energije | $f_{TR}$ (seJ/J) - faktor solarne transformabilnosti oblika energije | $f_{TR}$ (seJ/J), logaritamsko mjerilo |
|---|---|---|---|---|
| $E_{So}$ | Solarna | Niska | 1 | 0 |
| $E_{LH}$ | Latentna toplinska | | 12 | 1,08 |
| $E_W$ | Energija vjetra, latentna kinetička | | 620 | 2,79 |
| $E_{LCh}$ | Latentna kemijska, energija fotona, svjetlosna | | 900 | 2,95 |
| $E_{HeO}$ | Energija heterogenih organskih materijala | | 4 400 | 3,64 |
| $E_H$ | Toplinska energija | | 12 000 | 4,08 |
| $E_{Ch}$ | Kemijska energija | | 15 000 | 4,18 |
| $E_{WT}$ | Energija valova, plime i oseke | | 19 000 | 4,28 |
| $E_{Me}$ | Mehanička energija | | 29 000 | 4,46 |
| $E_F$ | Energija goriva | | 38 000 | 4,58 |
| $E_P$ | Potencijalna energija | | 47 000 | 4,67 |
| $E_K$ | Kinetička energija | | 55 000 | 4,74 |
| $E_{HoO}$ | Energija homogenih organskih materijala | | 90 000 | 4,95 |
| $E_A$ | Energija anorganskih materijala | | 110 000 | 5,04 |
| $E_{EM}$ | Elektromagnetska energija | | 140 000 | 5,15 |
| $E_E$ | Električna energija | | 170 000 | 5,23 |
| $E_N$ | Nuklearna energija | | 200 000 | 5,30 |
| $E_B$ | Biološka energija | | 1 000 000 000 | 7,00 |
| $E_{Hu}$ | Ljudska snaga, usluge | | 2 500 000 000 | 9,40 |
| $E_I$ | Informacija, signal | Visoka | 5 000 000 000 000 | 12,70 |

Prema principu maksimiziranja snage [310], pretvorbe kojima se maksimizira tok korisne energije su energetski efikasnije i povoljnije pretvorbe [308]. Pretvorbe oblika energije koje su prema Odumovoj hijerarhiji oblika energije [70] niže kvalitete, te se pretvorbom

generiraju oblici energije više kvalitete su ekološki prihvatljivije pretvorbe. To je stoga što se radi o pretvorbama energija niže emergije u više, čime se potencijalno ostvaruje i više korisnog rada, odnosno potrošnja resursa je manja, nego ako se radi o pretvorbi oblika energije više kvalitete u oblik energije niže kvalitete. Tablica 4-5 prikazuje oblike energije i pripadajuće faktore solarne transformabilnosti. Faktori transformabilnosti oblika energije koriste se pri analizi emergije sustava [243].

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti pretvorbi oblika energije temelji se na izračunavanju faktora eko-efektivnosti pretvorbe. Eko-efektivnost pretvorbe je kvocijent faktora solarne transformabilnosti izlaznog oblika energije i faktora solarne transformabilnosti oblika energije (koji mogu biti energija, materijal ili signal).

$$\epsilon_{TR} = f_{TR_O}/f_{TR_I} \tag{6}$$

U jednadžbi (6), $\epsilon_{TR}$ je eko-efektivnost pretvorbe (transformabilnost) procesa pretvorbe energije. $f_{TR_O}$ je faktor transformabilnosti pretvorbe izlaznog oblika energije. $f_{TR_I}$ je faktor transformabilnosti pretvorbe oblika energije, materijala ili informacije (signala) koja je transformirana u drugi (željeni) oblik energije.

Eko-efektivnost pretvorbe (transformacije) jednog oblika energije u drugi definirana je u ovom istraživanju radi vrednovanja temeljem kriterija koji govori o ekološkoj prihvatljivosti pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi. Vrijednosti za izračun izvedene su iz faktora transformabilnosti oblika energije.

Potrebno je naglasiti da se kriterij eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije i signala odnosi na kvalitetu pretvorbe energije obzirom na solarnu transformabilnost izraženu u jedinicama solarne energije, a ne na energetsku efikasnost pretvorbi energije [312]. Eko-efektivnost pretvorbi energije kako je definirana u istraživanj prikazanom u ovoj disertaciji odnosi se na kvalitetu energije i ovisi o tzv. *smjeru* pretvorbe, te razini kvalitete ulaznog i izlaznog oblika energije transformacijskog procesa opisanom faktorom transformabilnosti oblika energije (Tablica 4-5). Kvaliteta pojedinog oblika energije razmatra se obzirom na faktor transformabilnosti oblika energije izražen u jedinicama solarne energije.

Tablica 4-6 sadrži podatke o kombinacijama ulazno-izlaznih koeficijenata oblika energije. Koeficijenti, tj. teorijska eko-efektivnost pretvorbe ulaznog oblika energije u izlazni oblik energije definirani su temeljem jednadžbi (6) i (7). Koeficijenti u Tablici 4-6 izraženi su kao logaritmi vrijednosti radi lakšeg izračuna sume eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala u slučaju većeg broja koncepata za usporedbu i vrednovanje. Jednadžba (7) prikazuje teorijsku eko-efektivnost pretvorbi energije i signala.

$$\epsilon_{TR} = \log(TR_O) - \log(TR_I) \tag{7}$$

Iznosi parcijalnih solarnih efektivnosti sumiraju se kako bi se dobio ukupan zbroj solarnih eko-efektivnosti pretvorbi energija koncepcijskog rješenja. Time se omogućava usporedivost koncepcijskih rješenja prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala.

$$S_{\epsilon_{TR_k}}(A_i) = \sum_{j=0}^{j=k} \epsilon_{TR_k}(A_i) \tag{8}$$

U jednadžbi (8), $S_{\epsilon_{TR}}$ je suma eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije iz jednog oblika u drugi ($\epsilon_{TR}$), gdje je $k$ ukupni broj pretvorbi oblika energije koncepta $A_i$. Vrednovanje se provodi temeljem modela za agregiranja parcijalnih eko-efektivnosti (solarnih transformabilnosti) koncepta naziva aditivna vrijednosna funkcija (eng. *additive value function*) [313]. Za primjenu ovog modela nužna je pretpostavka da su pretvorbe energije, materijala i signala, odnosno vrijednosti dobrote (eko-efektivnosti) koje ih opisuju, međusobno nezavisne (tj. nisu uvjetovane redoslijedom, vrstom ili izostankom pretvorbi). Ta pretpostavka je primjenjiva u ovom slučaju jer zadovoljava uvjet da model agregiranja bude primjenjiv za najrazličitije lance efekata i kombinacije pretvorbi energije, materijala i signala.

Rezultat aditivne vrijednosne funkcije lako je interpretirati u slučaju usporedbe dvaju ili više rezultata. Radi efikasnijeg izračuna, faktori transformabilnosti izraženi su kao logaritamska vrijednost. To omogućava zbrajanje i oduzimanje faktora transformabilnosti oblika energije, što su jednostavnije matematičke operacije, nego u slučaju originalnih faktora transformabilnosti u tisućama solarnih jedinica energije po 1 džulu korisne energije.

Tablica 4-6. Teorijska eko-efektivnost transformabilnosti oblika energije (oznake: Tablica 4-5)

| $TR_O$ – Teorijska eko-efektivnost pretvorbi energije i signala izlaznog oblika energije ↓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | $TR_I$ – Teorijska eko-efektivnost pretvorbi energije i signala ulaznog oblika energije ↑ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_{So}$ | $E_{LH}$ | $E_W$ | $E_{LCh}$ | $E_{HeO}$ | $E_H$ | $E_{Ch}$ | $E_{WT}$ | $E_{Me}$ | $E_F$ | $E_P$ | $E_K$ | $E_{HoO}$ | $E_A$ | $E_{EM}$ | $E_E$ | $E_N$ | $E_B$ | $E_{Se}$ | $E_I$ | $E_{So}$ | $E_{LH}$ | $E_W$ | $E_{LCh}$ | $E_{HeO}$ | $E_H$ | $E_{Ch}$ | $E_{WT}$ | $E_{Me}$ | $E_F$ | $E_P$ | $E_K$ | $E_{HoO}$ | $E_A$ | $E_{EM}$ | $E_E$ | $E_N$ | $E_B$ | $E_{Se}$ | $E_I$ |
| 0 | 1,08 | 2,79 | 2,95 | 3,64 | 4,08 | 4,18 | 4,28 | 4,46 | 4,58 | 4,67 | 4,74 | 4,95 | 5,04 | 5,15 | 5,23 | 5,3 | 7 | 9,4 | 12,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -1,08 | 0 | 1,71 | 1,88 | 2,56 | 3 | 3,1 | 3,2 | 3,38 | 3,5 | 3,59 | 3,66 | 3,88 | 3,96 | 4,07 | 4,15 | 4,22 | 5,92 | 8,32 | 11,62 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -2,79 | -1,71 | 0 | 0,16 | 0,85 | 1,29 | 1,38 | 1,49 | 1,67 | 1,79 | 1,88 | 1,95 | 2,16 | 2,25 | 2,35 | 2,44 | 2,51 | 4,21 | 6,61 | 9,91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -2,95 | -1,88 | -0,16 | 0 | 0,69 | 1,12 | 1,22 | 1,32 | 1,51 | 1,63 | 1,72 | 1,79 | 2 | 2,09 | 2,19 | 2,28 | 2,35 | 4,05 | 6,44 | 9,74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -3,64 | -2,56 | -0,85 | -0,69 | 0 | 0,44 | 0,53 | 0,64 | 0,82 | 0,94 | 1,03 | 1,1 | 1,31 | 1,4 | 1,5 | 1,59 | 1,66 | 3,36 | 5,75 | 9,06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,08 | -3 | -1,29 | -1,12 | -0,44 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,38 | 0,5 | 0,59 | 0,66 | 0,88 | 0,96 | 1,07 | 1,15 | 1,22 | 2,92 | 5,32 | 8,62 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,18 | -3,1 | -1,38 | -1,22 | -0,53 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,29 | 0,4 | 0,5 | 0,56 | 0,78 | 0,87 | 0,97 | 1,05 | 1,12 | 2,82 | 5,22 | 8,52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,28 | -3,2 | -1,49 | -1,32 | -0,64 | -0,2 | -0,1 | 0 | 0,18 | 0,3 | 0,39 | 0,46 | 0,68 | 0,76 | 0,87 | 0,95 | 1,02 | 2,72 | 5,12 | 8,42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,46 | -3,38 | -1,67 | -1,51 | -0,82 | -0,38 | -0,29 | -0,18 | 0 | 0,12 | 0,21 | 0,28 | 0,49 | 0,58 | 0,68 | 0,77 | 0,84 | 2,54 | 4,94 | 8,24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,58 | -3,5 | -1,79 | -1,63 | -0,94 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,12 | 0 | 0,09 | 0,16 | 0,37 | 0,46 | 0,57 | 0,65 | 0,72 | 2,42 | 4,82 | 8,12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,67 | -3,59 | -1,88 | -1,72 | -1,03 | -0,59 | -0,5 | -0,39 | -0,21 | -0,09 | 0 | 0,07 | 0,28 | 0,37 | 0,47 | 0,56 | 0,63 | 2,33 | 4,73 | 8,03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,74 | -3,66 | -1,95 | -1,79 | -1,1 | -0,66 | -0,56 | -0,46 | -0,28 | -0,16 | -0,07 | 0 | 0,21 | 0,3 | 0,41 | 0,49 | 0,56 | 2,26 | 4,66 | 7,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -4,95 | -3,88 | -2,16 | -2 | -1,31 | -0,88 | -0,78 | -0,68 | -0,49 | -0,37 | -0,28 | -0,21 | 0 | 0,09 | 0,19 | 0,28 | 0,35 | 2,05 | 4,44 | 7,74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -5,04 | -3,96 | -2,25 | -2,09 | -1,4 | -0,96 | -0,87 | -0,76 | -0,58 | -0,46 | -0,37 | -0,3 | -0,09 | 0 | 0,1 | 0,19 | 0,26 | 1,96 | 4,36 | 7,66 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -5,15 | -4,07 | -2,35 | -2,19 | -1,5 | -1,07 | -0,97 | -0,87 | -0,68 | -0,57 | -0,47 | -0,41 | -0,19 | -0,1 | 0 | 0,08 | 0,15 | 1,85 | 4,25 | 7,55 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -5,23 | -4,15 | -2,44 | -2,28 | -1,59 | -1,15 | -1,05 | -0,95 | -0,77 | -0,65 | -0,56 | -0,49 | -0,28 | -0,19 | -0,08 | 0 | 0,07 | 1,77 | 4,17 | 7,47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -5,3 | -4,22 | -2,51 | -2,35 | -1,66 | -1,22 | -1,12 | -1,02 | -0,84 | -0,72 | -0,63 | -0,56 | -0,35 | -0,26 | -0,15 | -0,07 | 0 | 1,7 | 4,1 | 7,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -7 | -5,92 | -4,21 | -4,05 | -3,36 | -2,92 | -2,82 | -2,72 | -2,54 | -2,42 | -2,33 | -2,26 | -2,05 | -1,96 | -1,85 | -1,77 | -1,7 | 0 | 2,4 | 5,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -9,4 | -8,32 | -6,61 | -6,44 | -5,75 | -5,32 | -5,22 | -5,12 | -4,94 | -4,82 | -4,73 | -4,66 | -4,44 | -4,36 | -4,25 | -4,17 | -4,1 | -2,4 | 0 | 3,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -12,7 | -11,62 | -9,91 | -9,74 | -9,06 | -8,62 | -8,52 | -8,42 | -8,24 | -8,12 | -8,03 | -7,96 | -7,74 | -7,66 | -7,55 | -7,47 | -7,4 | -5,7 | -3,3 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

### 4.3.2. Broj pretvorbi energije i signala

Gilchrist i drugi [35] proučavali su kako funkcije, tokovi materijala i energije proizvoda utječu na utjecaje proizvoda na okoliš. Proizvode su analizirali temeljem funkcijskih modela, provjeravajući hipotezu da je razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda moguć na razini modeliranja funkcija. Pokušali su dovesti u vezu utjecaje na okoliš komercijalnih proizvoda i funkcija proizvoda predstavljenih modelom funkcija. Pritom su utjecaji na okoliš odabrani kao pokazatelj ekološke prihvatljivosti (održivosti) proizvoda.

Proizvodi koje su Gilchrist i drugi [35] okarakterizirali kao inovativne, uzrokuju veće utjecaj na okoliš u usporedbi s arhetipskim varijantama istih proizvoda. Veći utjecaji na okoliš inovativnih proizvoda od arhetipskih inačica istog proizvoda Gilchrist i drugi [35] pripisuju nekonzistentnom unošenju podataka o proizvodima u *Design Repository* [208], varijabilnošću podataka, subjektivnoj interpretaciji značajki proizvoda ili objašnjavaju da su inovativni proizvodi kompleksniji u pogledu funkcija koje ostvaruju od arhetipskih inačica istog proizvoda. Veći broj funkcija može dovesti do većeg broja komponenata u slučaju inovativnih proizvoda, čime objašnjavaju i veći utjecaji na okoliš inovativnih proizvoda [199].

Kriterij broj pretvorbi energije i signala odabran je kao kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti jer ukazuje na razinu kompleksnosti koncepta. Veći broj pretvorbi ujedno ukazuje na veći broj komponenata proizvoda, te slijedno tomu veće utjecaje na okoliš. U ovom istraživanju optimalni koncepti su ekološki prihvatljivi koncepti rangirani relativno visoko obzirom na druge koncepte u skupu razmatranih koncepata. Optimalni koncepti vrednovani su relativno visoko obzirom po oba kriterija, tj. kriterij broj pretvorbi energije i signala i kriterij eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala.

### 4.3.3. Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu

Prema teoriji tehničkih sustava [64], tehnički sustav jedan je od konstitutivnih elemenata transformacijskog sustava. Konstruktori definiraju transformacije energije, materijala i signala i tehnički proces koji su potpomognuti određenom tehnologijom. Neki sekundarni efekti prema okolišu mogu se predvidjeti temeljem razmatranja tehničkog procesa i razmatranja koje fizikalne efekte tehnički sustav treba isporučiti tehničkom procesu. Sekundarni (latentni) efekti proizlaze s jedne strane iz definicije internih transformacija za

isporuku efekata od strane tehničkog sustava, a s druge strane postoje i oni koji se mogu definirati temeljem tehničkog procesa i odabrane tehnologije [73].

Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu definiraju se temeljem ulaznih podataka o energiji, materijalima i signalima i mogu se odrediti temeljem razmatranja lanaca efekata koji isporučuje tehnički sustav, a potrebni su za odvijanje tehničkog procesa. Transformacije energije, materijala i signala mogu se odrediti temeljem fizikalnih efekata, a oni se određuju putem fizikalnog, kemijskog ili biološkog zakona, relacije ili fenomena kojima su opisani [112]. Zbog toga se neki efekti prema okolišu mogu predvidjeti. Za sekundarne efekte prema okolišu koji se ne mogu predvidjeti u zadovoljavajućem vremenu i koristeći resurse na raspolaganju, potrebno je provesti procjenu rizika. Sekundarni efekti prema okolišu proizlaze iz (1) internih transformacija energije, materijala i signala koji su definirani za tehnički sustav, i iz (2) tehničkog procesa kojim se ostvaruje svrha isporučivanja transformacija operanada do željenog (ciljanog) stanja.

Definiranje transformacija energije, materijala i signala, te lanaca efekata značajno je za definiranje tehničkog sustava u konceptualnoj fazi, jer iz njih proizlaze principijelna rješenja tehničkog sustava i zahtjevi za oblikovanje tehničkog sustava. Temeljem principijelnih rješenja definiraju se organi i struktura proizvoda, te oblikovne, geometrijske i dimenzijske značajke tehničkog sustava. Odabir i kombinacija fizikalnih efekata temelj su za razvoj originalnih i varijantnih koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Koristeći kataloge fizikalnih efekata [298] konstruktorima je omogućeno pretraživanje i inspiracija pri razvoju tehničkih sustava. Žavbi i drugi [314] demonstrirali su da se fizikalni efekti pohranjeni u bazi mogu koristiti pri generiranju novih koncepata i tehničkih rješenja proizvoda.

Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu temelji se na vrednovanju prema kategorijama iz strategija gospodarenja otpadom [315]. Radi se o listi opcija za gospodarenje otpadom, te su definirane ekološki prihvatljive opcije. Provedena je stupnjevita podjela karakteristika za ekološki neprihvatljive opcije prema razinama toksičnosti i predviđenim načinima gospodarenja otpadom [74], [75], [76]. Tablica 4-7 prikazuje smjernice za vrednovanje visoke, srednje i niske ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu.

Tablica 4-7. Smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata [69]

<table>
<tr><td></td><td colspan="3">Ekološka prihvatljivost sekundarnih (latentnih) efekata</td></tr>
<tr><td></td><td>Visoka</td><td>Srednja</td><td>Niska</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Karakteristike</td><td>Nema otpada/<br>značajno malo otpada</td><td>Recikliranje ostvarivo s manjim izmjenama</td><td>Oporaba bez dobivanja energije</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Biorazgradiv i bio-kompatibilan obnovljivi resurs</td><td>Srednja bio-kompatibilnost i mogućnost kompostiranja</td><td rowspan="2">Odlaganje/ispuštanje inertnog otpada niske toksičnosti</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Moguće koristiti kao biogorivo</td></tr>
<tr><td>Ponovno korištenje</td><td rowspan="2">Odlaganje/ispuštanje otpada srednje toksičnosti</td></tr>
<tr><td>Reciklabilnost</td><td rowspan="2">Oporaba je moguća u cilju dobivanja energije</td></tr>
<tr><td></td><td>Otpad visoke toksičnosti i opasni otpad</td></tr>
</table>

Tablica 4-8 definirana je prema smjernicama za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata (Tablica 4-7), te sadrži podatke za ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu. Ocjena se dodjeljuje temeljem vrijednosne skale i značajki sekundarnih efekata prema okolišu prema kojima je moguće dati ocjenu ekološke prihvatljivosti određenog izlaznog efekta. Svakom od izlaznih (sekundarnih) efekata prema okolišu koji po vrsti mogu biti energija, materijal ili signal dodjeljuje se ocjena prema vrijednosnoj skali (Tablica 4-8).

Ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu koncepta određuje se prema jednadžbi:

$$S_{\epsilon_{EK}}(A_i) = \sum_{j=0}^{j=k} \epsilon_{EK_k}(A_i), \tag{9}$$

gdje je $S_{\epsilon_{EK}}$ suma ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu koncepta ($\epsilon_{EK}$), a $k$ je broj sekundarnih efekata prema okolišu koncepta $A$.

Tablica 4-8. Vrijednosna skala za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata prema okolišu

| Skala | Značajke ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu |
|---|---|
| +10 | Nema otpada/emisija |
| +9 | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) |
| +8 | Biorazgradiv i bio-kompatibilan obnovljivi resurs |
| +7 | Ponovno korištenje otpada/emisija (ili ostvarivo s manjim izmjenama) |
| +6 | Reciklabilan |
| (+5) | - |
| +4 | Recikliranje (energije ili materijala) ostvarivo s manjim izmjenama |
| +3 | Srednja bio kompatibilnost i mogućnost kompostiranja otpada/emisija |
| +2 | Moguće koristiti kao biogorivo |
| +1 | Oporaba (energije ili materijala) ostvariva s manjim izmjenama |
| (±0) | - |
| -1 | Oporaba bez povrata energije |
| -2 | Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti |
| -3 | Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti |
| -4 | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) |
| (-5) | - |
| -6 | Indirektno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti |
| -7 | Direktno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti |
| -8 | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) |
| -9 | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti |
| -10 | Direktno odlaganje/ispuštanje opasnog (visoko toksičnog/radioaktivnog) otpada/emisija |

### *4.3.4. Broj sekundarnih efekata prema okolišu*

Kriterij broj sekundarnih efekata prema okolišu definiran je kao kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda jer daje informaciju o broju sekundarnih efekata prema okolišu za koje je moguće odrediti ekološku prihvatljivost. Naime, koncept prema

ekološkoj prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu može biti visoko rangiran, no ukoliko se radi o velikom broju (i različitih) latentnih efekata prema okolišu, zbirna ocjena ekološke prihvatljivosti koncepta biti će niža, odnosno u skladu s optimalnom.

### *4.3.5. Broj promjena agregatnog stanja materijala*

Ovaj kriterij temelji se na broju promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu, a predložen je u obliku smjernice za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda [72]. Ovaj kriterij predložen je jer ukazuje ukoliko postoje posebni zahtjeve oblika ili materijala komponenata, te zahtjevi mehaničkih, toplinskih i drugih svojstava tehničkog rješenja. Pretpostavka je da komponente koje sudjeluju u ostvarivanju funkcija koje propisuju mogućnosti tehničkog sustava da podrži ovakvu funkciju, trebaju podržati promjenu agregatnog stanja bez promjene ili degradacije mehaničkih svojstava. Viši zahtjevi za materijalima ili oblikovanjem komponenata potencijalno znače i veće utjecaje na okoliš, jer je više energije, materijala i/ili resursa potrebno za oblikovanje takvih komponenata i sklopova tehničkih sustava.

## 4.4. Procedura rangiranja koncepata

Predloženom metodom više-kriterijskog vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava propisuje se pet kriterija ekološke prihvatljivosti (eko-efektivnost pretvorbi energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu, broj sekundarnih efekata prema okolišu i broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu). Procedura za vrednovanje ekološke prihvatljivosti uključuje ne-hijerarhijsko više-kriterijsko vrednovanje i potom rangiranje pomoću metode suma rangova [91].

Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije i signala temelji se na zbroju eko-efektivnosti transformacija energije i signala u tehničkom procesu, a temeljem jednadžbe (8). Faktori transformabilnosti koji su mjera dobrote transformacija energije i signala izračunavaju se za transformacije koje se prikazuju u obliku lanaca fizikalnih efekata. Tablica 4-6 prikazuje kombinacije transformacija oblika energije i signala i eko-efektivnost tih

transformacija. Prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, svakom sekundarnom efektu dodjeljuju se bodovi (Tablica 4-8).

Vrednovanje prema kriteriju broja promjena oblika energije, materijala i informacija u tehničkom procesu temelji se na prebrojavanju transformacija koje opisuju pretvorbe oblika energije i signala, te promjene fizikalnih ili kemijskih značajki materijala u tehničkom procesu. Vrednovanje prema kriteriju broja promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu provodi se prebrojavanjem transformacija kod kojih materijal u tehničkom procesu mijenja agregatno stanje (isparavanje vode, sublimacija, topljenje leda itd.). Ekološki prihvatljivija rješenja identificiraju se vrednovanjem prema kriterijima maksimalne eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije i signala i ekološke prihvatljivosti materijala, te minimalnog broja pretvorbi oblika energije i signala, broja sekundarnih efekata prema okolišu i broja promjena agregatnog stanja materijala.

Dobrota koncepata prema svakom od predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti zapisuju se u matricu odlučivanja. Metodom sume rangova konceptima se dodjeljuje rang, prvo prema svakom kriteriju ekološke prihvatljivosti zasebno, a zatim sumom rangova generiraju se rangovi koncepata. U slučaju da vrednovanje prema jednom ili više kriterija ukazuje na dva ili više koncepata s jednakim rangom, rangiranje se provodi prema pravilu alternacije. Prema tom pravilu, niži rang se dodjeljuje konceptu koji je prema ostalim kriterijima najniže rangiran.

Primjena metode i kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti demonstrirana je na dva primjera koncepcijskih rješenja; koncepti pranja rublja iz studije slučaja [63] i koncepti stolnog sata-budilice [50].

## 4.5. Primjena metode na primjeru koncepata pranja rublja

U konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava generirani koncepti mogu biti adaptivni, varijantni i originalan dizajn. Pregledom literature ustanovljen je nedostatak metoda namijenjenih vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata koji su originalan dizajn, te su slijedno tomu definirani ciljevi istraživanja kojima se propisuje razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi i vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata koji su originalan dizajn. Metodologijom istraživanja propisana je validacija nove

metode, te je stoga potrebno definirati reprezentativni skup koncepata na kojem će se provesti ispitivanje efektivnosti i efikasnosti nove metode. Prvi reprezentativni skup koncepata su koncepti pranja rublja iz studije u kojoj su magistri inženjeri strojarstva imali zadatak rangirati pet koncepata pranja i čišćenja rublja prema ekološkoj prihvatljivosti [63].

U studiji slučaja koja je provedena u istraživanju opisanom u ovoj disertaciji, koncepti koje su ispitanici vrednovali prema ekološkoj prihvatljivosti implementiraju različite radne principe odstranjivanja nečistoća u cilju ostvarivanja glavne funkcije pranja rublja i odstranjivanja nečistoća s tekstilnih tkanina. Studijom je potvrđeno da su koncepti koje su ispitanici analizirali prikladni kandidati za analizu problema vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]. Koncept pranja rublja pjenom deterdženta i vode (Slika 3-2), koncept odstranjivanja nečistoća ultrazvukom (Slika 3-3), koncept suhog pranja ugljikovim dioksidom (Slika 3-4), te koncept pranja rublja polimernim kuglicama (Slika 3-5) mogu se smatrati inovativnima zbog fizikalnih efekata koje isporučuju i principijelnih rješenja kojima su radni principi koncepata realizirani.

Primjena predložene metode u nastavku je opisana na primjeru vrednovanja koncepata pranja rublja. Opis primjene metode sadrži korake i upute za praktičnu primjenu metode.

Koncepti rangirani predloženom metodom:

1.) Koncept A – pranje praškastim deterdžentom i toplom vodom (60/90°C),

2.) Koncept B – pranje pjenom deterdženta i toplom vodom (30°C),

3.) Koncept C – ultrazvučno pranje tekućim deterdžentom i vodom,

4.) Koncept D[a] – čišćenje suhim ledom (sublimacijom ugljikovog dioksida),

5.) Koncept E – pranje polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom i vodom (30°C).

Primjena predložene metode započinje analizom koncepata (Tablica 4-3). Dodjeljivanje vrijednosti solarnih faktora transformabilnosti pretvorbama energije i signala, te vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu provode se obzirom na definirane lance fizikalnih efekata i identificirane sekundarne efekte prema okolišu. Koncepti mogu biti opisani nekim od formalnih načina zapisivanja funkcija, radnih principa, fizikalnih efekata i

principijelnih rješenja, npr. definiranjem tehničkog procesa [65], analizom funkcija [91] i funkcijskom dekompozicijom [72], morfološkom matricom [91] i principijelnim rješenjima [112].

Kako transformacije energije, materijala i signala te sekundarni efekti prema okolišu koncepta uobičajeno nisu prethodno definirani ili očiti, konstruktori ih identificiraju tijekom generiranja lanaca fizikalnih efekata gdje fizikalni efekti koncepta mogu biti opisani fizikalnim zakonima [112]. Cilj generiranja lanaca fizikalnih efekata je identificiranje pretvorbi energije, materijala i signala, te sekundarnih efekata prema okolišu kako bi se moglo pristupiti vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti predloženih ovim istraživanjem.

Postupak identifikacije pretvorbi energije, materijala i signala, zatim lanaca efekata i sekundarnih efekata prema okolišu, te dodjeljivanje vrijednosti ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima prema okolišu može biti zahtjevan za konstruktora. Razina zahtjevnosti zavisi o tome da li su dostupne informacije o konceptima i njihovim radnim principima, te znanju konstruktora o fizikalnim efektima i principijelnim rješenjima koncepta. Ukoliko te informacije o konceptima nisu dostupne, konstruktor ili tim konstruktora koji provode vrednovanje ekološke prihvatljivosti upućeni su provesti dodane analize koncepata kako bi u potpunosti razumjeli radne principe, način rada i tehnologiju, a time i mogli u sljedećem koraku identificirati lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte prema okolišu.

Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala provodi se temeljem podataka o teorijskoj eko-efektivnosti pretvorbi (Tablica 4-6), a vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu temeljem vrijednosne skale dobrote ovog kriterija (Tablica 4-8).

Primjena predložene metode može biti zahtjevna i u pogledu vremena ukoliko se radi o velikom broju funkcija, fizikalnih efekata i njihovih lanaca te sekundarnih efekata prema okolišu. Čak i kod najjednostavnijih proizvoda, fizikalni efekti koje ima isporučiti tehnički sustav ostvareni su interakcijom više različitih fizikalnih efekata i njihovih lanaca. Rihtaršič i drugi [316] preporučaju da se lanci efekata izdvoje i prikazuju odvojeno.

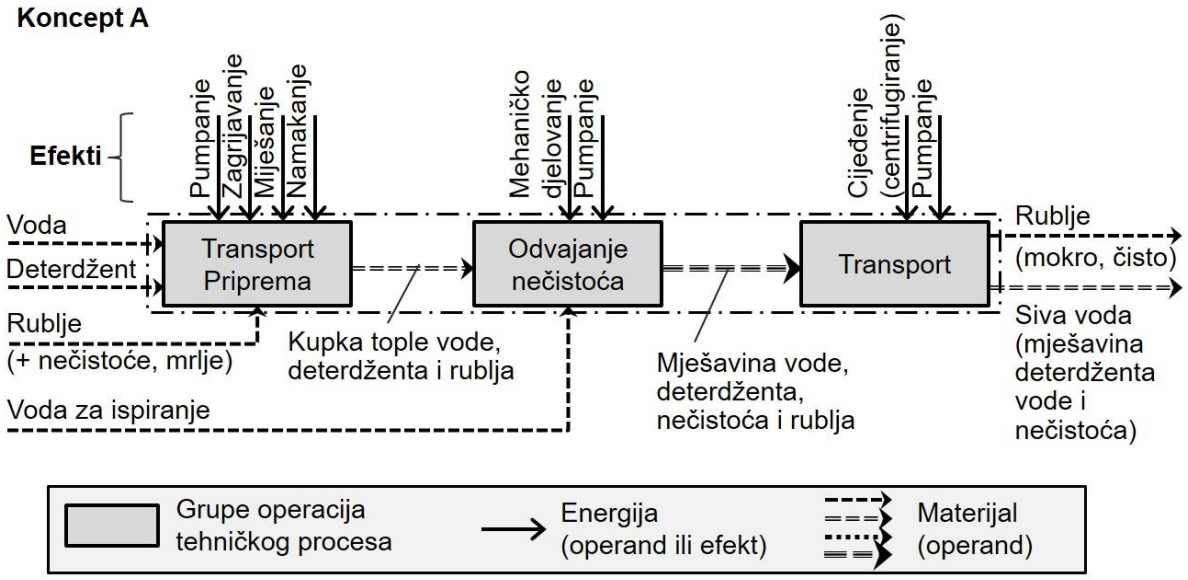
Prilikom definiranja sekundarnih efekata prema okolišu uputno je voditi se preporukama Chakrabarti i Johnsona [317]. Kao što će biti demonstrirano na primjeru

vrednovanja koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom, sekundarni efekti prema okolišu definiraju se nakon što su definirani fizikalni efekti i principijelna rješenja koncepata. Kao pomoć pri analizi koncepata, a u cilju identifikacije fizikalnih efekata i principijelnih rješenja, konstruktori mogu koristiti metode kao što su funkcijska dekompozicija i modeliranje funkcija pomoću toka [72].

### *4.5.1. Koncept pranja rublja A*

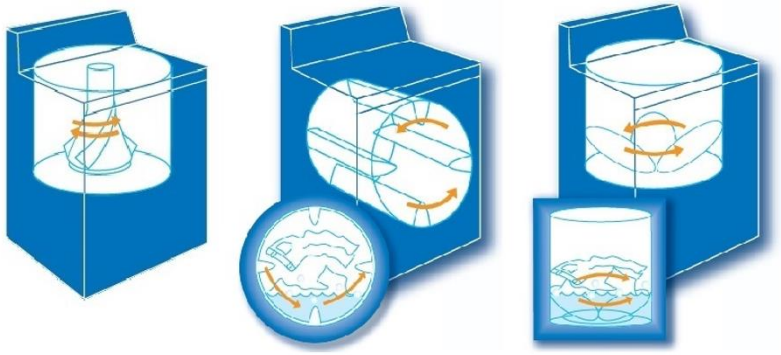
Pranje rublja i odstranjivanje nečistoća ostvaruje se djelovanjem praškastog deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom. Temperatura pranja može iznositi 60°C ili 90°C, već ovisno o programu pranja. Pranje rublja ostvaruje se kombinacijom mehaničkog, kemijskog i toplinskog djelovanja na tekstil i nečistoće (Slika 4-3).

Pranje tekstila vodom, pogotovo odstranjivanje slabo topivih nečistoća u vodi je kompleksan proces koji se sastoji od više paralelno odvijanih procesa u međusobnoj interakciji. Ovi procesi su: namakanje tekstila i nečistoća, odstranjivanje čestica nečistoća, raspršivanje nečistoća, oksidacijsko odstranjivanje neželjenih obojenja na tekstilu itd. [283]. U procesu pranja tekstila u perilici rublja sudjeluju: tekstil (rublje), nečistoće koje treba odstraniti (krute i tekuće nečistoće, prljavština, boje i mirisi), perilica rublja (tehnički sustav koji dostavlja fizikalne efekte potrebne za ostvarivanje tehničkog procesa), voda i deterdžent.




Slika 4-3. Tehnički proces i fizikalni efekti procesa pranja rublja (koncept A)

Uloga vode u procesu pranja tekstilnih tkanina je sljedeća. Voda služi kao otapalo deterdženta, sredstvo za natapanje (bubrenje) tekstila prilikom pranja, za prijenos (mehaničke) energije i ostvarivanje trenja između vlakana, te kao sredstvo za sakupljanje i odvođenje nečistoća odstranjenih s vlakana. Slika 4-4 prikazuje različite izvedbe koncepta A; američki, europski i japanski koncept uređaja za strojno pranje rublja u kućanstvima.



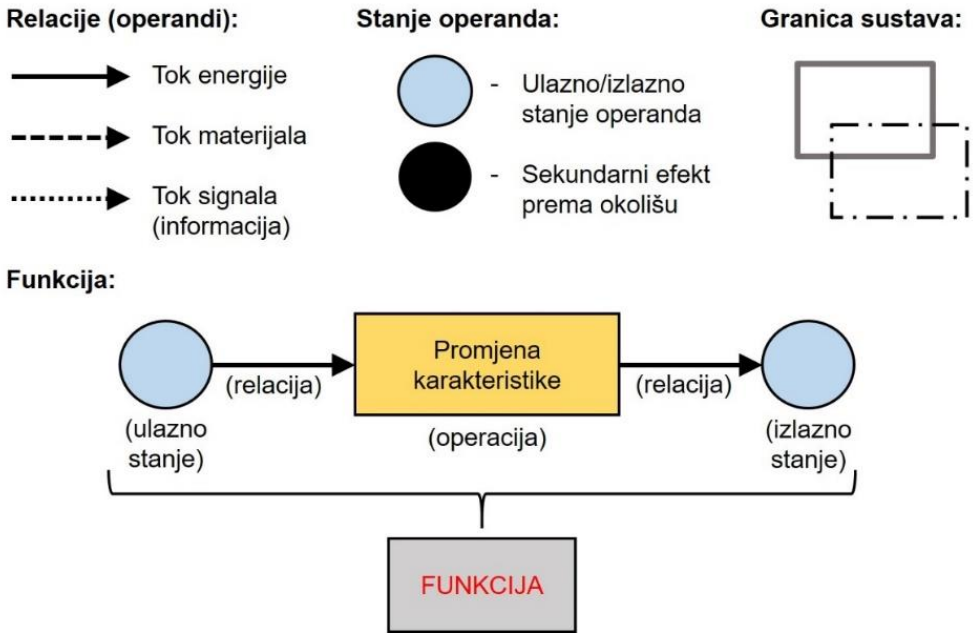

Slika 4-4. Prikaz koncepata američke (a), europske (b) i japanske (c) perilice za strojno pranje rublja u kućanstvima [318]

Prikaz tehničkog procesa (Slika 4-3) konstruktorima omogućava preliminarno identificiranje fizikalnih efekata koncepta. Za potpuni prikaz transformacija energije, materijala i signala koje opisuju radni princip koncepta tehničkog sustava, preporuka je koristiti neke od metoda analize funkcija proizvoda, primjerice metodu modeliranja funkcija proizvoda pomoću toka ili metodu funkcijske dekompozicije [72].

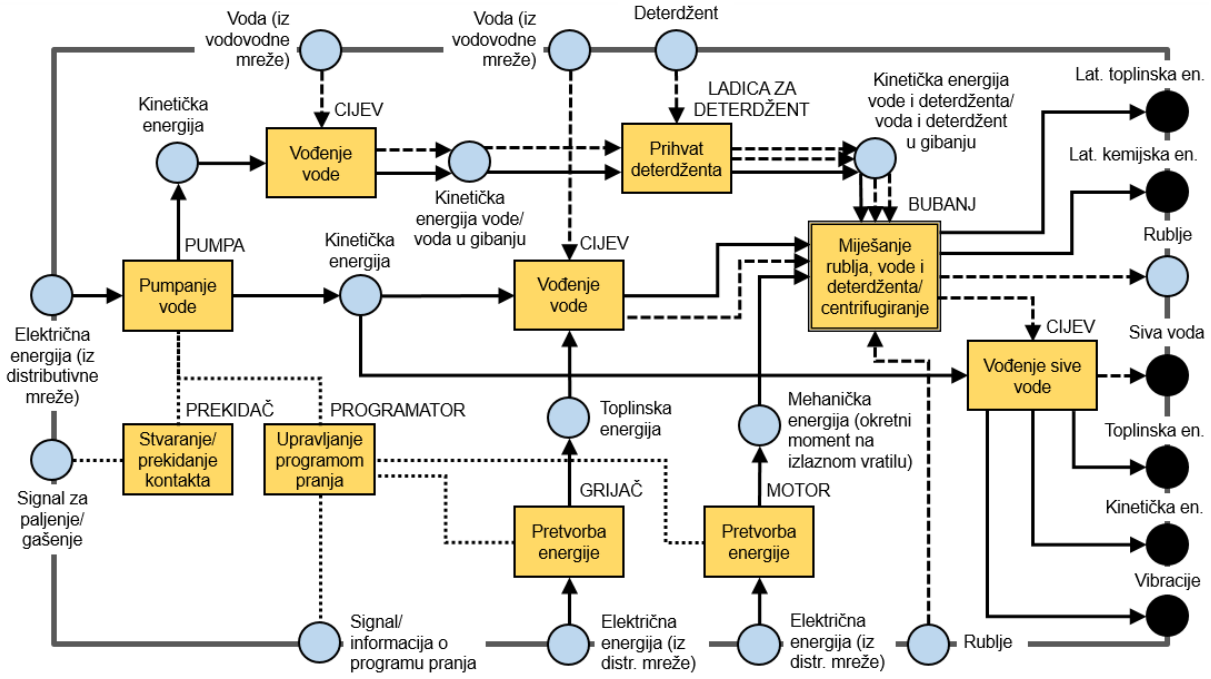
Modeliranje funkcija pomoću toka podrazumijeva definiranje ulaznih i izlaznih stanja operanada (energije, materijala i signala), njihovih relacija i operacija koje zajedno čine funkcije proizvoda. Slika 4-5 prikazuje legendu oznaka operanada, relacija, granica sustava, funkcija i sekundarnih efekata prema okolišu pri modeliranju funkcija pomoću toka.

Za konstruktore koji se prvi put susreću s predloženom metodom i analizom koncepata putem razmatranja radnih principa i fizikalnih efekata, preporuka je koristiti metodu modeliranja funkcija pomoću toka (Slika 4-6) ili metodu funkcijske dekompozicije (Slika 4-7). Koristeći metode analize funkcija, konstruktori mogu poboljšati razumijevanje fizikalnih

efekata, lanaca fizikalnih efekata, transformacija energije, materijala i signala te sekundarnih efekata prema okolišu koncepata koje valja vrednovati.




Slika 4-5. Oznake funkcija, operanada i sekundarnih efekata prema okolišu u modelu funkcija pomoću toka

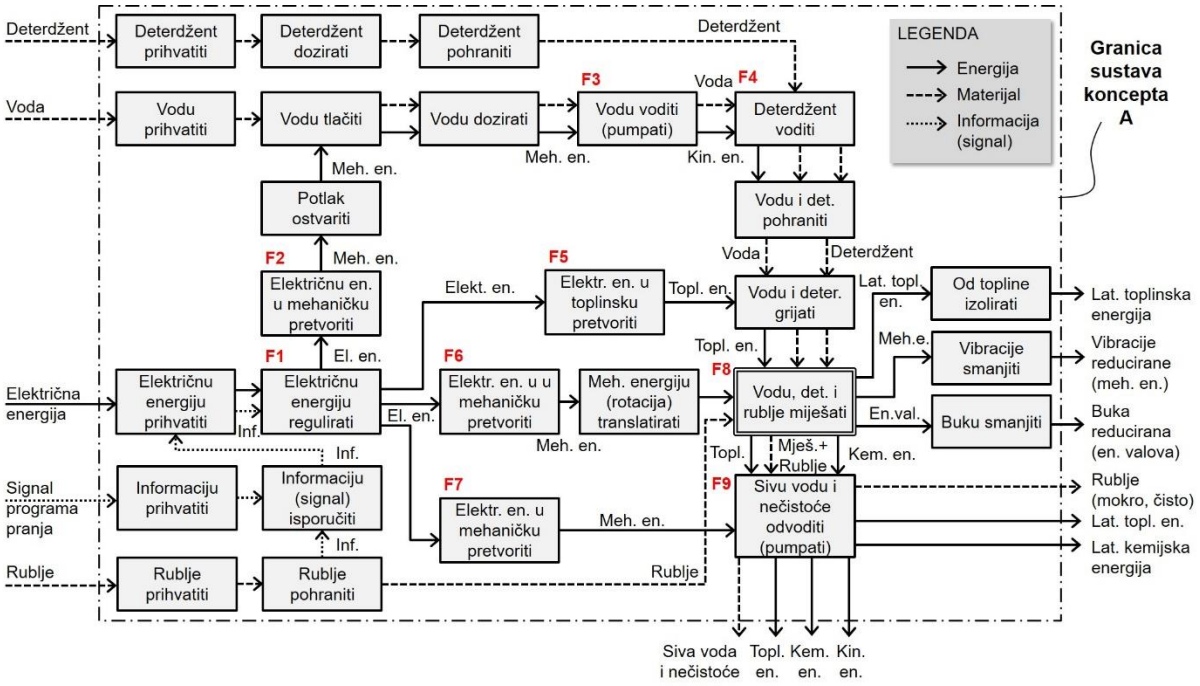



Slika 4-6. Model funkcija pomoću toka koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60°C/90°C), (legenda: Slika 4-5)

Funkcijska struktura koncepta A (Slika 4-7) generirana je temeljem analize funkcija automatske perilice rublja. Radi se o konceptu pranja rublja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom temperature 60°C, odnosno 90°C (ovisno o odabranom programu pranja) [319].

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti svakog koncepta zapisuje se u pomoćnoj tablici za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta. Podaci o konceptu koji su nužni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom:

- Lanci fizikalnih efekata s prikazom pretvorbi oblika energije i signala;
- Teorijske eko-efektivnosti i broj pretvorbi energije i signala u lancima;
- Vrsta i broj sekundarnih efekata prema okolišu;
- Parcijalne i ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti efekata prema okolišu;
- Broj sekundarnih efekata prema okolišu;
- Broj promjena agregatnog stanja materijala.

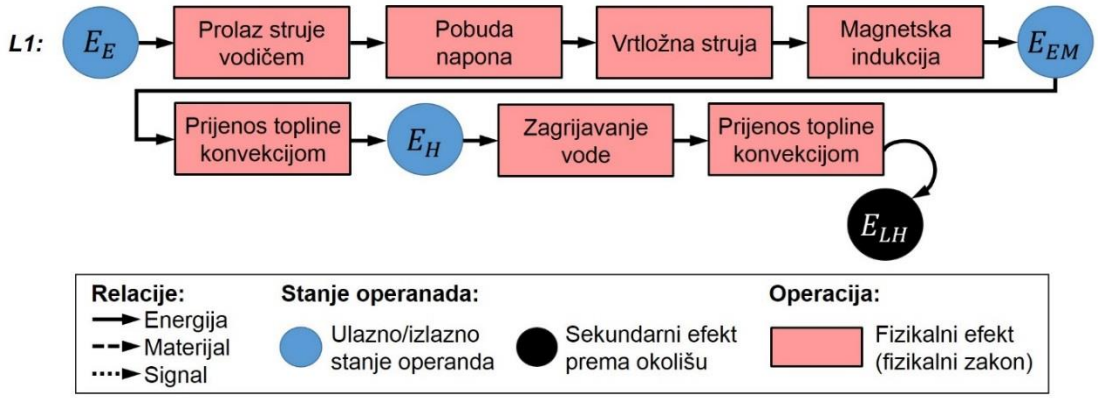



Slika 4-7. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60°C/90°C)

Lanci fizikalnih efekata prikazuju transformacije oblika energije, materijala i signala koje su nužne za ostvarivanje željenih fizikalnih efekata. Skup lanaca efekata naziva se radnim principom, a pritom fizikalni efekti mogu biti opisani fizikalnim zakonima. Fizikalni efekti, fizikalni zakoni i njihova principijelna rješenja mogu se naći u katalozima fizikalnih efekata [298] ili katalozima principijelnih rješenja. Katalozi fizikalnih efekata koriste se u svrhu inspiracije tijekom generiranja ideja, koncepata i razradi koncepata. Katalozi fizikalnih efekata konstruktorima mogu olakšati identifikaciju fizikalnih efekata i fizikalnih zakona koncepata koje analiziraju (npr. vidi Prilog 2 [320]).

Obzirom da razina znanja konstruktora o tome kako se fizikalni efekti i njihovi lanci generiraju može varirati, preporuča se generiranje lanaca fizikalnih efekata radi definiranja ključnih fizikalnih efekata skiciranjem tehničkog procesa (Slika 4-3), te transformacija koje upućuju na promjenu oblika energije i signala kao i promjenu fizikalnih ili kemijskih značajki materijala u tehničkom procesu. Novo-stečeno znanje o transformacija energije, materijala i signala konstruktori zatim mogu zapisati i analizirati koristeći metodu modeliranja funkcija pomoću toka (Slika 4-6) ili metodu funkcijske dekompozicije (Slika 4-7).

Slika 4-8 prikazuje lanac fizikalnih efekata koji se sastoji od niza nekoliko fizikalnih zakona kako bi se ostvarilo zagrijavanje vode za pranje rublja. Principijelno rješenje kojim se ostvaruje prijenos topline konvekcijom dobro je poznato, učinkovito i često primjenjivano rješenje električnog grijača vode. Prilog 3 sadrži detaljan prikaz fizikalnih zakona, ulaznih i izlaznih fizikalnih veličina lanca efekata *L1* koncepta pranja toplom vodom i deterdžentom.

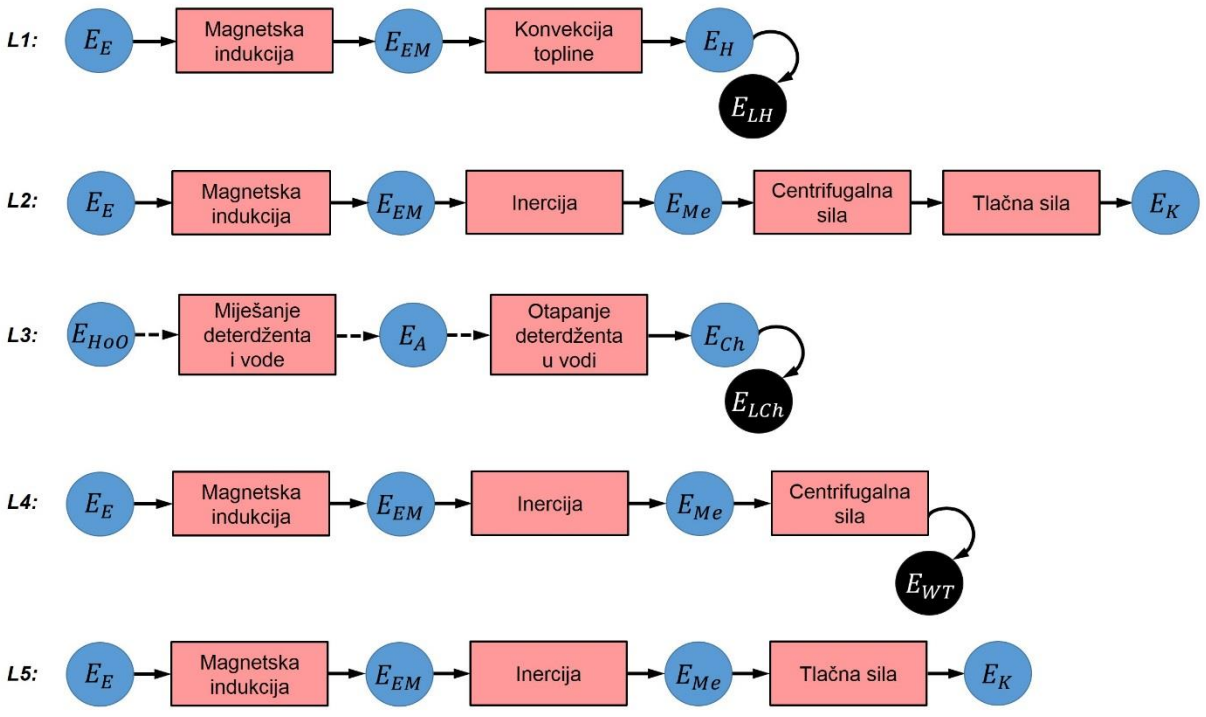



Slika 4-8. Lanac efekata *L1* (koncept pranja rublja A)

Slika 4-9 prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte prema okolišu koncepta pranja rublja toplom vodom i praškastim deterdžentom (koncept A).

Sekundarni efekti prema okolišu mogu se identificirati kod svake transformacije energije, materijala ili signala, te je za njihovo vrednovanje ekološke prihvatljivosti potrebno voditi se prvim zakonom termodinamike. Sekundarni efekti prema okolišu su gubici u okolišu do kojih dolazi uslijed transformacija energije, materijala i signala.

Odluka o tome da li je neki sekundarni efekt prema okolišu potrebno uzeti u obzir prilikom vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta donosi se temeljem znanja o konceptu, radnim principima i principijelnim rješenjima koncepta. Primjerice, ako sekundarni efekti prema okolišu kao što su vibracije i latentna toplina, zanemarivi po iznosu, odnosno utjecajima na konstrukciju ili okoliš, a nisu u interakciji s drugim fizikalnim efektima ili transformacijama, njihovu ekološku prihvatljivost nije potrebno vrednovati.




Slika 4-9. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (legenda: Slika 4-8)

Iako je fizikalne efekte i sekundarne efekte prema okolišu moguće identificirati na mikroskopskoj razini (fizikalni efekti kojima se opisuje međudjelovanje na razini atoma i

molekula), predložena metoda namijenjena je vrednovanju ekološke prihvatljivosti pri čemu se uzimaju u obzir fizikalni efekti kojima se ostvaruju radni principi tehničkih sustava.

To je stoga što se vrednovanjem sekundarnih efekata koji su po iznosu, utjecaju na razmatrani tehnički sustav i utjecaju na okoliš zanemarivo mali, nepotrebno produljuje proces vrednovanja predloženom metodom, a bez prednosti za generiranje rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata i rangiranje koncepata. Preporuke konstruktorima o tome koje sekundarne efekte prema okolišu uzeti u obzir, a koje zanemariti su u radu Chakrabarti i Johnsona [317].

Pomoćna tablica za vrednovanje ekološke prihvatljivosti (npr. Tablica 4-9) omogućava zapisivanje i praćenje operacija zbrajanja i prebrojavanja tijekom vrednovanja predloženom metodom. U pomoćnim tablicama redom se zapisuju podaci o fizikalnim efektima, lancima fizikalnih efekata i sekundarnim efektima prema okolišu koncepta. Potom se u pomoćne tablice zapisuju teorijske eko-efektivnosti transformacija oblika energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, parcijalne i ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, broj sekundarnih efekata prema okolišu i broj promjena agregatnog stanja materijala koncepta.

Tablica 4-6 prikazuje faktore teorijske eko-efektivnosti pretvorbi ulaznog oblika energije ili signala u željeni izlazni oblik energije ili signala. Dodjeljivanje ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima prema okolišu vrši se prema smjernicama (Tablica 4-8).

Pretvorba električne energije u toplinsku energije (Slika 4-7: funkcija *F5*, Slika 4-9: lanac *L1*) karakteristična je za koncept pranja rublja A, ali i za koncepte pranja rublja B i E jer voda kao nositelj toplinske energije sudjeluje u procesu pranja. Teorijska eko-efektivnost pretvorbe električne u toplinsku energiju negativnog je predznaka što ukazuje na ekološki nepovoljnu pretvorbu oblika energije.

Tablica 4-9. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja A

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_H$ = (-1,07); $E_H \rightarrow E_{LH}$ = (-3,00). | -4,26 |
| *L2* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| *L3* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). | -2,00 |
| *L4* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -1,05 |
| *L5* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| Ukupno: | ~12 transformacija < 0; ~3 transformacije > 0. | -8,49 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_H$, $E_{Ch}$, $E_K$) | Siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{LH}$) | Latentna toplinska energija → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-3) | -3 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_{WT}$) | Buka → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-3) | -3 |
| *S.Ef5* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| Ukupno: | ~5 sekundarnih efekata prema okolišu (1 *S.Ef* > 0; 4 *S.Ef* < 0). | -7 |

Oznake: *L1, L2, … L5* - Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (Slika 4-9), *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef5* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-7), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

U pomoćnoj tablici za vrednovanje koncepta pranja rublja A (Tablica 4-9), energija pohranjena u anorganskom materijalu ($E_A$) odnosi se na energiju deterdženta koja se posredstvom vode i topline pretvara u kemijsku energiju (Slika 4-7: funkcija *F8*, Slika 4-9: lanac *L3*).

Za glavnu funkciju koncepta A (Slika 4-7: funkcija *F8*) karakteristične su još pretvorba toplinske u latentnu toplinsku energiju, te pretvorba mehaničke energije u buku (vibracije). Teorijske eko-efektivnosti pretvorbi energija koje su potrebne za ostvarivanje glavne funkcije

koncepta A (Slika 4-7: funkcija *F8*) negativnog su predznaka, tj. ekološki neprihvatljive. Za konstruktora, relevantan podatak o teorijskoj eko-efektivnosti pretvorbi koje su karakteristične za koncept je zbroj parcijalnih teorijskih eko-efektivnosti koncepta. Zbroj parcijalnih teorijskih eko-efektivnosti koncepta pranja rublja A iznosi -8,49 (Tablica 4-9).

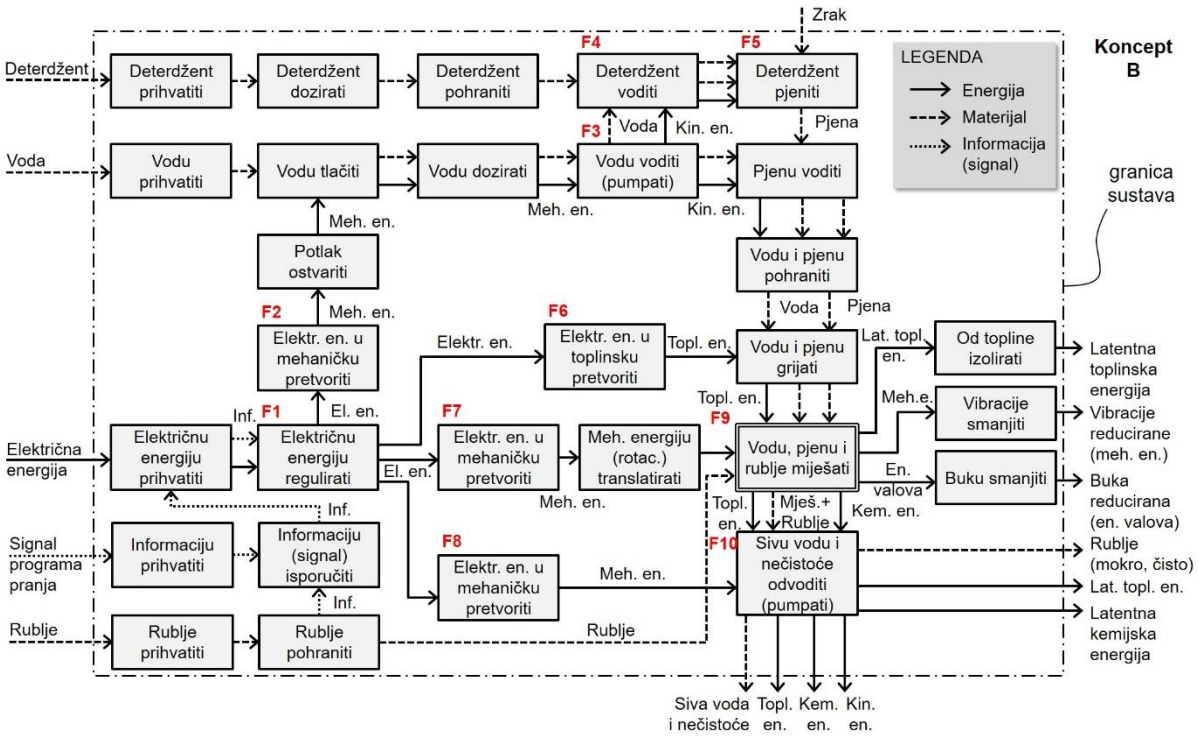
Vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu provodi se na način da se prvo definiraju sekundarni (latentni) efekti prema okolišu koncepta, a potom se svakom efektu dodjeljuje ocjena temeljem smjernica za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8). Latentna toplinska energija, vibracije i buka su sekundarni efekti prema okolišu. Dio latentne toplinske i latentne kemijske energije zadržavaju se na rublju nakon odvajanja sive vode od čistog rublja. Latentna kemijska energija rublja vrednovana je kao indirektno ispuštanje otpada i emisija niske toksičnosti u okoliš, te je ovom sekundarnom efektu prema okolišu dodijeljena ocjena -2. U pomoćnoj tablici (Tablica 4-9), siva voda s nečistoćama ocijenjena je kao najmanje ekološki prihvatljiv u usporedbi sa ostalim sekundarnim efektima prema okolišu koncepta A. Za konstruktora, relevantan podatak iz pomoćne tablice je zbroj parcijalnih ekoloških prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu. Ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu koncepta pranja rublja A iznosi -7 (Tablica 4-9).

### *4.5.2. Koncept pranja rublja B*

Koncept B predstavlja inačicu procesa strojnog pranja rublja toplom vodom i praškastim deterdžentom. Za razliku procesa pranja opisanog konceptom A, rublje se namače pjenom deterdženta i vode (tehnologija Eco Bubble™ [284]), a pranje se odvija na nižim temperaturama pranja (~30°C). Kod oba koncepta odstranjivanje nečistoća ostvaruje se u kupki vode i rublja.. Tehnički procesi koncepata A i B istovjetni su osim u detalju što se kemijsko djelovanje deterdženta na rublje kod koncepta B ostvaruje pjenom deterdženta i vode. Pranje pjenom omogućava brže prodiranje deterdženta među tekstilna vlakna, otapanje deterdženta u kupki i ispiranje deterdženta i nečistoća.

Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B (Slika 4-10) razlikuje od funkcijske strukture koncepta pranja rublja A u samo jednoj pretvorbi oblika energije (Slika 4-10: funkcija *F5*). Ukupna teorijska eko-efektivnost pretvorbi energija koncepta pranja rublja B veća je od

koncepta pranja rublja A za iznos teorijske eko-efektivnosti pretvorbe unutarnje energije heterogenog materijala (zrak) u unutarnju energiju anorganskog materijala (pjena deterdženta).




Slika 4-10. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B

Kod koncepta pranja rublja B, pranje rublja se odvija na nižim temperaturama nego kod koncepta pranja rublja A. Zbog toga je gubitak toplinske energije kod koncepta pranja rublja B manji nego kod koncepta pranja rublja A. Latentna toplinska energija koja neminovno nastaje zbog nepovratnosti procesa prelaska topline je sekundarni efekt prema okolišu (Slika 4-8).

Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu koji su toplinska energija ili latentna toplinska energija veća je u slučaju koncepta pranja rublja B, nego u slučaju koncepta pranja rublja A stoga što je razlika temperature pranja i temperature okoliša (tj. topline koju tehnički sustav izmjenjuje s okolišem) manja kod koncepta B nego kod koncepta A. Zbog toga se sekundarnom efektu latentne toplinske energije prema okolišu dodjeljuje viša ocjena ekološke prihvatljivosti koncepta B nego kod koncepta A (Tablica 4-10). Koncept pranja rublja B ekološki je prihvatljiviji od koncepta pranja rublja A zbog bolje eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije i veće ukupne ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu.

Tablica 4-10. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja B

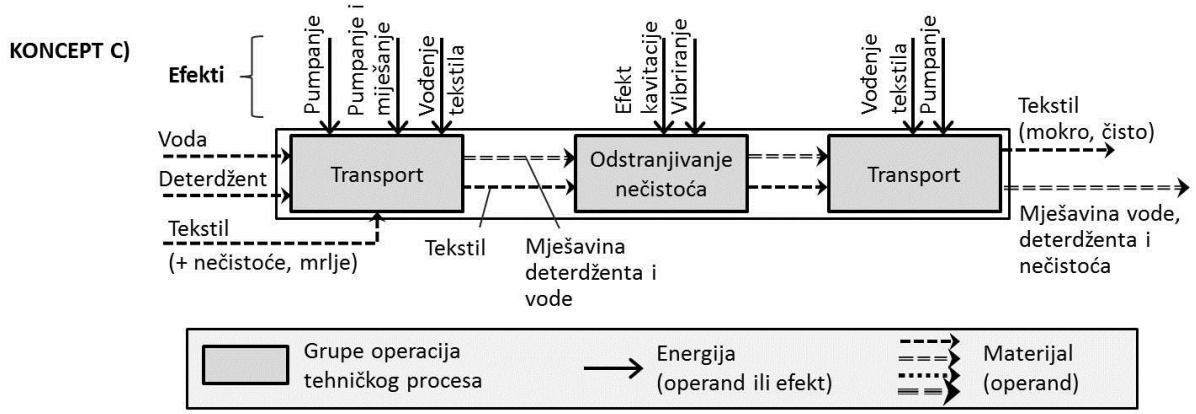
| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_H$ = (-1,07); $E_H \rightarrow E_{LH}$ = (-3,00). | -4,26 |
| *L2* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| *L3* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). | -2,00 |
| *L4* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -1,05 |
| *L5* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| Ukupno: | ~12 transformacija < 0; ~3 transformacije > 0. | -8,49 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_H$, $E_{Ch}$, $E_K$) | Siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{LH}$) | Latentna toplinska energija – Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_{WT}$) | Buka → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-3) | -3 |
| *S.Ef5* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| Ukupno: | ~5 sekundarnih efekata prema okolišu (2 *S.Ef* > 0; 3 *S.Ef* < 0). | 5 |

Oznake: *L1, L2, … L5* - Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja B (Slika 4-9), *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef5* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-7), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

### *4.5.3. Koncept pranja rublja C*

Za koncept pranja rublja C karakterističan je lanac pretvorbi energije kojim se realizira glavni fizikalni efekt – kavitacija. Procesi u kojima se pranje i čišćenje tekstila ostvaruje posredstvom ultrazvučnih valova i kavitacijom u tekućem mediju česti su u industriji proizvodnje i pripreme tekstila. Učinkovito otklanjanje nečistoća s rublja ultrazvukom ostvaruje se uz pomoć vode i deterdženta, pred namakanjem rublja u kupki vode i deterdženta te ispiranjem tekstila u vodi nakon djelovanja kavitacijskog efekta.

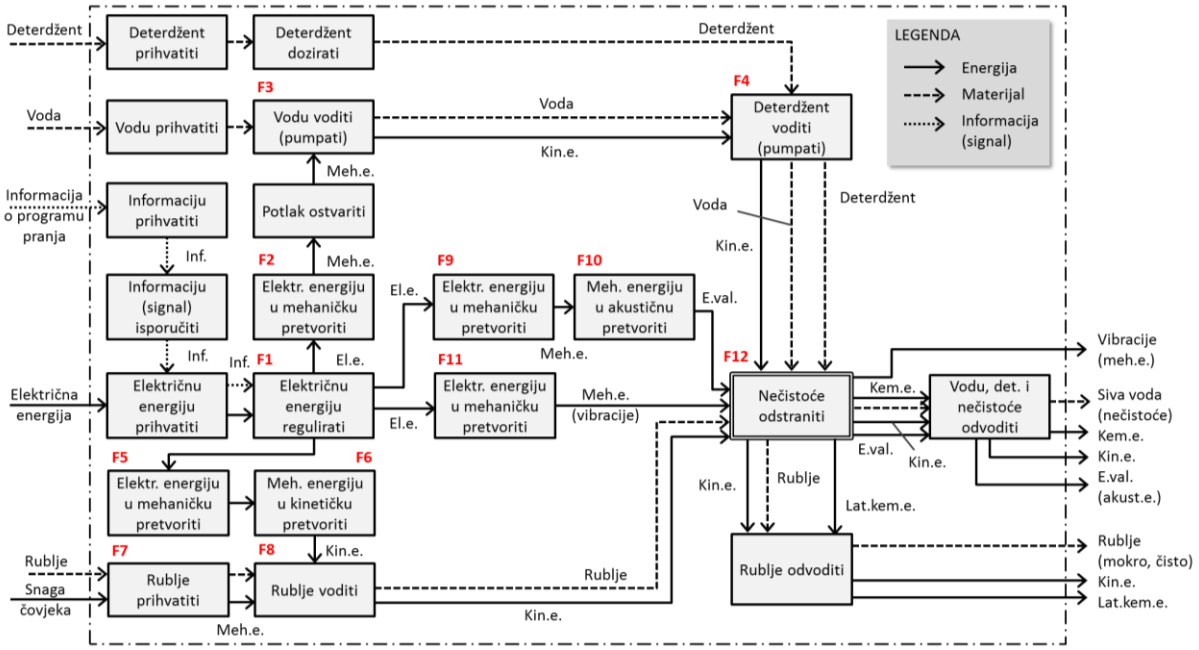
Efekt kavitacije postiže se prolaskom visokofrekventnih akustičnih valova kroz tekući medij, tj. vodu. Akustična energija potrebna za nastanak kavitacije ostvaruje se pretvorbom iz električne energije visoke frekvencije. Odstranjivanje nečistoća pospješuje se vibriranjem ploča na kojima se nalazi remenskim prijenosom vođeni tekstil, tj. rublje (Slika 4-11). Tekući deterdžent prodire među vlakna tekstila prolaskom kroz vodu i tekući deterdžent, a tekstil se pritom nalazi u području djelovanja kavitacije [321].




Slika 4-11. Tehnički proces i fizikalni efekti ultrazvučnog pranja rublja (koncept C)

Kavitacija uzrokuje ekstremne fizikalne i kemijske uvjete u inače hladnom tekućem mediju. Akustična kavitacija efekt je do kojeg dolazi uslijed stvaranja, rasta i kolapsa mjehurića zraka uslijed prolaska zvučnog vala visoke intenzivnosti kroz tekućinu [322]. Kolaps mjehurića praćen je intenzivnim lokalnim zagrijavanjem i visokim tlakom koji su kratkog vijeka. Na području zahvaćeno kavitacijom, temperature dosežu i do 5000 K, a tlak i do 100 MPa. Nakon pucanja mjehurića temperatura može strelovito padati, i preko $10^{10}$ K u sekundi. Usprkos ekstremnim uvjetima u područjima zahvaćenim efektom kavitacije, ultrazvučnim pranjem tekstila postižu se dobri rezultati odstranjivanja nečistoća sa površine tekstila, bez negativnih posljedica na tekstilnu tkaninu [323].

Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C (Slika 4-12) prikazuje 12 funkcija kod kojih postoje pretvorbe oblika energije i signala. Teorijske eko-efektivnosti pretvorbi iz ulaznog u izlazni oblik energije su u pomoćnoj tablici za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta pranja rublja C (Tablica 4-11).




Slika 4-12. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C

Zbroj teorijskih eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala svojstvenih konceptu C veći je nego koncepata pranja rublja A i B. Glavni efekt kavitacije ostvaruje se lancem pretvorbi električne energije u mehaničku, te mehaničke energije u akustičnu. Izostanak pretvorbi oblika energije koje bi uključivale generiranje toplinske energije utječe na iznos zbroja vrijednosti teorijskih eko-efektivnosti, pa time i vrednovanje prema ovom kriteriju.

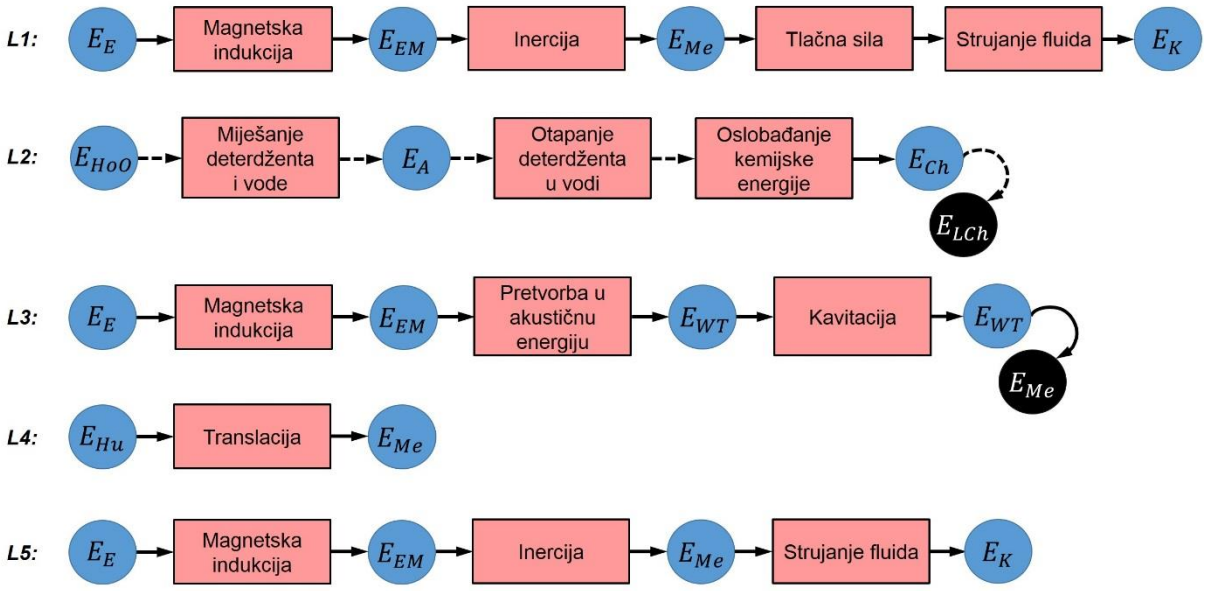
Koncept pranja rublja C osmišljen je prema prototipnom uređaju za ispitivanje učinkovitosti ultrazvučnog pranja [285]. Obzirom da kod ovog prototipa nije osmišljeno principijelno rješenje automatskog prihvata rublja, za koncept C definirano je da bude poluautomatski uređaj kod kojega pozicioniranje i prihvat rublja obavlja čovjek, a ne tehnički sustav (Slika 4-12: funkcija *F7*).

Tablica 4-11. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja C

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| *L2* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). | -2,00 |
| *L3* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,87); $E_{WT} \rightarrow E_{Me}$ = (0,18). | -0,88 |
| *L4* | $E_{Hu} \rightarrow E_{Me}$ = (-4,94). | -4,94 |
| *L5* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| Ukupno: | ~9 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0. | -9,0 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_{Ch}$, $E_K$, $E_{WT}$) | Siva voda + nečistoće (kemijska, kinetička, akustična energija) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef3* ($E_{LCh}$, $E_K$) | Latentna kemijska energija, kinetička energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| Ukupno: | ~3 sekundarnih efekata prema okolišu (1 *S.Ef* > 0; 2 *S.Ef* < 0). | -1 |

Oznake: *L1, L2, … L5* - Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (Slika 4-13), *S.Ef1, ..., S.Ef3* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-12), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

Teorijska eko-efektivnost pretvorbe snage čovjeka u mehaničku energiju negativnog je predznaka i iznosi -4,94, te se prema tome može zaključiti da se radi o ekološki nepovoljnoj pretvorbi oblika energije. U slučaju da koncept C ima automatski prihvat rublja, pripadajući lanac fizikalnih efekata izgledao bi kao lanac *L5* na Slici 4-13 (Slika 4-13). Tada bi ukupna teorijska eko-efektivnost lanca efekata kojim se ostvaruje prihvat rublja (Slika 4-12: funkcije *F7*, *F8*) iznosila -4,65 (-9,0 umanjen za iznos lanca *L4*, Slika 4-13, te uvećan za iznos lanca *L5*, Slika 4-13).




Slika 4-13. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (legenda: Slika 4-8)

Sekundarni efekti prema okolišu koncepta pranja rublja C prikazani su u pomoćnoj tablici vrednovanja koncepta C (Tablica 4-11). Prisutni su latentna kemijska energija, zaostale vibracije i kinetička energija.

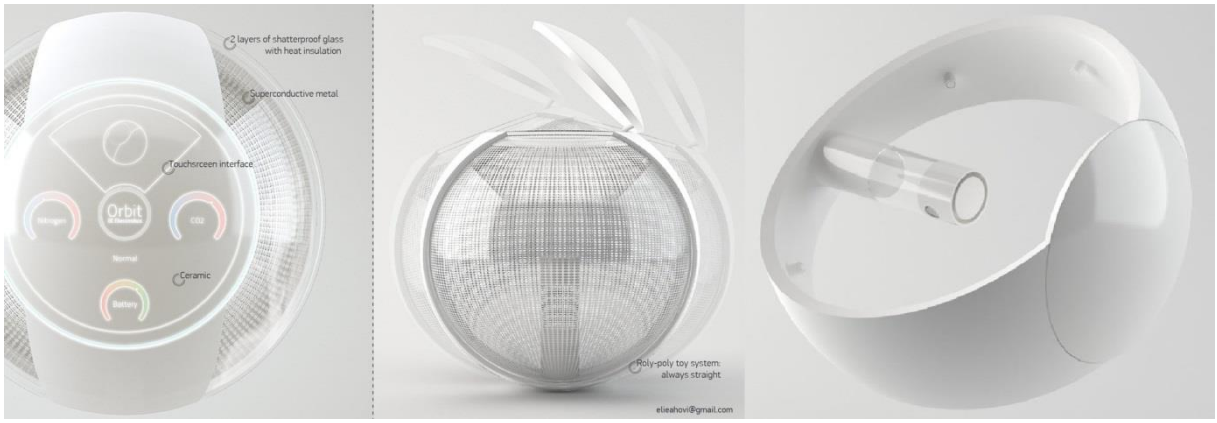
Utjecaji na okoliš uslijed sonifikacije sive vode koja se ispušta u odvod nakon završetka procesa pranja rublja nisu dovoljno istraženi u literaturi. Za ovaj sekundarni efekt prema okolišu pretpostavljena je jednaka ekološka prihvatljivost kao za sivu vodu kod koncepata pranja rublja A i B. Broj sekundarnih efekata prema okolišu je 3, što je manje od broja sekundarnih efekata prema okolišu koncepata pranja rublja A i B.

Temeljem manjeg broja sekundarnih efekata prema okolišu i manjeg broja transformacija energije i signala, koncept pranja rublja C je ekološki prihvatljiviji od koncepata pranja rublja A i B. Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala koncepta C s poluautomatskim prihvatom rublja je manja od eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala koncepata pranja rublja A i B.

### *4.5.4. Koncept pranja rublja $D^a$*

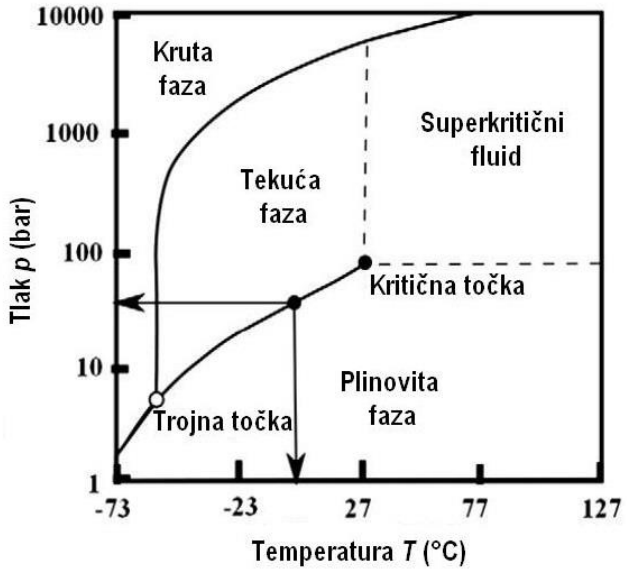
Kod koncepta pranja rublja $D^a$ otklanjanje nečistoća s rublja ostvaruje se kriogeničkim hlađenjem ugljikovim dioksidom. Idejno rješenje procesa čišćenja rublja suhim ledom opisano

je konceptom 'Orbit' [289]. U opisu ovog koncepta nisu dostupni parametri procesa čišćenja rublja, a o komponentama je moguće zaključivati jedino temeljem ilustracija i skica 'Orbit' perilice (Slika 4-14). Pretragom patenata osmišljeno je koncepcijsko rješenje D[a] kojim se čišćenje tekstila ostvaruje putem strujanja zraka i ugljikovog dioksida iz peleta suhog leda.




Slika 4-14. Principijelna rješenja i glavne komponente 'Orbit' koncepta [289]

Čišćenje suhim ledom odvija se na način da se postiže ekspanzija ugljikovog dioksida koji prelazi u plinovito stanje. Odstranjivanje nečistoća sa površina se ostvaruje usmjerenom strujom zraka i ugljikovog dioksida pri čemu je za efektivnost čišćenja potrebno ostvariti velike brzine izlazne struje. Zrak iz plinovite smjese pritom se dobavlja iz okoliša.

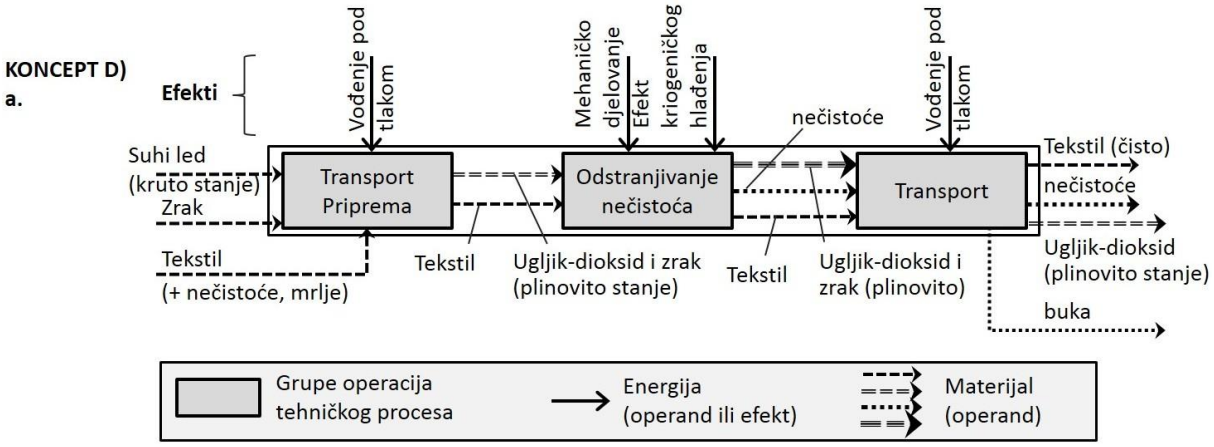



Slika 4-15. Fazni dijagram ugljikovog dioksida (tlak – temperatura) [324]

Suhi led je naziv za ugljikov dioksid u krutom stanju na temperaturi -78,5 °C ili nižoj, pri normalnom tlaku. Ugljikov dioksid sublimira direktno iz krute tvari u plin na temperaturama iznad -78,5 °C i pri normalnom tlaku (Slika 4-15).

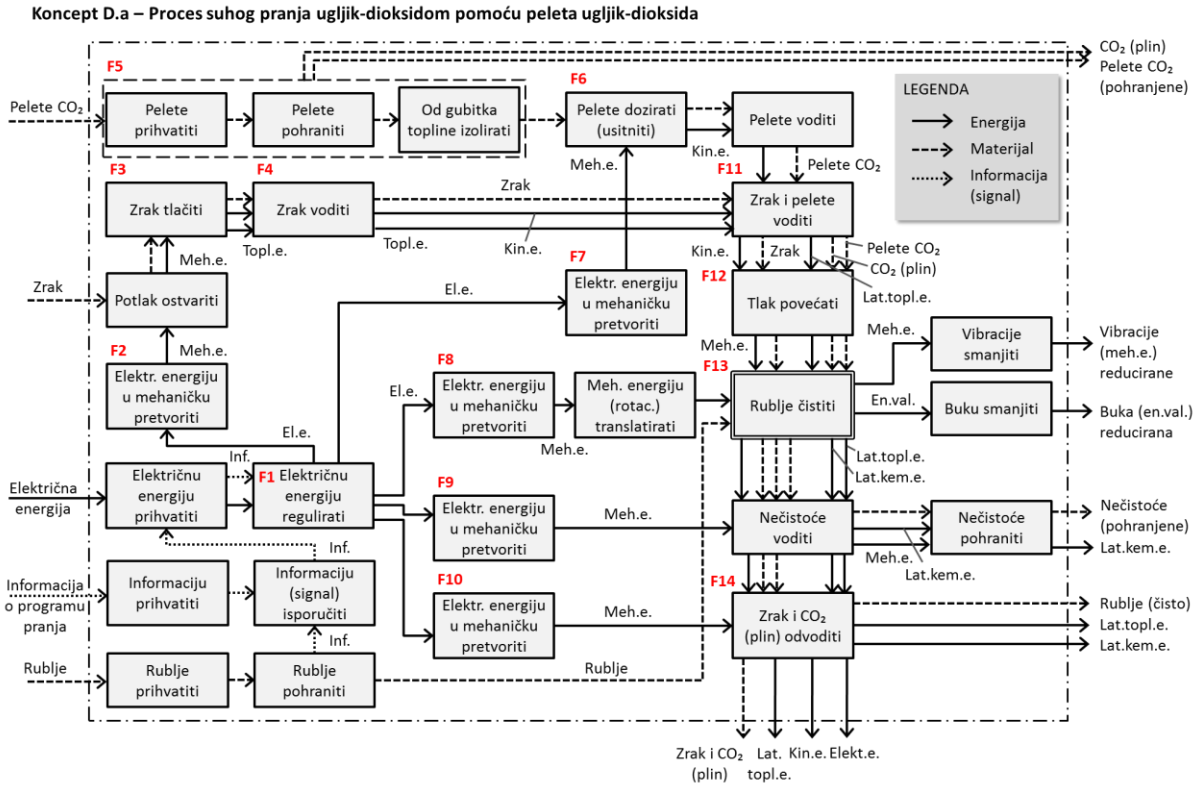
Zahvaljujući svojstvu da direktno sublimira iz krutog stanja u plinovito, njegovim topljenjem nema nusprodukata u obliku tekućine. Suhi led koristi se u procesima gdje je potreban plin pod tlakom, a nije skup niti zapaljiv. Suhi led u obliku peleta proizvodi se pothlađivanjem ugrijanog ugljikovog dioksida pri visokom tlaku (40-48 GPa), zbog čega se on skrutne i poprima oblik snijega. Da bi se dobio pod tlakom, plin se tlači na oko 6 MPa, te se na ovaj način velika količina plina može pohraniti u spremnicima. Peleti suhog leda promjera 0,5-3 mm dobivaju se protiskivanjem kroz rešetkastu matricu.

Koncepcijska varijanta pranja rublja D[a] osmišljena je po uzoru na uređaj za čišćenje površina suhim ledom [324], [325]. Peleti suhog leda uobičajeno su na temperaturi u iznosu 80°C, te se pomoću mlaznog uređaja ubrzavaju do brzine od 150 do 300 m/s [326].




Slika 4-16. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja suhim ledom (*a* varijanta koncepta pranja rublja D)

Slika 4-16 prikazuje tehnički proces pranja rublja suhim ledom. Funkcijska struktura koncepta D[a] prikazuje ukupno 14 funkcija kod kojih postoje pretvorbe energije ili signala iz jednog oblika u drugi (Slika 4-17). Čak 12 od ukupno 16 pretvorbi oblika energije ili signala su pretvorbe negativnog predznaka, te su time ekološki neprihvatljive pretvorbe (Tablica 4-12).



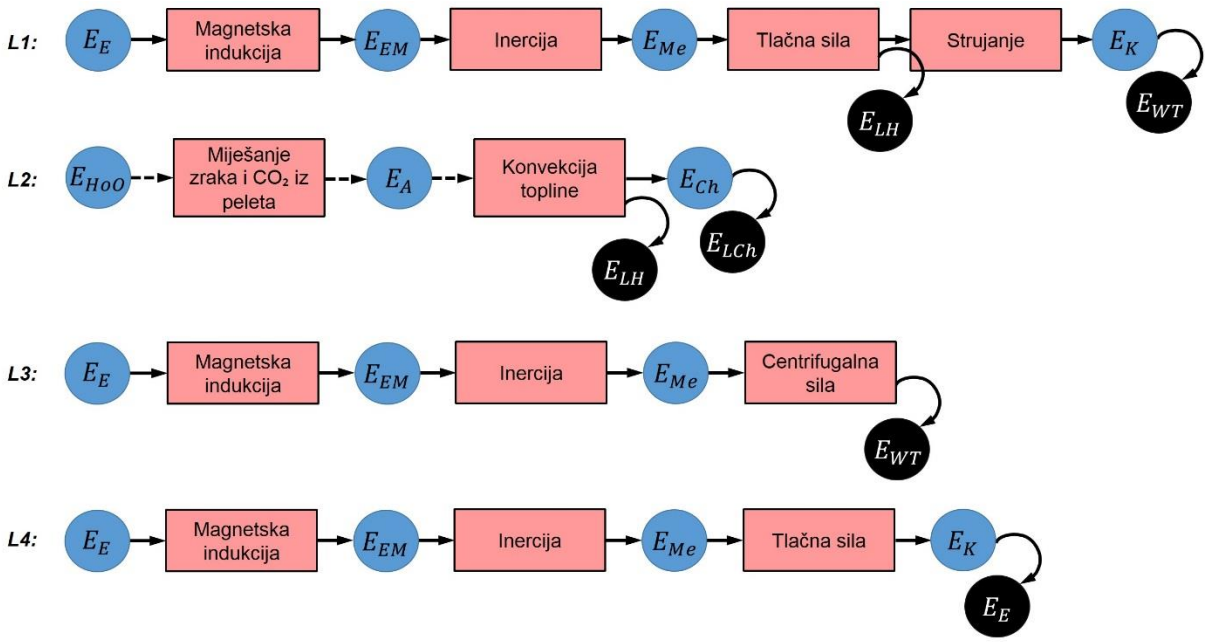

Slika 4-17. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja D[a]

Sekundarni efekti prema okolišu i njihovo vrednovanje prikazani su u pomoćnoj tablici za vrednovanje koncepta pranja rublja D[a] (Tablica 4-12). Vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu provedeno je prema vrijednosnoj skali (Tablica 4-8). Slika 4-18 prikazuje četiri lanca fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D[a].

Tablica 4-12. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D[a]

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28); $E_K \rightarrow E_{WT}$ = (-0,46). $E_{Me} \rightarrow E_{LH}$ = (-3,38). | -4,43 |
| *L2* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). $E_A \rightarrow E_{LH}$ (-3,96). | -5,96 |
| *L3* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -1,05 |
| *L4* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28); $E_K \rightarrow E_E$ (0,49). | -0,10 |
| Ukupno: | ~12 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0. | -11,54 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_A$) | $CO_2$ (plin) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_A$) | Peleti suhog leda (pohranjene) → Indirektno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti = (-6) | -6 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_{WT}$) | Buka → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija srednje toksičnosti = (-7) | -7 |
| *S.Ef5* ($E_{LCh}$) | Nečistoće → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-3) | -3 |
| *S.Ef6* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| *S.Ef7* ($E_A$, $E_{LCh}$, $E_K$) | Zrak i $CO_2$ (plin) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti = (-9) | -9 |
| *S.Ef8* ($E_E$) | Statički elektricitet → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) = (-4) | -4 |
| Ukupno: | 8 sekundarnih efekata prema okolišu (1 *S.Ef* > 0; 7 *S.Ef* < 0). | -30 |

Oznake: *L1, L2, … L4* - Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D[a] (Slika 4-18), *S.Ef1, S.Ef2, ..., S.Ef8* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-17), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.



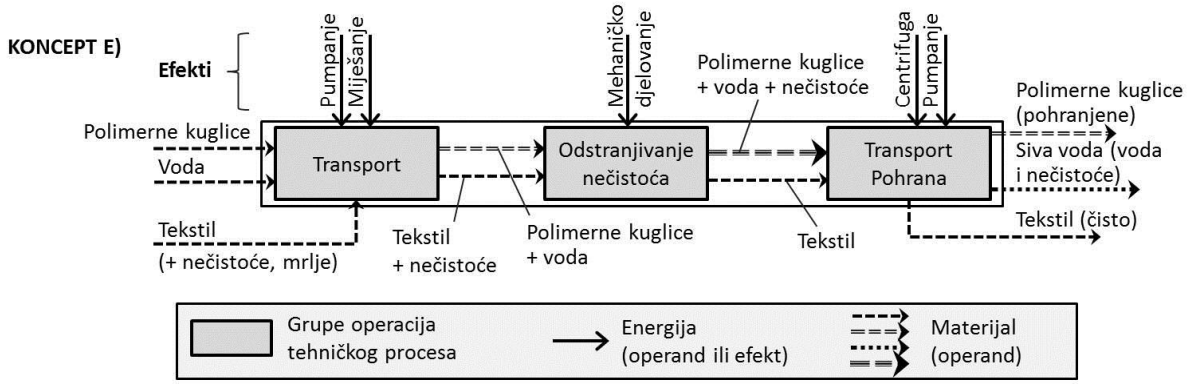

Slika 4-18. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D[a] (legenda: Slika 4-8)

Ekološka prihvatljivost u spremniku pohranjenih peleta ugljikovog dioksida ocjenjena je ocjenom -6 jer se radi o indirektnim, za okoliš nepovoljnim posljedicama na okoliš (Tablica 4-12). Ispuštanje ugljikovog dioksida u okoliš vrednovano je ocjenom -8 zbog značajnog doprinosa više kategorija utjecaja na okoliš (utjecaj na zdravlje ljudi i problema na okoliš uzrokovanih povećanjem udjela ugljikovog dioksida u atmosferi). Buka koja nastaje uslijed strujanja zraka i ugljikovog dioksida značajna je i veća nego u slučaju ostalih koncepata pranja rublja, te je stoga buka kao sekundarni efekt prema okolišu vrednovana ocjenom -7. Uslijed velikih brzina strujanja zraka i ugljikovog dioksida dolazi do statičkog elektriciteta, te je ovaj sekundarni efekt prema okolišu vrednovan ocjenom dobrote -4 zbog značajnog doprinosa jednog kategoriji utjecaja na okoliš (u ovom slučaju utjecaju na zdravlje ljudi).

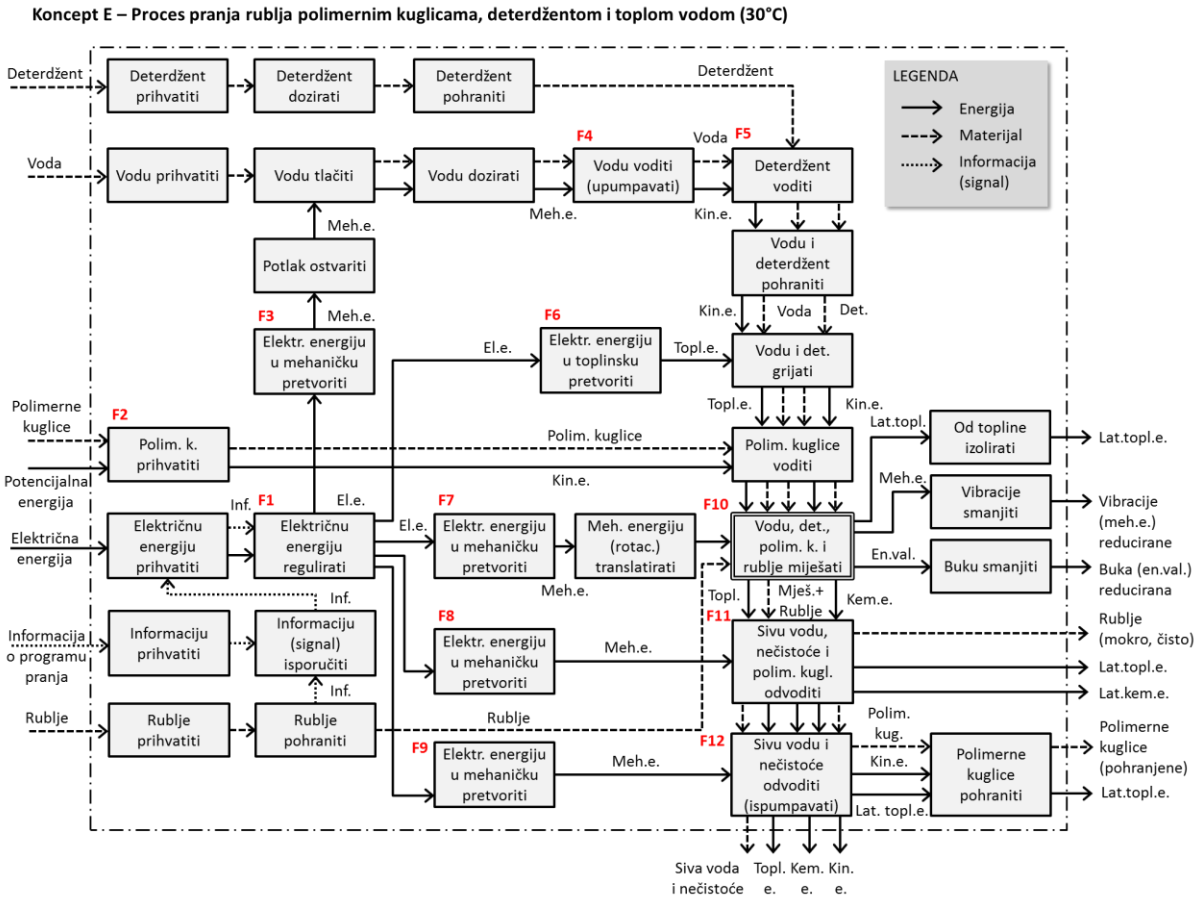
### *4.5.5. Koncept pranja rublja E*

Koncept E je koncept pranja rublja polimernim kuglicama, toplom vodom i praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja. Slika 4-19 prikazuje tehnički proces i fizikalne efekte procesa pranja rublja koncepta E. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja E (Slika 4-20) razlikuje se od funkcijske strukture koncepta pranja rublja A (Slika 4-7) u tome što je

mehaničko djelovanje na rublje potpomognuto polimernim kuglicama, a kemijsko djelovanje praška za pranje na rublje ostvaruje se na temperaturama od oko 30°C.




Slika 4-19. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja (koncept E)




Slika 4-20. Funkcijska struktura koncepta E

Tablica 4-13. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja E

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_H$ = (-1,07); $E_H \rightarrow E_{LH}$ = (-3,00). | -4,26 |
| *L2* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| *L3* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). | -2,00 |
| *L4* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -1,05 |
| *L5* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28). | -0,59 |
| *L6* | $E_P \rightarrow E_K$ = (0,07); $E_K \rightarrow E_{Me}$ = (-0,28); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -0,39 |
| Ukupno: | ~15 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0. | -8,88 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_H$, $E_{Ch}$, $E_K$) | Siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{LH}$) | Latentna toplinska energija → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_{WT}$) | Buka → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-3) | -3 |
| *S.Ef5* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| *S.Ef6* ($E_A$) | Polimerne kuglice (pohranjene) → Ponovno korištenje otpada/emisija (ili ostvarivo s manjim izmjenama) = (+7) | +7 |
| *S.Ef7* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (polimerne kuglice) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| Ukupno: | ~7 sekundarnih efekata prema okolišu (3 *S.Ef* > 0; 4 *S.Ef* < 0). | -2 |

Oznake: *L1, L2, … L6* - Lanci fizikalnih efekata koncepta E, *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef7* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-20), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

Prihvat polimernih kuglica (Slika 4-20: funkcija *F2*) ostvaruje se pretvorbom potencijalne energije polimernih kuglica u kinetičku energiju. U pomoćnoj tablici (Tablica 4-

13) prikazan je veći broj ekološki negativnih pretvorbi energija i veći broj sekundarnih efekata prema okolišu nego kod koncepata pranja rublja A i B, a uslijed polimernih kuglica koje čine jedan tok materijala više nego u funkcijskim strukturama tih koncepata pranja rublja A i B.

### *4.5.6. Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, D$^a$ i E predloženom metodom*

Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, Dª i E sažeti su u matrici odlučivanja (Tablica 4-14). Podaci o vrednovanju prema svakom kriteriju ekološke prihvatljivosti upisuju se u matricu odlučivanja. Podaci o vrednovanju prema svakom kriteriju nalaze se u pomoćnim tablicama za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata (Tablica 4-9, Tablica 4-10, Tablica 4-11, Tablica 4-12 i Tablica 4-13). Uporaba pomoćnih tablica omogućuje konstruktorima zapisivanje parcijalnih teorijskih eko-efektivnosti pretvorbi energija i signala i parcijalnih ekoloških prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu što pojednostavljuje postupak upisivanja podataka o konceptima u matricu odlučivanja.

Tablica 4-14. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti pranja rublja A, B, C, Dª i E)

| Koncepti → | Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$, rang $e_{ij}$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $S_{\epsilon_{TR}}$ (max) | $e_{i1}$ | $N_{\epsilon_{TR}}$ (min) | $e_{i2}$ | $S_{\epsilon_{EF}}$ (max) | $e_{i3}$ | $N_{\epsilon_{EF}}$ (min) | $e_{i4}$ | $N_{Agr}$ (min) | $e_{i5}$ | $V_{\text{eij}}$ |
| α | -8,49 | 1 | 15 | 2 | -7 | 4 | 5 | 2 | 1 | 2 | 11 |
| β | -8,49 | 1 | 15 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 1 | 2 | 8 |
| γ | -9,0 | 2 | 13 | 1 | -1 | 2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| δª | -11,54 | 4 | 16 | 3 | -30 | 5 | 8 | 4 | 2 | 3 | 19 |
| ε | -8,88 | 3 | 19 | 4 | -2 | 3 | 7 | 3 | 1 | 2 | 15 |

Oznake: α - koncept A, β - koncept B, γ - koncept C, δª - koncept Dª, ε - koncept E, $S_{\epsilon_{TR}}$ - Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala (Tablica 4-6), $N_{\epsilon_{TR}}$ - Broj pretvorbi energije i signala, $S_{\epsilon_{EF}}$ - Zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8), $N_{\epsilon_{EF}}$ - Broj sekundarnih efekata prema okolišu, $N_{Agr}$ - Broj promjena agregatnog stanja materijala, $V_{\text{eij}}$ - suma rangova $e_{\text{ij}}$, (max)/(min) – maksimizirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti.

U matrici odlučivanja dodjeljuje se rang konceptima; prvo za svaki kriterij ekološke prihvatljivosti, a potom se primjenjuje tehnika sume rangova kako bi vrednovanje rezultiralo rangiranjem koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti. Rezultat vrednovanja ekološke

prihvatljivosti predloženom metodom je rangiranje vrednovanih koncepata, od ekološki prihvatljivih do ekološki manje prihvatljivih koncepata iz skupa.

Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom ukazuje da je koncept ultrazvučnog pranja rublja (koncept C) ekološki najprihvatljiviji koncept u skupu vrednovanih koncepata. Koncept pranja rublja pjenom deterdženta i toplom vodom na temperaturi 30°C (koncept B) je sljedeći prema ekološkoj prihvatljivosti. Koncept pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom na temperaturama 60°C i 90°C (koncept A) je srednje ekološki prihvatljiv koncept. Na začelju rangiranja, kao ekološki najmanje prihvatljivi koncepti našli su se koncepti pranja rublja E i $D^a$.

Iz funkcijske strukture koncepta pranja polimernim kuglicama (koncept E) vidljivo je da ovaj koncept ima veći broj pretvorbi energije, materijala i signala (i slijedno tomu lanaca fizikalnih efekata) od stalih koncepata u skupu. Iako je koncept pranja rublja E prema kriteriju teorijske eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala vrednovan kao ekološki najmanje prihvatljiv koncept u skupu, rezultati vrednovanja pokazuju da je koncept pranja rublja $D^a$ manje ekološki prihvatljiv prema više kriterija ekološke prihvatljivosti. Sukladno tomu, koncept suhog pranja peletima ugljikovog dioksida (koncept $D^a$) je najmanje ekološki prihvatljiv koncept u skupu vrednovanih koncepata pranja rublja.

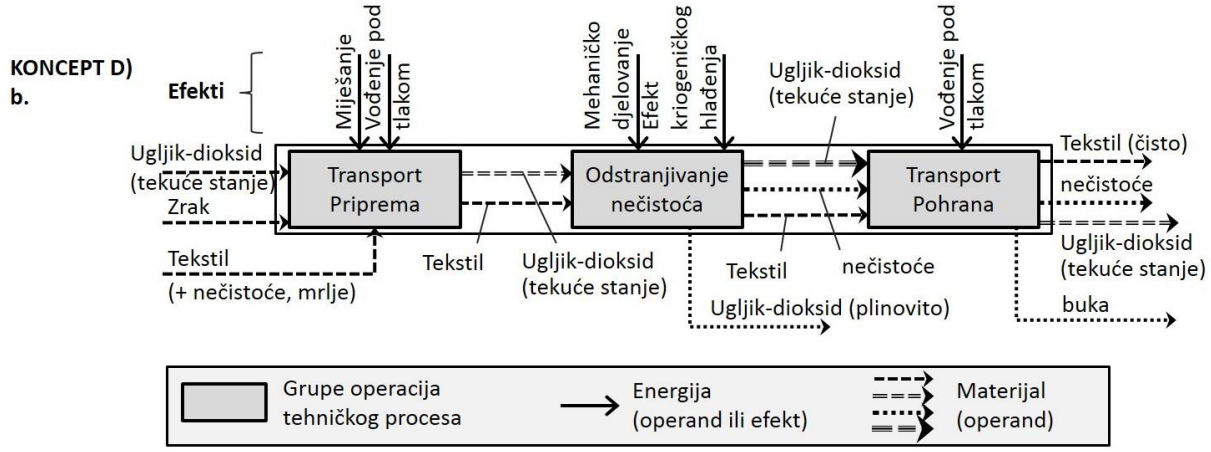
Dodjeljivanje vrijednosti kojima se opisuje ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu može se smatrati kvalitativnim, odnosno subjektivnim načinom vrednovanja. Objektivno vrednovanje predloženom metodom moguće je postići imajući na umu cilj vrednovanja, te nastojeći postići što veću usporedivost modela funkcija pojedinih koncepata. Dodjeljivanje vrijednosti solarnih faktora transformabilnosti mora biti jednoznačno za sve pretvorbe iste vrste, te je sekundarne efekte prema okolišu iste vrste potrebno vrednovati jednako kada se pojavljuju u svim konceptima. U slučaju da je fizikalni efekt ili sekundarni efekt prema okolišu zanemaren u slučaju jednog koncepta, mora biti zanemaren u slučaju svih koncepata koji se vrednuju.

## 4.6. Ispitivanje teorijske konzistentnosti metode zamjenom jednog koncepta iz skupa drugim

Validacija konstruktivnog elementa koji određuje rangiranje koncepata određena je time da li zamjena jednog koncepta ekološki najmanje prihvatljiv konceptom uzrokuje promjenu rangiranja ekološki prihvatljivijih varijanata [327]. Koncept pranja rublja $D^a$ zamijenjen je konceptom pranja rublja $D^b$ u skupu koncepata pranja rublja.

### *4.6.1. Koncept pranja rublja $D^b$*

Koncepcijska varijanta $D^b$ osmišljena je po uzoru na uređaj za suho pranje rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom [324]. Primjer implementacije koncepta je Electrolux Wascator S-35 [324] kojim se pranje rublja izvodi u komori za čišćenje rublja. Uređaj koristi ukapljeni ugljikov dioksid, a odstranjivanje nečistoća i mrlja ostvaruje se i mehaničkim odstranjivanjem uslijed rotacije komore, odnosno bubnja perilice. Uređaj je primjer ekološki prihvatljivije alternative procesu kemijskog pranja rublja, ali efektivnost pranja rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom je manja od efektivnosti procesa kemijskog pranja rublja [324].

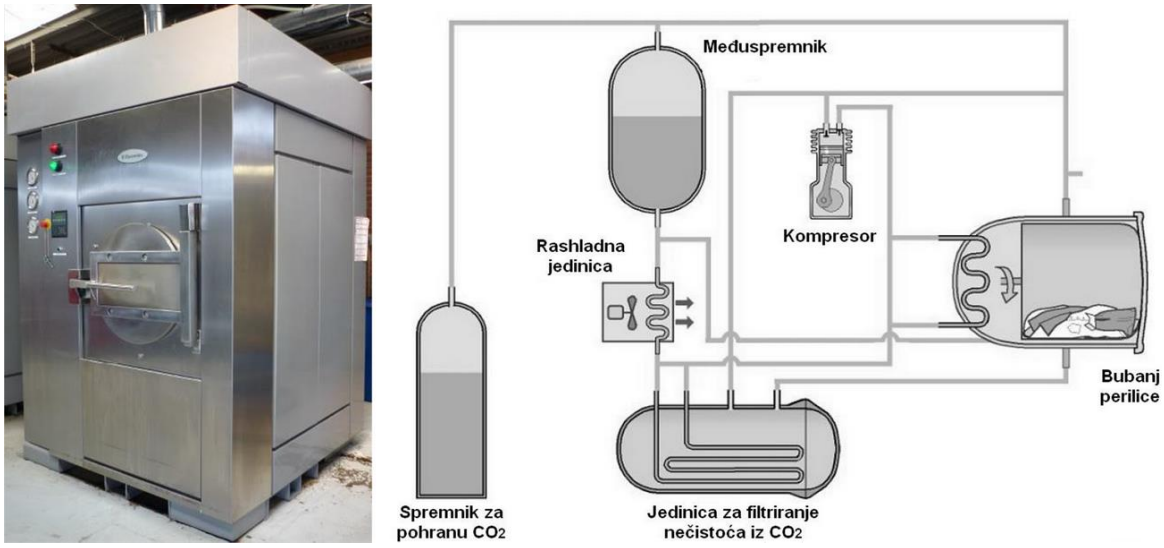



Slika 4-21. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja/tekstila suhim ledom (*b* varijanta koncepta D)

Slika 4-21 prikazuje tehnički proces pranja rublja tekućim ugljikovim dioksidom. Proces započinje stvaranjem vakuuma u bubnju perilice i otpuštanjem ugljikovog dioksida, prvo u plinovitom, a onda tekućem stanju iz prostora spremnika ukapljenog ugljikovog

dioksida. Mlaznicama se postiže usmjerena struja i raspršivanje ukapljenog ugljikovog dioksida po rublju pohranjenom u bubnju perilice.

Slika 4-22 prikazuje komercijalni proizvod Electrolux Wascator S-35 [324] i skicu procesa čišćenja ugljikovim dioksidom koncepta D[b]. Proces počinje s ukapljenim ugljikovim dioksidom pohranjenim pod tlakom ~6 MPa. Ukapljeni ugljikov dioksid hrani "peletizer" koji ga pretvara u kruti ugljikov dioksid (pahuljice suhoga leda), a dodatnom kompresijom nastaju kuglice suhoga leda (peleti) temperature oko ~80 °C. Kuglice suhog leda ubacuju se u tok komprimiranog zraka i velikom brzinom (150-300 m/s) projiciraju na ciljanu površinu mlaznicama.




Slika 4-22. Electrolux Wascator S-35 [324]

Nakon što udare o površinu, nastaje ekstremna razlika u temperaturi (toplinski udar) između nečistoća i temeljne podloge, što dovodi do slabljenja kemijskih i fizičkih veza između površine materijala i podloge. Odmah nakon udara, kuglice leda počinju sublimirati (tj. isparavaju izravno iz krute faze u plinovitu), i strujati velikom brzinom uz površinu na koju su usmjerene. Velike brzine usmjerene struje ugljikovog dioksida uzrokuju i ekstremne razlike u gustoći između plinovitih i krutih faza. Uslijed kontakta suhog leda i površine koja se čisti, sloj nečistoće i tretirano područje naglo se ohlade. Nečistoće se odvajaju sa površina uslijed krtosti nečistoća i zbog napuklina na površini nečistoća, te pomoću komprimiranog zraka. Ta kinetička

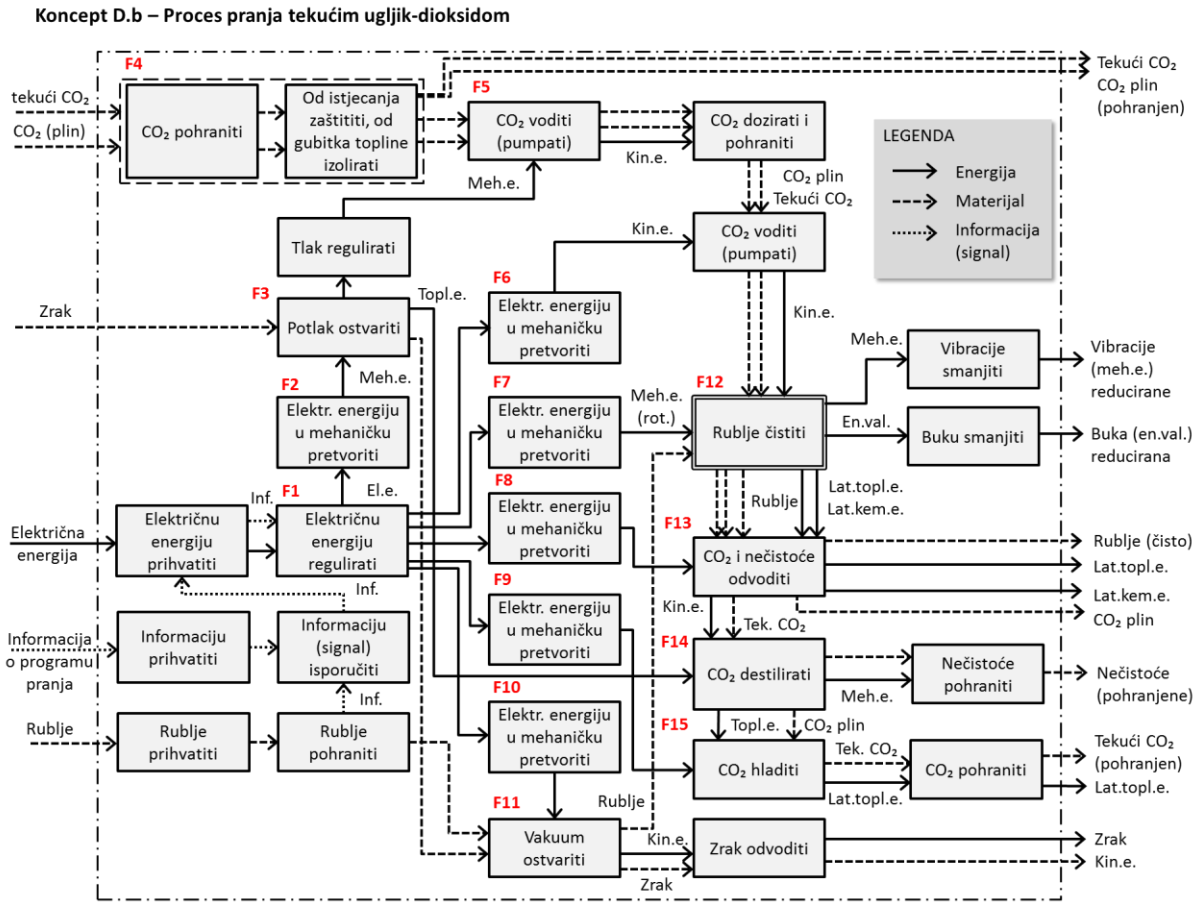
energija odvaja nečistoće, a rezultat je čista površina. Suhi led isparava i nečistoće ostaju na dnu bubnja.

Po završetku procesa ovog 'suhog' pranja, dio ugljikovog dioksida se otpušta u okolinu u obliku plina (Tablica 4-15: *S.Ef5*), a preostali dio ugljikovog dioksida u tekućem stanju se vakuumskom pumpom odvodi do destilacijske jedinice. Destilacijom, odnosno zagrijavanjem ugljikovog dioksida postiže se pretvorba ugljikovog dioksida u plinoviti oblik, a potom se pothlađivanjem ponovno pohranjuje u tekućem obliku za sljedeći ciklus pranja.

Po završetku procesa pranja tekućim ugljikovim dioksidom nečistoće odstranjene s rublja pohranjuju se u posebnom spremniku. Nečistoće koje su bile u kontaktu s ugljikovim dioksidom klasificiraju se kao kemijski otpad, te zahtijevaju specijalno odlaganje.

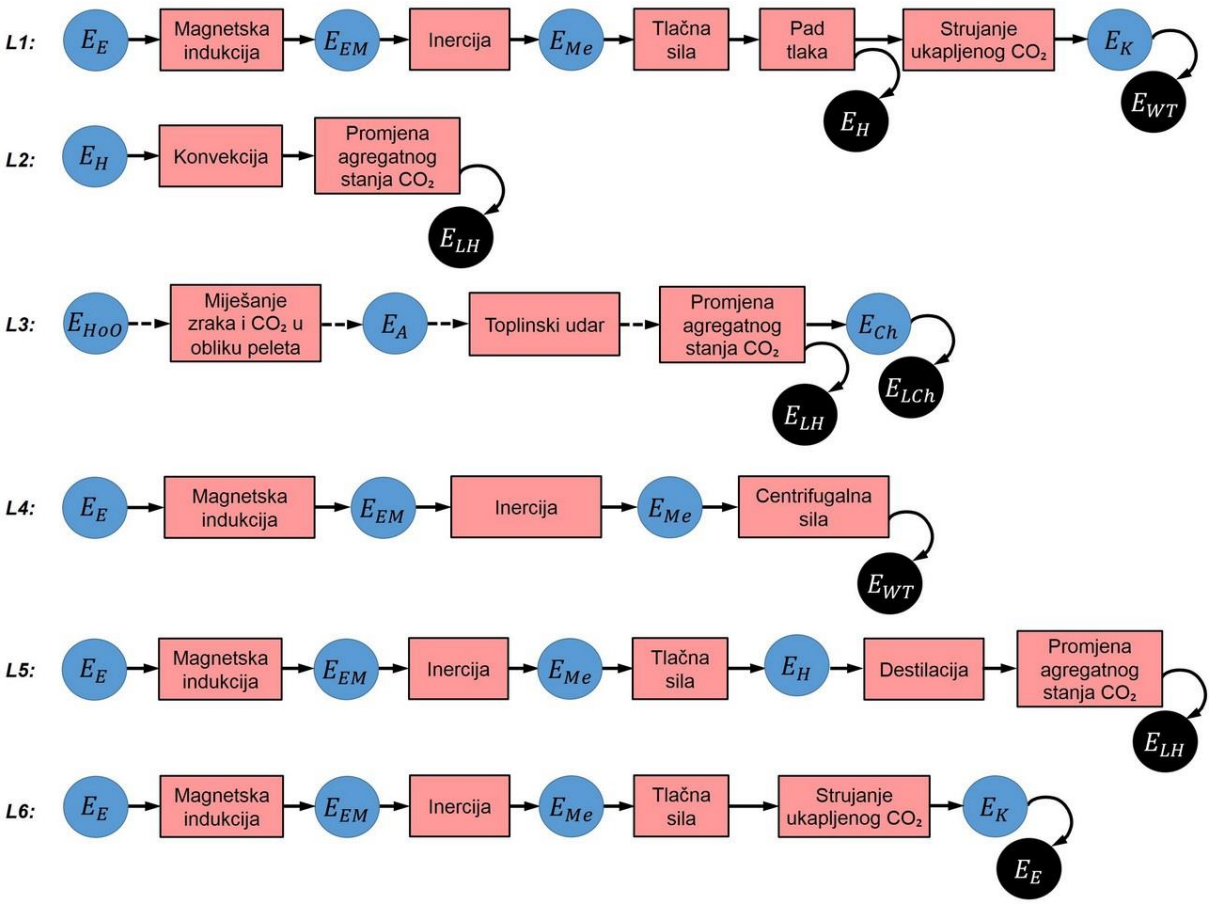
Ukapljeni ugljikov dioksid upotrebljava se kao rashladno sredstvo i sredstvo za gašenje požara. Kontakt s tekućinom može prouzročiti smrzotine ili hladne opekotine. Brzo isparavanje tekućine dovodi do stvaranja krutog ugljikovog dioksida koji u kontaktu s kožom može uzrokovati hladne opekotine ili smrzotine. Kako je ugljikov dioksid teži od zraka, može se akumulirati u uleknućima i sličnim prostorima uz tlo. Plin je zabranjeno ispuštati u prostor u kojem akumulacija može biti opasna. Ispuštanje velikih količina ugljikovog dioksida u atmosferu dolazi do efekta staklenika.

Prema normama, ekološkim oznakama i deklaracijama o zaštiti okoliša, ugljikov dioksid nije otrovan plin, no pri visokim koncentracijama plina u neventiliranim prostorijama, izloženost plinu može dovesti do gušenja i opasnosti po zdravlje. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnog efekta *S.Ef7* (Tablica 4-15) provedeno je u skladu s navedenim podacima o štetnosti ugljikovog dioksida, te je nečistoćama (koje su sekundarni efekt prema okolišu) dodijeljena ocjena ekološke prihvatljivosti u iznosu -9.




Slika 4-23. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja $D^b$

Za koncept $D^b$ karakteristične su promjene agregatnog stanja ugljikovog dioksida. Koncept $D^b$ ima 3 promjene agregatnog stanja toka materijala (Slika 4-23: funkcije *F13, F14 i F15*). Koncepti $D^b$ i $D^a$ imaju jednak broj sekundarnih efekata prema okolišu, no kod koncepta $D^b$ proces pranja ugljikovim dioksidom je kružni proces. Pritom ugljikov dioksid prolazi više pretvorbi agregatnog stanja, te se ukapljuje radi pohrane i ponovnog korištenja. Zbog toga je ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu koncepta $D^b$ veća nego kod koncepta $D^a$.




Slika 4-24. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja $D^b$ (legenda: Slika 4-8)

Tablica 4-15. Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja $D^b$

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28); $E_K \rightarrow E_{WT}$ = (-0,46). $E_{Me} \rightarrow E_H$ = (-0,38). | -1,43 |
| *L2* | $E_H \rightarrow E_{LH}$ = (-3,00). | -3,00 |
| *L3* | $E_{HoO} \rightarrow E_A$ = (0,09); $E_A \rightarrow E_{Ch}$ = (-0,87); $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ = (-1,22). $E_A \rightarrow E_{LH}$ (-3,96). | -5,96 |
| *L4* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = (-0,18). | -1,05 |
| *L5* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_H$ = (-0,38); $E_H \rightarrow E_{LH}$ (-3,00). | -4,25 |
| *L6* | $E_E \rightarrow E_{EM}$ = (-0,19); $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ = (-0,68); $E_{Me} \rightarrow E_K$ = (0,28); $E_K \rightarrow E_E$ (0,49). | -0,10 |
| Ukupno: | ~17 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0. | -15,79 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_A$) | Tekući $CO_2$, $CO_2$ plin (pohranjen) → Indirektno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti = (-6) | -6 |
| *S.Ef2* ($E_{Me}$) | Vibracije → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| *S.Ef3* ($E_{WT}$) | Buka → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija srednje toksičnosti = (-7) | -7 |
| *S.Ef4* ($E_{LH}$, $E_{LCh}$) | Latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti = (-2) | -2 |
| *S.Ef5* ($E_A$) | $CO_2$ (plin) → Direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija srednje toksičnosti = (-7) | -7 |
| *S.Ef6* ($E_E$) | Statički elektricitet → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) = (-4) | -4 |
| *S.Ef7* ($E_A$, $E_{LCh}$) | Nečistoće → Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti = (-9) | -9 |
| *S.Ef8* ($E_A$, $E_K$) | Zrak (kinetička energija) → Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9) | +9 |
| Ukupno: | 8 sekundarnih efekata prema okolišu (2 *S.Ef* > 0; 6 *S.Ef* < 0). | -17 |

Oznake: *L1, L2, … L6* - Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja $D^b$ (Slika 4-24), *S.Ef1, S.Ef2, ..., S.Ef8* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-23), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

### *4.6.2. Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, D[b] i E predloženom metodom*

Procedura ispitivanja konzistentnosti predložene metode osmišljena je po uzoru na ispitivanje validnosti metoda odlučivanja navedeno u literaturi [327]. U novoj matrici odlučivanja (Tablica 4-16), koncept D[a] zamijenjen je konceptom D[b] što rezultira novim skupom koncepata pranja rublja (A, B, C, D[b] i E), ali i dodjeljivanju novog ranga ekološke prihvatljivosti konceptima u skupu. Rezultati ukazuju da nema promjene ranga koncepata koji su ekološki prihvatljiviji od koncepta D[b] čime se potvrđuje konzistentnost tehnike rangiranja predloženom metodom.

Tablica 4-16. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti pranja rublja A, B, C, D[b] i E)

| ↓ Koncepti | Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$, rang $e_{ij}$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $S_{\epsilon_{TR}}$ (max) | $e_{i1}$ | $N_{\epsilon_{TR}}$ (min) | $e_{i2}$ | $S_{\epsilon_{EF}}$ (max) | $e_{i3}$ | $N_{\epsilon_{EF}}$ (min) | $e_{i4}$ | $N_{Agr}$ (min) | $e_{i5}$ | $V_{\text{eij}}$ |
| α | -8,49 | 1 | 15 | 2 | -7 | 4 | 5 | 2 | 1 | 2 | 11 |
| β | -8,49 | 1 | 15 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 1 | 2 | 8 |
| γ | -9,0 | 2 | 13 | 1 | -1 | 2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| δ[b] | -15,79 | 4 | 21 | 4 | -17 | 5 | 8 | 4 | 2 | 3 | 20 |
| ε | -8,88 | 3 | 19 | 3 | -2 | 3 | 7 | 3 | 1 | 2 | 14 |

Oznake: α - koncept A, β - koncept B, γ - koncept C, δ[b] - koncept D[b], ε - koncept E, $S_{\epsilon_{TR}}$ - Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala, $N_{\epsilon_{TR}}$ - Broj pretvorbi energije i signala, $S_{\epsilon_{TR}}$ - Zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, $N_{\epsilon_{EF}}$ - Broj sekundarnih efekata prema okolišu, $N_{Agr}$ - Broj promjena agregatnog stanja materijala, $V_{\text{eij}}$ - suma rangova $e_{\text{ij}}$, (max)/(min) – maksimizirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti.

Ekološka prihvatljivost koncepata pranja rublja vrednovana je i metodom procjene životnog ciklusa koncepata. U metodološkom koraku istraživanja naziva *Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija i metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava*, rezultati studije slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti i rezultati procjene životnog ciklusa koncepata pranja

rublja usporedit će se s rezultatima vrednovanja kriterijima ekološke prihvatljivosti i predloženom metodom (6. poglavlje).

## 4.7. Primjena predložene metode na primjeru koncepata stolnog sata-budilice

Bernstein i drugi [50] demonstrirali su primjenu *Function Impact Matrix - FIM* metode na primjeru tri koncepta stolnih satova budilica: mehaničkog sata-budilice, elektroničkog sata-budilice s baterijom i mehaničko-digitalnog sata-budilice s baterijom [52]. Obzirom da su Bernstein i drugi [50] proveli validaciju *FIM* metode, procjenu utjecaja na okoliš *EcoIndicator 99* metodom [328] i obrazložili zaključke o rekonstrukciji proizvoda temeljem studije slučaja u kojoj su sudjelovali konstruktori, ovi koncepti stolnog sata-budilice odabrani su kao drugi skup testnih koncepata za demonstraciju primjene predložene metode.

U nastavku je provedeno vrednovanje triju koncepata stolnog sata-budilice predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Analiza lanaca efekata i sekundarnih efekata prema okolišu temelje se na funkcijskim dekompozicijama i listama materijala korištenih u studiji Bernstein i drugih [50]. Vrednovanje je provedeno za svaki koncept stolnog sata-budilice, temeljem pet kriterija ekološke prihvatljivosti predloženih ovim istraživanjem. Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti i rangiranje koncepata predloženom metodom zapisuje se u matrici odlučivanja.

Predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata provodi se prema koracima vrednovanja (Tablica 4-3). Procedura vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta zahtijeva generiranje lanaca fizikalnih efekata, te identificiranje sekundarnih efekata prema okolišu.

Lanci fizikalnih efekata svakog koncepta i vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti zapisuju se u pomoćnoj tablici svakog koncepta radi lakšeg izračuna rangova vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti. Zatim se u pomoćnoj tablici svakog koncepta zapisuju sekundarni efekti prema okolišu, kao i njihovo vrednovanje prema kriterijima ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu i broj sekundarnih efekata prema okolišu.

Pomoćna tablica služi za zapisivanje podataka potrebnih za vrednovanje ekološke prihvatljivosti prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti, a s ciljem sistematiziranja koraka procedure vrednovanja predloženom metodom. Kako bi se maksimizirala usporedivost koncepata, lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu pojedinih koncepata, predlažu se iteracije pri generiranju lanaca efekata i provjera dodijeljenih vrijednosti dobrote. To je stoga što predložena metoda zahtjeva:

- Istovremeno razmatranje i vrednovanje više od jednog koncepta
- Generiranje lanaca fizikalnih efekata radi identifikacije transformacija energije, materijala i signala
- Dodjeljivanje vrijednosti ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu vodeći se vrijednosnom skalom za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8).

Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala sastoji se od definiranja ulaznog i izlaznog oblika energije temeljem generiranih lanaca fizikalnih efekata svakog koncepta. Teorijska eko-efektivnost pretvorbe energije i signala dodjeljuje se svakoj transformaciji ulazne u izlazni oblik energije ili signala kojima se realiziraju lanci efekata. Tablica 4-6 prikazuje teorijske eko-efektivnosti pretvorbe energije i signala.

U pripadajućoj pomoćnoj tablici koncepta zapisuju se parcijalne teorijske eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala, kao i njihov zbroj koji čini ukupnu eko-efektivnost pretvorbi energije i signala koncepta. Ekološka prihvatljivost prema kriteriju broja pretvorbi energije i signala računa se prebrojavanjem pretvorbi energije i signala čija je teorijska eko-efektivnost različita od nule, tj. prebrojavanjem pretvorbi kod kojih postoji transformacija ulaznog oblika energije u izlazni oblik energije.

U drugom dijelu pomoćne tablice zapisuju se podaci potrebni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljem kriterija ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu i kriterija broj sekundarnih efekata prema okolišu. Ocjena ekološke prihvatljivosti pojedinog sekundarnog efekta prema okolišu dodjeljuje se prema Tablici 4-8.

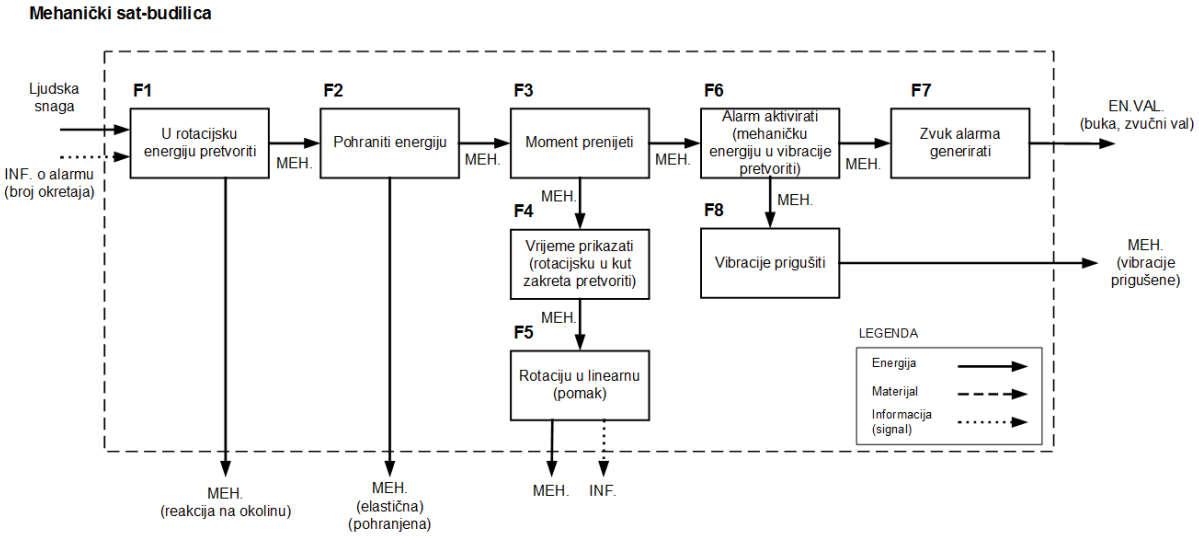
Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu temelji se na zbroju parcijalnih ocjena sekundarnih efekata prema okolišu koncepta. Vrednovanje prema kriteriju broj sekundarnih efekata prema okolišu računa se prebrojavanjem sekundarnih efekata prema okolišu koncepta.

U nastavku su prikazani lanci efekata i sekundarni efekti prema okolišu tri koncepta stolnog sata-budilice, te pomoćne tablice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti ovih koncepata. Nakon vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti definiranih ovim istraživanjem, u matrici odlučivanja sažimaju se podaci potrebni za dodjeljivanje rangova parcijalnim vrednovanjima prema pojedinim kriterijima ekološke prihvatljivosti i konačni rezultati rangiranja nakon agregiranja vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti.

Analizirani koncepti su koncepti mehaničkog, mehaničko-digitalnog i digitalnog sata-budilice.

### *4.7.1. Koncept mehaničkog sata-budilice*

Mehanički sat je uređaj koji koristi mehanički mehanizam za mjerenje protoka vremena, prikazivanje trenutnog vremena, te po potrebi namještanje i pokretanje alarma u zadanom vremenu. U urarstvu razlikujemo tri vrste mehanizama. Mehanizmi mogu biti u potpunosti mehanički (koncept mehaničkog sata-budilice), potpuno elektronički bez pokretnih dijelova (koncept digitalnog sata-budilice) ili kombinacija ta dva tipa mehanizama (koncept mehaničko-digitalnog sata-budilice). U nastavku je objašnjen način rada mehaničkog sata-budilice u cilju razumijevanja lanaca efekata i sekundarnih efekata prema okolišu mehaničkog sata-budilice. Slika 4-25 prikazuje funkcijsku struktur mehaničkog sata-budilice. Slika 4-27 prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte prema okolišu.




Slika 4-25. Funkcijska struktura mehaničkog sata-budilice

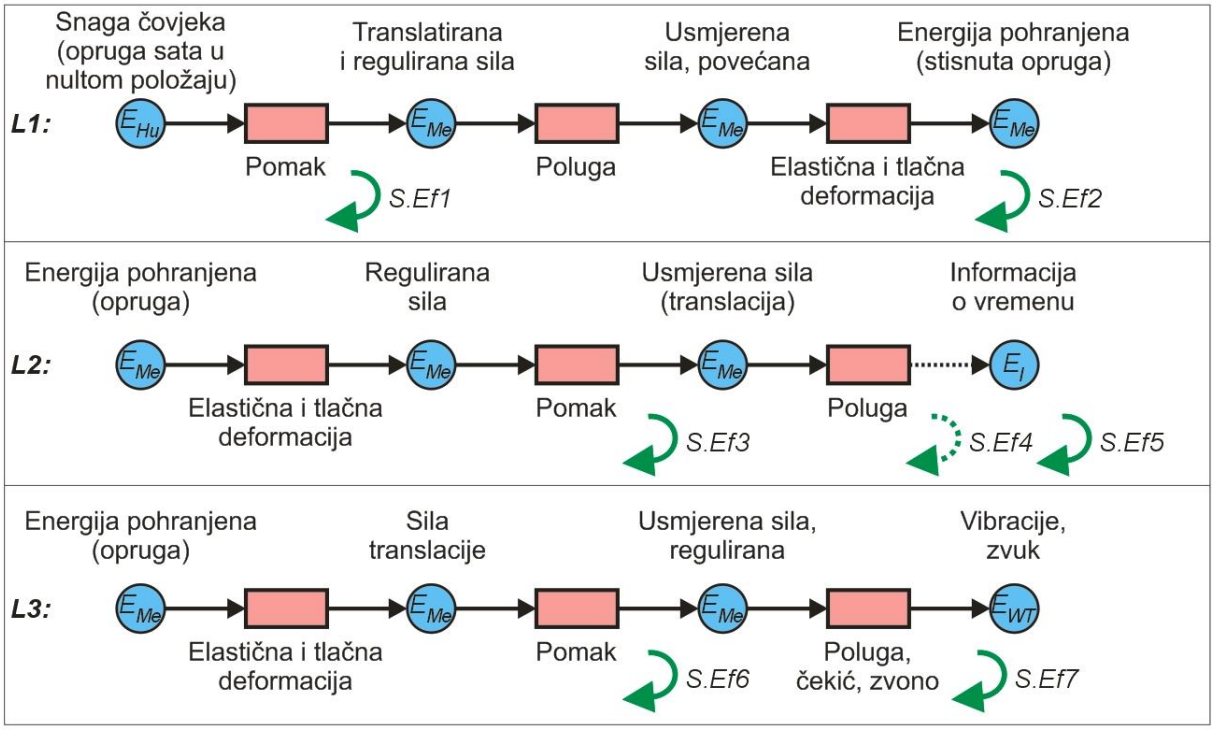
Mehanički sat-budilica sastoji se od krunice sata (služi za namještanje trenutnog vremena i vremena alarma), brojčanika, satne, minutne i sekundne kazaljke sata, kućišta sata, te mehaničkog mehanizma. Mehanizam mehaničkog sata-budilice sastoji se od nekoliko zupčanika, poluga, spojki i opruga. Glavna opruga sata se mora periodično navijati preko krunice sata kako bi satu osigurala potrebnu pokretačku energiju. Lanac efekata koji opisuje energetske transformacije uslijed pretvorbe energije čovjeka u rotacijsku energiju, pomak preko poluge, te elastičnu deformaciju opruge ima oznaku *L1* (Tablica 4-17). Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala, kriteriju broj pretvorbi energije i signala, kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu i kriteriju broj sekundarnih efekata prema okolišu prikazano je u pomoćnoj tablici koncepta (Tablica 4-17).

| Oznaka | Značenje |
|---|---|
| | Ulazno ili izlazno stanje operanda (oblik energije) |
| | Fizikalni efekt (fizikalni zakon) |
| | Sekundarni efekt prema okolišu (oblik energije) |

| Oznaka | Značenje |
|---|---|
| | Energija |
| | Materijal |
| | Signal |

| Oznaka | Značenje |
|---|---|
| | Sekundarni efekt prema okolišu (tok energije) |
| | Sekundarni efekt prema okolišu (tok materijala) |
| | Sekundarni efekt prema okolišu (tok signala) |

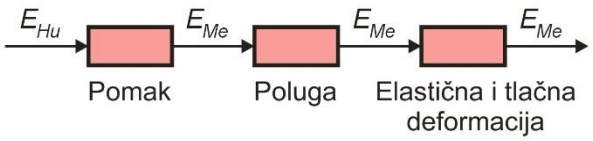
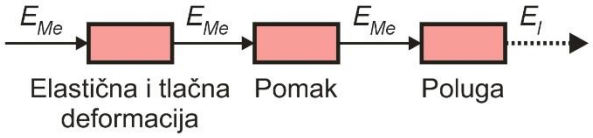
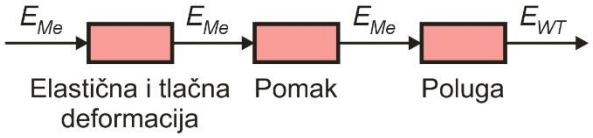
Slika 4-26. Legenda oznaka lanaca fizikalnih efekata koncepata sata-budilice




Slika 4-27. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta mehaničkog sata budilice (legenda: Slika 4-26)

Sila u opruzi prenosi se putem niza zupčanika koji napajaju nemirnicu, tj. balansni kotačić koji oscilira naprijed-nazad konstantnom brzinom [329]. Svakim pokretom nemirnice mehanička poluga pokreće zupčanike u jednom smjeru što pomiče kazaljke sata unaprijed konstantnom brzinom [329]. Pomicanje zupčanika koji upravljaju satnom, minutnom i sekundnom kazaljkom sata koje preko brojčanika sata prikazuju informaciju o vremenu. Pritom, transformacije energije u lancu efekata s oznakom *L2* su pretvorba mehaničke energije u signal (informaciju o trenutnom vremenu). Pokretanje zupčanika proizvodi specifičan zvuk "kucanja" [329], koji je sekundarni efekt prema okolišu (Tablica 4-17, oznaka *S.Ef5)*.

Tablica 4-17. Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničkog sata-budilice

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* |  $E_{Hu} \rightarrow E_{Me}$ = -4,94; $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0; $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0. | -4,94 |
| *L2* |  $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0; $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0; $E_{Me} \rightarrow E_I$ = 8,24. | +8,24 |
| *L3* |  $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0; $E_{Me} \rightarrow E_{Me}$ = 0; $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = -0,18. | -0,18 |
| Ukupno: | ~6 transformacija = 0; 2 transformacije < 0; 1 transformacija > 0. | 3,12 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef2* ($E_{Me}$) | Ponovno korištenje otpada/emisija (ili ostvarivo s manjim izmjenama) → (+7) | +7 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_I$) | Nema otpada/emisija → (+10) | +10 |
| *S.Ef5* ($E_{WT}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef6* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef7* ($E_{WT}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| Ukupno: | 7 sekundarnih efekata prema okolišu (7 *S.Ef* > 0; 0 *S.Ef* < 0). | 61 |

Oznake: *L1, L2, L3* - Oznake lanaca fizikalnih efekata mehaničkog sata-budilice, S.*Ef1, S.Ef2, ... S.Ef7* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-27), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

Pretvorbe mehaničke u mehaničku energiju česte su u lancima efekata kod mehaničkog sata-budilice. Teorijska eko-efektivnost tih pretvorbi jednaka je 0, pa su te transformacije neutralne po pitanju ekološke prihvatljivosti. Ekološki nepovoljne pretvorbe su one kod kojih je teorijska eko-efektivnost pretvorbi energije ili signala manja od 0.

Na Slici 4-27 i u pomoćnoj tablici koncepta mehaničkog sata-budilice (Tablica 4-17) prikazane su transformacije energije kod kojih postoji promjena ulaznog u izlazni oblik energije. Radi se o pretvorbi snage čovjeka u mehaničku energiju (lanac efekata *L1*), te pretvorbi mehaničke energije u buku, tj. akustičnu energiju potrebnu za generiranje zvuka alarma (lanac efekata *L3*).

Buka se klasificira kao energija valova ($E_{WT}$). U slučaju kada je buka sekundarni efekt prema okolišu (lanac efekata *L2*), vrednuje se prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8). Pretvorba mehaničke energije u signal (lanac efekata *L2*) je ekološki prihvatljiva transformacija jer je koeficijent teorijske eko-efektivnosti te transformacije veći od 0. Tablica 4-6 prikazuje koeficijente teorijske eko-efektivnosti energije i signala. Time je omogućeno da konstruktor tijekom vrednovanja ima uvid u koeficijente teorijske eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala, te kombinacije mogućih pretvorbi oblika energije i signala čime se nastojalo optimizirati vrijeme potrebno za vrednovanje ekološke prihvatljivosti prema ovom kriteriju. Broj pretvorbi u kojima postoji pretvorba ulaznog u izlazni oblik energije koncepta mehaničkog sata-budilice iznosi 3.

U pomoćnoj tablici (Tablica 4-17) zabilježeno je 7 sekundarnih efekata prema okolišu. Ocjene ekološke prihvatljivosti dodjeljuju se prema vrijednosnoj skali za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8).

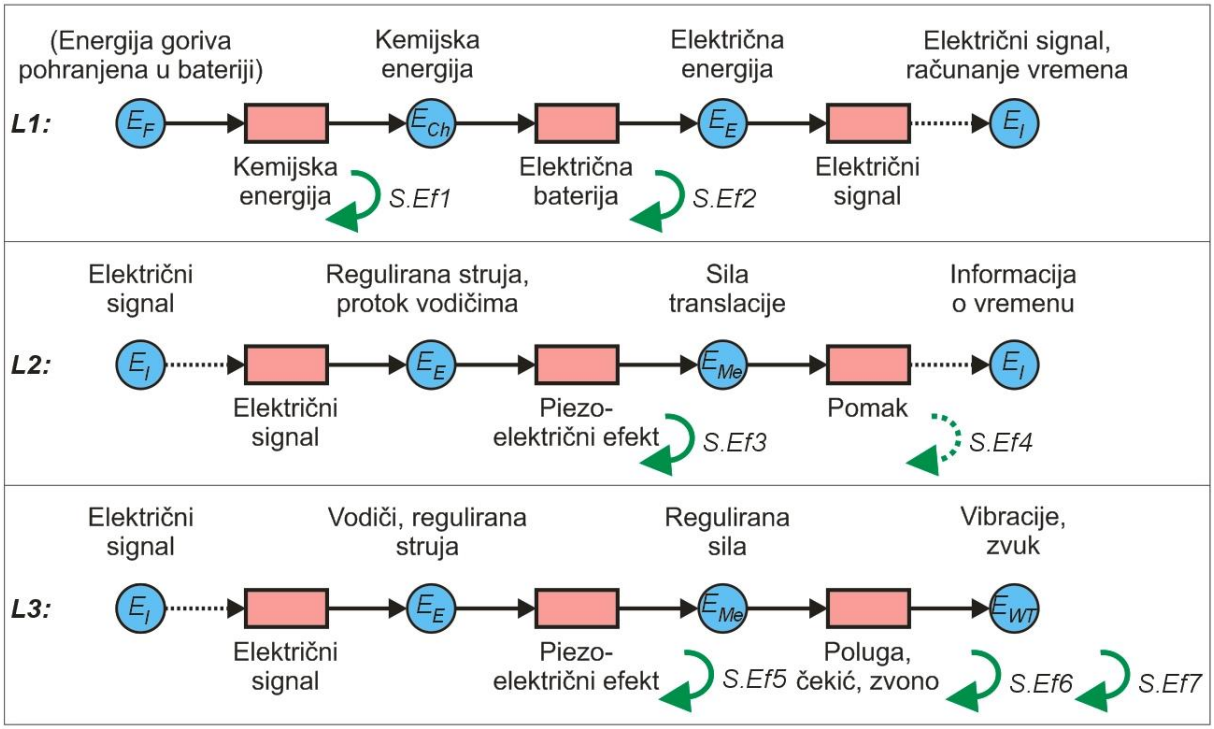
U slučaju sekundarnih efekata prema okolišu koje su vibracije ili buka (Slika 4-27: *S.Ef1*, *S.Ef3*, *S.Ef5*, *S.Ef6*, *S.Ef7)*, dodijeljene su visoke ocjene ekološke prihvatljivosti (+9) zbog značajno malo otpada i emisija koje ti sekundarni efekti uzrokuju. Ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnog efekta koji je po vrsti informacija (*S.Ef4* - prikaz trenutnog vremena preko kazaljka i brojčanika sata) vrednovan je kao izrazito ekološki povoljan (+10) jer ne uzrokuje neposredne sekundarne efekte prema okolišu. U slučaju sekundarnog efekta prema okolišu koji označava pohranjenu mehaničku (elastičnu) energiju (*S.Ef2)*, ekološka

prihvatljivost sekundarnog efekta je nešto niža nego kod ostalih sekundarnih efekata ovog koncepta (ocjena 7), no i dalje se radi o relativno visokoj ekološkoj prihvatljivosti ovog sekundarnog efekta prema okolišu.

Zaključci o ekološkoj prihvatljivosti koncepata koji se vrednuju predloženom metodom mogu se donijeti tek nakon generiranja lanaca efekata, identificiranja sekundarnih efekata prema okolišu i popunjavanja pomoćnih tablica svih koncepata iz skupa razmatranih koncepata. To je stoga što iako parcijalne ocjene ekološke prihvatljivosti mogu upućivati na ekološki prihvatljiv koncept, metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti je relativna metoda, te time upućuje na ekološku prihvatljivost koncepta relativno na ostale koncepte u skupu vrednovanih koncepata.

### *4.7.2. Koncept mehaničko-digitalnog sata-budilice*

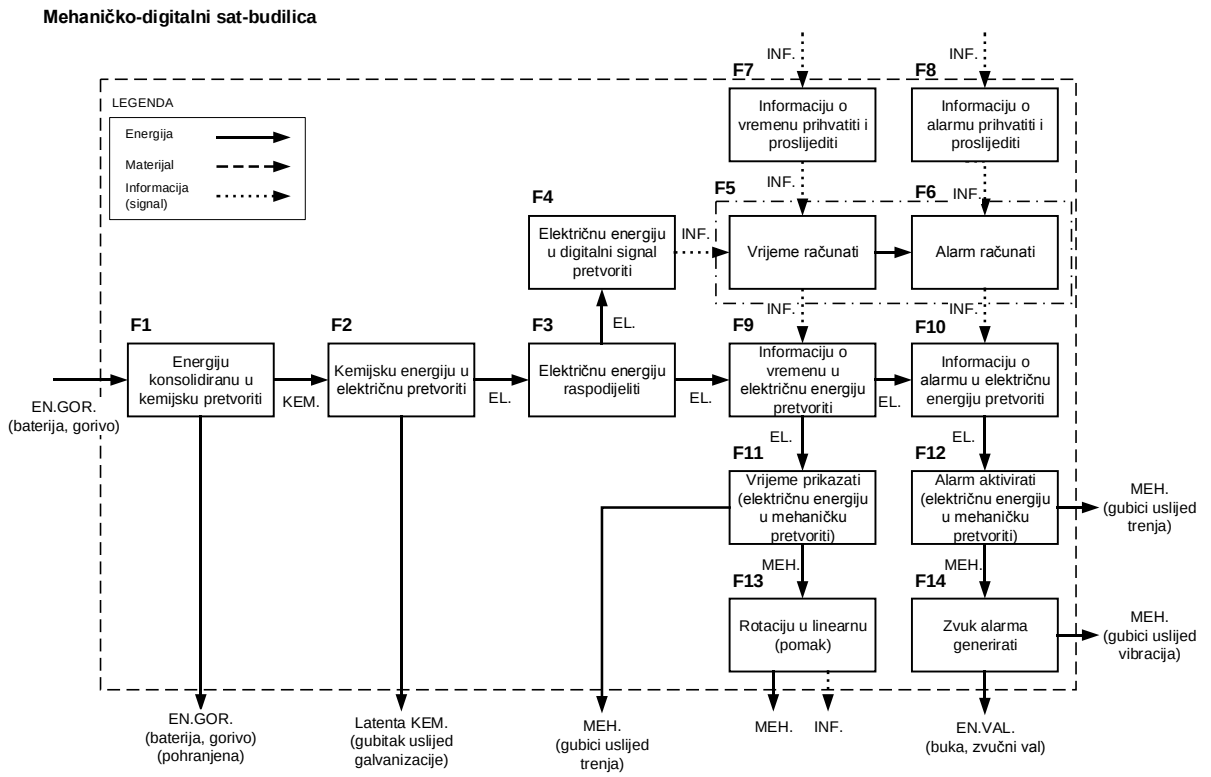
Slika 4-28 prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte prema okolišu koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice. U pomoćnoj tablici (Tablica 4-18) prikazano je vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala za lance fizikalnih efekata koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice, te izračun dobrote za vrednovanje prema kriteriju broj pretvorbi energije i signala, kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, te kriteriju broj sekundarnih efekata prema okolišu.




Slika 4-28. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice (legenda: Slika 4-26)

Kao i kod mehaničkog sata-budilice, nema promjena agregatnog stanja materijala. Ekološki nepovoljne pretvorbe su pretvorba energije pohranjene u bateriji sata-budilice u kemijsku energiju (Slika 4-28: lanac efekata *L1*), pretvorbe signala u električnu energiju (Slika 4-28: lanci efekata *L2* i *L3*), te pretvorba mehaničke energije u energiju valova (Slika 4-28: lanac efekata *L3*). Za okoliš prihvatljive pretvorbe su transformacija kemijske u električnu energiju (Slika 4-28: lanac efekata *L1*), pretvorba električne energije u signal (Slika 4-28: lanac efekata *L1*), pretvorbe električne u mehaničku energiju (Slika 4-28: lanci efekata *L2* i *L3*), te pretvorba mehaničke energije u signal (Slika 4-28: lanac efekata *L2*).

Ukupna teorijska eko-efektivnost pretvorbi energija koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice izračunava se zbrajanjem teorijskih eko-efektivnosti pretvorbi oblika energije i signala koncepta (Tablica 4-6). Kako je teorijska eko-efektivnost pretvorbi oblika energije koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice manja nego kod koncepta mehaničkog sata-budilice, može se zaključiti da je ekološka prihvatljivost ovog koncepta prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala manja od ekološke prihvatljivosti koncepta mehaničkog sata-budilice.

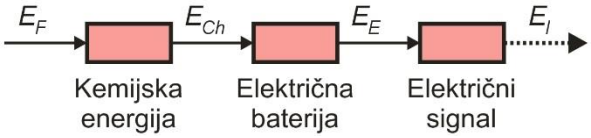
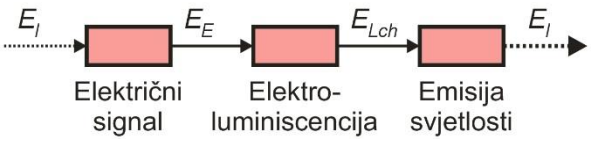
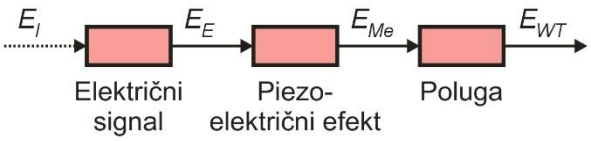



Slika 4-29. Funkcijska struktura mehaničko-digitalnog sata-budilice

Broj pretvorbi energije i signala u neki drugi oblik energije koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice iznosi 9, što je više nego kod koncepta mehaničkog sata-budilice. Vrednovanje prema ovom kriteriju upućuje da je mehaničko-digitalni koncept sata-budilice nepovoljniji za okoliš od mehaničkog sata-budilice.

U pomoćnoj tablici mehaničko-digitalnog sata-budilice zabilježeno je 7 sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-18). Ocjene ekološke prihvatljivosti efektima dodijeljene su prema vrijednosnoj skali za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8).

Tablica 4-18. Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničko-digitalnog sata-budilice

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* |  <br>$E_F \rightarrow E_{Ch}$ = -0,40; $E_{Ch} \rightarrow E_E$ = 1,05; $E_E \rightarrow E_I$ = 7,47. | +8,12 |
| *L2* |  <br>$E_I \rightarrow E_E$ = -7,47; $E_E \rightarrow E_{Me}$ = -0,77; $E_{Me} \rightarrow E_I$ = 8,24. | 0 |
| *L3* |  <br>$E_I \rightarrow E_E$ = -7,47; $E_E \rightarrow E_{Me}$ = -0,77; $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = -0,18. | -8,42 |
| Ukupno: | 6 transformacija < 0; 3 transformacije > 0. | -0,3 |
| Oznaka | Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu | Dobrota |
| *S.Ef1* ($E_F$) | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) → (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{LCh}$) | Ponovno korištenje otpada/emisija (ili ostvarivo s manjim izmjenama) → (-6) | -6 |
| *S.Ef3* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_I$) | Nema otpada/emisija → (+10) | +10 |
| *S.Ef5* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef6* ($E_{WT}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef7* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| Ukupno: | 7 sekundarnih efekata prema okolišu (7 *S.Ef* > 0; 0 *S.Ef* < 0). | 32 |

Oznake: *L1, L2, L3* – Lanci fizikalnih efekata mehaničko-digitalnog sata-budilice, *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef7* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-28), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

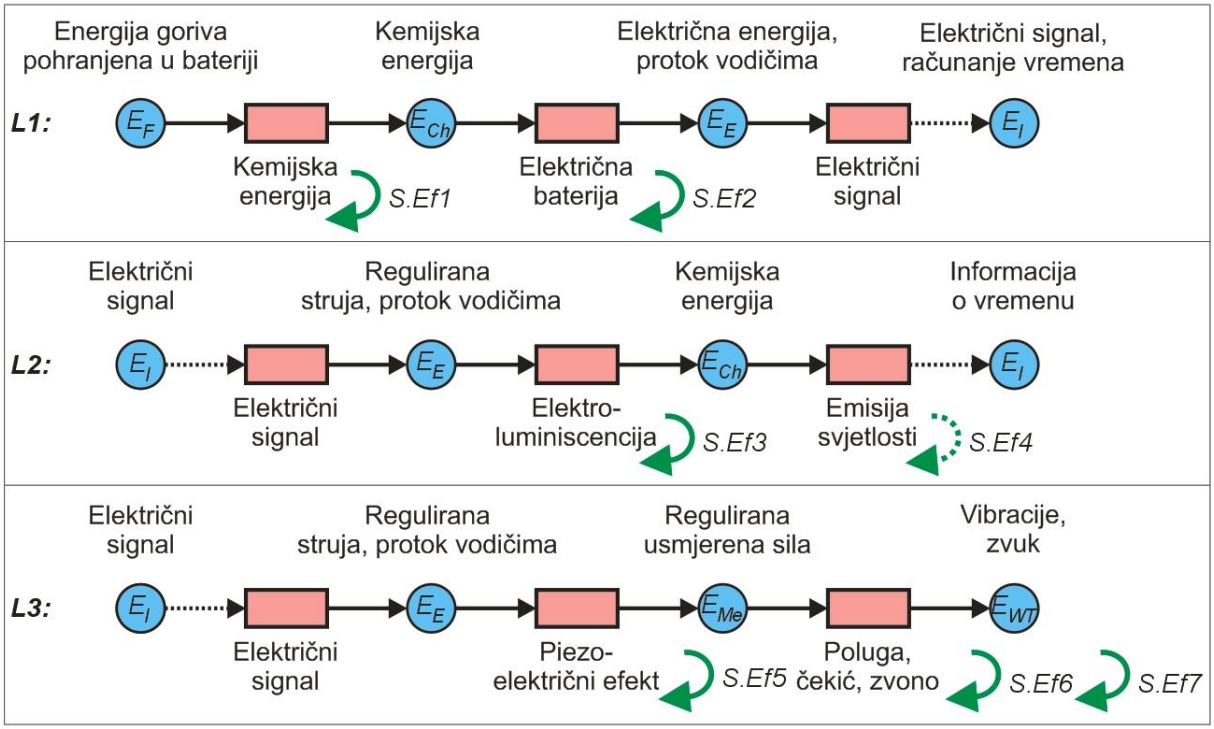
Četiri sekundarna efekta prema okolišu koji su vibracije ili trenje su mehanička energija prema obliku energije. Sekundarnim efektima su dodijeljene ocjene ekološke prihvatljivosti u iznosu 9 zbog značajno malo otpada i emisija koje uzrokuju. Kao i kod mehaničkog sata-budilice, ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnog efekta koji je po vrsti informacija vrednovan je kao izrazito ekološki povoljan. Sekundarni efekt prema okolišu do kojeg dolazi uslijed pretvorbe kemijske u električnu energiju (električna baterija) po vrsti je klasificiran kao latentna kemijska energija. Ovom sekundarnom efektu dodijeljena je ocjena -6, te je time vrednovan ekološki neprihvatljivim.

Energija pohranjena u bateriji sata-budilice klasificirana je kao energija goriva, a ovom sekundarnom efektu prema okolišu dodijeljena je ocjena ekološke prihvatljivosti -8. Ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu je zbroj parcijalnih ocjena ekološke prihvatljivosti. Taj zbroj je veći kod mehaničkog sata-budilice nego kod mehaničko-digitalnog sata-budilice. Moguće je zaključiti da je koncept mehaničkog sata-budilice ekološki prihvatljiviji od koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu. Vrednovanje prema kriteriju broj sekundarnih efekata prema okolišu također upućuje da je koncept mehaničkog sata-budilice ekološki prihvatljiviji od koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice.

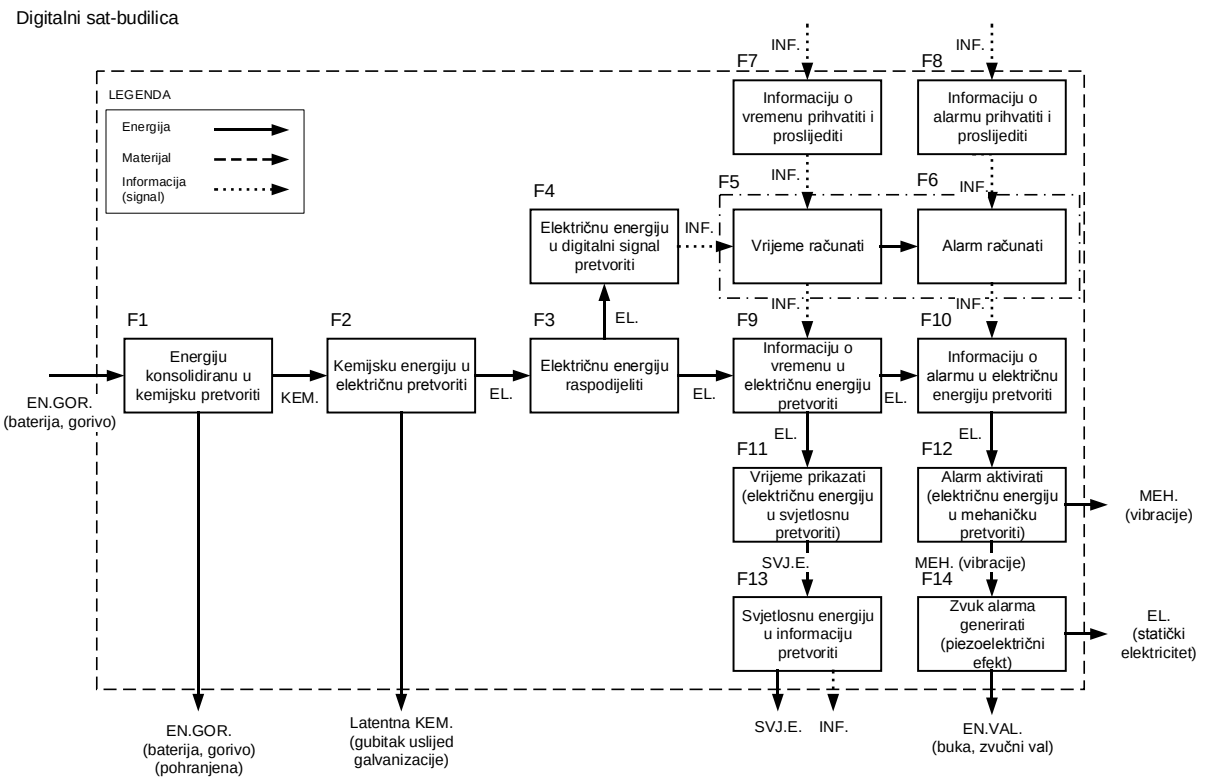
### *4.7.3. Koncept digitalnog sata-budilice*

Slika 4-30 prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekti prema okolišu koncepta digitalnog sata-budilice. Fizikalni efekti koncepta digitalnog sata-budilice razlikuju se od fizikalnih efekata mehaničko-digitalnog sata-budilice u pretvorbi oblika energije koja je potrebna za ostvarivanje lanca efekata *L2*, te sekundarnim efektima prema okolišu *S.Ef2*, *S.Ef3* i *S.Ef7*.

Kod koncepta digitalnog sata-budilice postoje dvije pretvorbe energije kojih nema u konceptima mehaničkog i mehaničko-digitalnog sata-budilice. To su pretvorba električne energije u latentnu kemijsku energiju i pretvorba električne energije u svjetlosnu energiju.

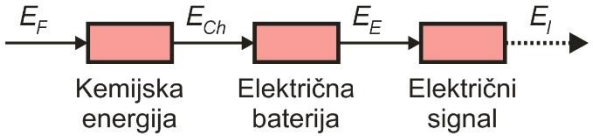
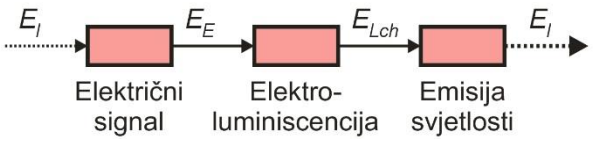
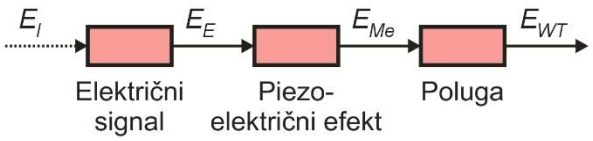



Slika 4-30. Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti prema okolišu koncepta digitalnog sata-budilice (legenda: Slika 4-26)




Slika 4-31. Funkcijska struktura digitalnog sata-budilice

Tablica 4-19. Pomoćna tablica za vrednovanje digitalnog sata-budilice

| Oznaka | Lanac fizikalnih efekata - vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala | Dobrota (zbroj) |
|---|---|---|
| *L1* |  <br>$E_F \rightarrow E_{Ch}$ = -0,40; $E_{Ch} \rightarrow E_E$ = 1,05; $E_E \rightarrow E_I$ = 7,47. | 8,12 |
| *L2* |  <br>$E_I \rightarrow E_E$ = -7,47; $E_E \rightarrow E_{LCh}$ = -2,28; $E_{LCh} \rightarrow E_I$ = 9,74. | -0,28 |
| *L3* |  <br>$E_I \rightarrow E_E$ = -7,47; $E_E \rightarrow E_{Me}$ = -0,77; $E_{Me} \rightarrow E_{WT}$ = -0,18. | -8,42 |
| Ukupno: | 6 transformacija < 0; 3 transformacije > 0. | -0,58 |
| **Oznaka** | **Sekundarni efekti prema okolišu - vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu** | **Dobrota** |
| *S.Ef1* ($E_F$) | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) → (-8) | -8 |
| *S.Ef2* ($E_{LCh}$) | Ponovno korištenje otpada/emisija (ili ostvarivo s manjim izmjenama) → (-6) | -6 |
| *S.Ef3* ($E_{LCh}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef4* ($E_I$) | Nema otpada/emisija → (+10) | +10 |
| *S.Ef5* ($E_{WT}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef6* ($E_{Me}$) | Značajno malo otpada/emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9) | +9 |
| *S.Ef7* ($E_E$) | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (značajni doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) → (-4) | -4 |
| Ukupno: | 7 sekundarnih efekata prema okolišu (4 *S.Ef* > 0; 3 *S.Ef* < 0). | 19 |

Oznake: *L1, L2, L3* – Lanci fizikalnih efekata digitalnog sata-budilice, *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef7* - Sekundarni (latentni) efekti prema okolišu (Slika 4-30), Tablica 4-5: oznake oblika energije i signala.

Teorijska eko-efektivnost pretvorbe električne energije u latentnu kemijsku energiju i električne energije u svjetlosnu energiju ima negativan predznak. Zbog toga je i ukupna teorijska eko-efektivnost pretvorbi energije i signala koncepta digitalnog sata-budilice manja nego kod koncepata mehaničkog i mehaničko-digitalnog sata-budilice. U pomoćnoj tablici koncepta digitalnog sata-budilice izračunat je broj pretvorbi oblika energije i signala, te iznosi 10 (Tablica 4-19).

Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu manja je nego kod koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice zbog sekundarnog efekta statičkog elektriciteta koji nastaje uslijed piezoelektričnog efekta kojim se ostvaruje generiranje zvuka alarma (Slika 4-30: lanac efekata *L3,* sekundarni efekt prema okolišu *S.Ef7*). Iako koncept mehaničko-digitalnog sata-budilice i digitalnog sata-budilice imaju jednak broj sekundarnih efekata prema okolišu, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu bolja je kod mehaničko-digitalnog koncepta sata-budilice.

### *4.7.4. Rezultati vrednovanja koncepata stolnog sata-budilice predloženom metodom*

Rezultati vrednovanja prema istraživanjem predloženim pet kriterija ekološke prihvatljivosti sažeti su u matrici odlučivanja u kojoj se provodi rangiranje tri koncepta sata-budilice, prvo prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti, a zatim obzirom na sveukupnu ocjenu ekološke prihvatljivosti. Rezultati ukazuju da je koncept mehaničkog sata-budilice ekološki prihvatljivija alternativa pri usporedbi s mehaničko-digitalnim i digitalnim konceptom stolnog sata-budilice.

Kako kod koncepata stolnog sata-budilice nema transformacija koje ukazuju na pretvorbu agregatnog stanja materijala, sva tri koncepta ocijenjena su najvišom ocjenom prema ovom kriteriju. Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala, kriteriju broj pretvorbi energije i signala, te kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu imaju najveći utjecaj na rangiranje koncepata u ovom ilustrativnom primjeru primjene predložene metode.

Tablica 4-20. Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti stolnog sata-budilice)

| ↓ Koncepti | Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$, rang $e_{ij}$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $S_{\epsilon_{TR}}$ (max) | $e_{i1}$ | $N_{\epsilon_{TR}}$ (min) | $e_{i2}$ | $S_{\epsilon_{EF}}$ (max) | $e_{i3}$ | $N_{\epsilon_{EF}}$ (min) | $e_{i4}$ | $N_{Agr}$ (min) | $e_{i5}$ | $V_{\text{eij}}$ |
| α | 3,12 | 1 | 3 | 1 | 61 | 1 | 7 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| β | -0,3 | 2 | 9 | 2 | 32 | 2 | 7 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| γ | -0,58 | 3 | 9 | 2 | 19 | 3 | 7 | 1 | 0 | 1 | 10 |

Oznake: α - koncept mehaničkog sata-budilice, β - koncept mehaničko-digitalnog sata-budilice, γ - koncept digitalnog sata-budilice, $S_{\epsilon_{TR}}$ - Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala (Tablica 4-6), $N_{\epsilon_{TR}}$ - Broj pretvorbi energije i signala, $S_{\epsilon_{EF}}$ - Zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu (Tablica 4-8), $N_{\epsilon_{EF}}$ - Broj sekundarnih efekata prema okolišu, $N_{Agr}$ - Broj promjena agregatnog stanja materijala, $V_{\text{eij}}$ - suma rangova $e_{\text{ij}}$, (max)/(min) – maksimizirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti.

Rezultati primjene predložene metode u cilju rangiranja koncepata stolnog sata-budilice mogu se usporediti su s rezultatima usporedbe ekološke prihvatljivosti *Function Impact Matrix* metodom [50]. Rezultati vrednovanja rangiranjem predloženom metodom i *FIM* [50] metodom su jednaki, odnosno rangiraju koncepte istim redoslijedom od ekološki povoljnijeg do ekološki nepovoljnijeg.

Bernstein i drugi [50] koristili su *FIM* metodu kako bi vrednovali ekološku prihvatljivost istih koncepata. *FIM* metoda zahtjeva analizu koncepata i identificiranje glavnih funkcija i podfunkcija razmatranih koncepata, te je definirano ukupno 8 funkcija i podfunkcija. Rezultati pokazuju da su utjecaji na okoliš za funkciju 'alarm aktivirati' najmanji kod koncepta mehaničkog sata-budilice, a najveći kod koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice. Utjecaji na okoliš za funkciju 'kućište' najveći su kod koncepta mehaničkog sata-budilice, a najmanji kod koncepta mehaničko-digitalnog sata-budilice. *FIM* metoda [50] pruža potporu rekonstrukciji proizvoda na način da omogućava povezivnje utjecaja na okoliš proizvoda i njegovih funkcija. Obzirom da je za primjenu *FIM* metode potrebno provesti procjenu životnog ciklusa proizvoda radi procjene utjecaja proizvoda na okoliš, *FIM* metoda je podatkovno i vremenski zahtjevnija od vrednovanja ekološke prihvatljivosti predloženom metodom.

Temeljem rezultata dobivenim *FIM* metodom, u studiji koju su proveli Bernstein i drugi [50], konstruktori su predložili novi 'hibridni' koncept stolnog sata-budilice čiji je temeljni koncept ekološki najprihvatljiviji koncept mehaničkog sata-budilice. Konstruktori su predložili zamjenu materijala kućišta i konstrukcije tog koncepta po uzoru na ekološki prihvatljivija parcijalna rješenja sporednih funkcija digitalnog sata-budilice, što bi rezultiralo čak 7 puta manjim utjecajima na okoliš nego kod originalnog koncepta mehaničkog sata-budilice. Zanimljivo otkriće u radu Bernstein i drugih [50] je da je temeljem analize *FIM* metodom omogućeno otkrivanje funkcija koje uzrokuju značajne utjecaje na okoliš i koje su time kandidati za poboljšanje i rekonstrukciju proizvoda.

Iako ukupni utjecaji na okoliš digitalnog sata-budilice ukazuju na ekološki prihvatljiviji koncept u usporedbi s mehaničkim satom-budilicom, utjecaji na okoliš glavne funkcije ne ukazuju na isti zaključak. Temeljem toga, konstruktori su zaključili da je potencijal za smanjivanjem utjecaja na okoliš koncepta digitalnog sata-budilice manji nego u slučaju mehaničkog sata-budilice. Naime, najveći utjecaji na okoliš mehaničkog sata-budilice upućivali su na nekoliko sporednih funkcija [330]. Stoga je za rješenje funkcije 'zvuk alarma generirati' predloženo parcijalno rješenje po uzoru na koncept digitalnog sata-budilice, dok je za rješenje funkcije 'vrijeme regulirati' odabrano parcijalno rješenje koncepta mehaničkog sata-budilice.

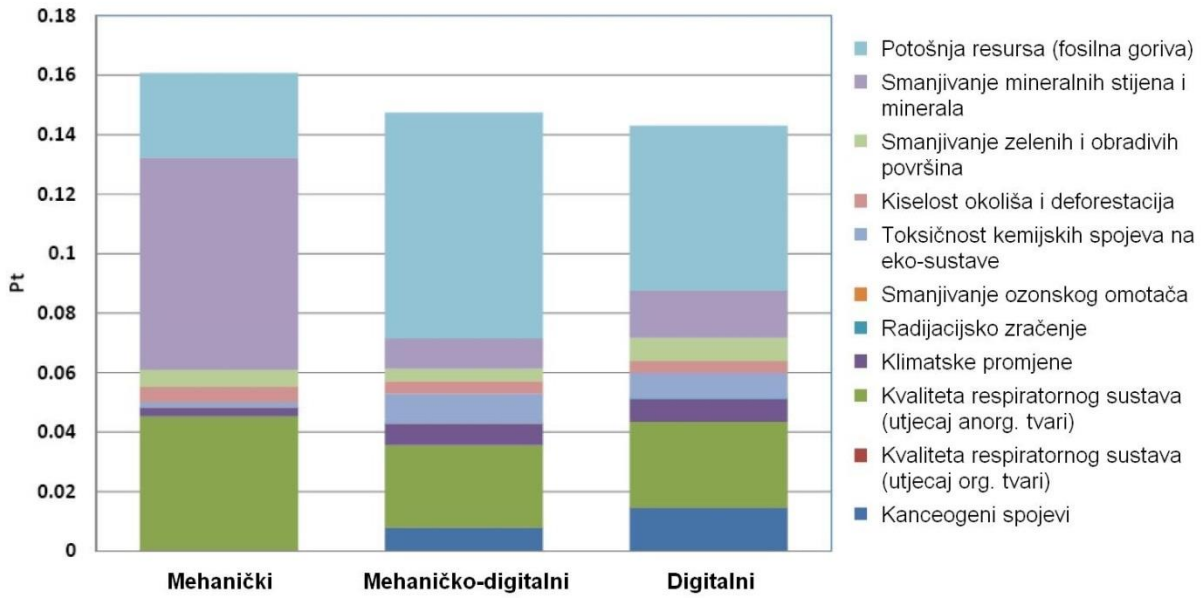
Predloženom metodom ostvareno je vrednovanje ekološke prihvatljivosti i rangiranje temeljem pet kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda propisanih metodom. Rezultati rangiranja ukazuju na rangiranje ekološke prihvatljivosti koncepata sljedećim redoslijedom od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog koncepta: mehanički sat-budilica, mehaničko-digitalni sat-budilica te zatim digitalni sat-budilica. Rangiranje koncepta predloženom metodom identično je rangiranju temeljem vrednovanja *FIM* metodom u radu Bernstein i drugih [50].

U radu Bernstein i drugih [50] demonstrirana je efektivnost *FIM* metode za potporu aktivnostima rekonstrukcije proizvoda. Bernstein i drugi [50] zaključuju da je *FIM* metoda namijenjena rekonstrukciji proizvoda, no ne i razvoju novih i inovativnih koncepata proizvoda. Glavni nedostaci *FIM* metode su subjektivnost konstruktora pri povezivanju utjecaja na okoliš komponente i funkcije proizvoda, te nesigurnost procjene životnog ciklusa proizvoda do koje

dolazi zbog nedostupnosti podataka o životnom ciklusu proizvoda, odabiru granice sustava i metode procjene utjecaja na okoliš [50].

Pretpostavimo li da su novi koncepti koji su predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti nastali temeljem već poznatih koncepata i referentnih proizvoda, informacije nužne za procjenu životnog ciklusa i zaključivanje o ekološki prihvatljivim konceptima su dohvatljive putem rastavljanja proizvoda i uspoređivanjem s najboljima [52]. No, kao što je demonstrirano na primjeru primjene predložene metode vrednovanjem ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja, koncepti koje je potrebno vrednovati u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava često su originalnog dizajna, tj. mogu se temeljiti na implementiranju različitih tehnologija zbog čega je usporedba kvalitete i učinkovitosti takvih koncepata zahtjevnija za vrednovatelja. Zbog toga što se usporedba na razini koncepcijskog rješenja kod *FIM* metode temelji na usporedbi istih funkcija, kod koncepata originalnog dizajna, usporedba i vrednovanje se ne može efektivno ostvariti primjenom *FIM* metode.

*FIM* metoda [52] služi generiranju matrice funkcije-utjecaji na okoliš temeljem podataka o utjecajima na okoliš sličnih proizvoda, a primjenjuje se u cilju rekonstrukcije i razvoja novih proizvoda. Kako bi vrednovali *FIM* metodu, Bernstein i drugi [50] proveli su funkcionalnu dekompoziciju stolnih satova-budilica, rastavljanje proizvoda temeljem čega su generirali listu materijala za tri analizirana koncepta proizvoda i procjenu utjecaja na okoliš *EcoIndicator 99* metodom [328]. Pri procjeni životnog ciklusa zanemarene su sljedeće faze životnog ciklusa analiziranih proizvoda: faza proizvodnje i sastavljanje proizvoda, faza transporta i faza kraja životnog ciklusa.




Slika 4-32. Utjecaji na okoliš tri stolna sata-budilice [330]

Rezultati usporedbe analiziranih koncepata stolnih satova-budilica *EcoIndicator 99* metodom [328] ukazuju na veoma sličan ekološki profil razmatranih proizvoda [330]. Procjena utjecaja digitalnog sata-budilice ukazuje na oko 10% veću ekološku prihvatljivost tog koncepta u usporedbi s mehaničkim satom-budilicom. Taj rezultat je u granicama pogreške procjene životnog ciklusa. Bernstein i drugi [50] navode da rezultati procjene životnog ciklusa u ovom slučaju nisu bili od koristi konstruktorima u cilju rekonstrukcije i osmišljavanja novog koncepta koji bi bio ekološki prihvatljiviji od navedenih koncepata. Stoga su Bernstein i drugi [50] konstruktorima ponudili *FIM* metodu [52].

*FIM* metodom [52] utjecaji na okoliš dodijeljeni su pripadajućim funkcijama proizvoda (funkcijama proizvoda koje ih uzrokuju) što je konstruktorima omogućilo da bolje sagledaju ekološke profile triju analiziranih koncepata proizvoda. Temeljem ovih ekoloških profila konstruktori su proveli rekonstrukciju i predložili ekološki prihvatljiviji koncept [50]. Rezultati povezivanja funkcija proizvoda i pripadajućih utjecaja na okoliš *FIM* metodom temelje se na prethodno prikupljenim podacima putem upitnika. Povezivanje funkcija proizvoda i utjecaja proizvoda na okoliš *FIM* metodom [50] temelji se na subjektivnoj procjeni konstruktora ili ekodizajn eksperata.

Prema rezultatima procjene utjecaja na okoliš Bernstein i drugih [50], ekološki najprihvatljiviji koncept je elektronički sat-budilica (0,135 Pt), zatim mehaničko-digitalni sat-budilica (0,145 Pt), a tek potom mehanički sat-budilica (0,15 Pt). Ako izuzmemo *kućište* i *konstrukcija proizvoda* iz procjene utjecaja na okoliš, rezultat rangiranja prema ekološkoj prihvatljivosti je mehanički sat-budilica (0,05 Pt), mehaničko-digitalni sat-budilica (0,095 Pt), te digitalni sat-budilica (0,135 Pt). Bernstein i drugi [50] ovim izuzimanjem funkcija i rangiranjem ukazuju da postoji veliki potencijal za minimiziranje utjecaja na okoliš rekonstrukcijom proizvoda. Ujedno ukazuju na poteškoće do kojih može doći pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda isključivo temeljem rezultata procjene životnog ciklusa. Naime, kad su konstruktori dobili na uvid samo rezultate procjene životnog ciklusa nisu proizveli rješenja za rekonstrukciju ili osmislili novi koncept proizvoda.

Kao rezultat primjene *FIM* metode [52] u studiji slučaja Bernstein i drugih [50], konstruktori su implementirali strategiju rekonstrukcije sporednih funkcija proizvoda za koje su procijenjeni zamjetno veliki utjecaji na okoliš. Iako digitalni sat-budilica ukupno ima manje utjecaje na okoliš nego mehanički sat-budilica, utjecaji na okoliš dodijeljeni glavnim funkcijama nekoliko su puta veći kod digitalnog sata-budilice nego kod mehaničkog sata-budilice. Dakle, stupanj mogućeg smanjivanja utjecaja na okoliš rekonstrukcijom digitalnog sata-budilice manji je nego je to slučaj s mehaničkim satom-budilicom. To je stoga što su sporedne funkcije proizvoda potencijalni kandidati za rekonstrukciju [50].

Sporedne funkcije mehaničkog sata-budilice su glavna izvorišta utjecaja na okoliš tog proizvoda. Slijedno tomu ukupni utjecaji na okoliš mehaničkog sata-budilice u mnogome zavise od njegovih sporednih funkcija i preliminarnih rješenja tih funkcija. Iz tih razloga, konstruktori u studiji slučaja [50] strateški su odlučili odabrati mehanički sat-budilicu kao proizvod na kojem će izvesti rekonstrukciju radi smanjivanja utjecaja na okoliš.

Početni rezultati procjene utjecaja na okoliš *EcoIndicator 99*™ metodom ukazivali su na približno slične utjecaje na okoliš za sva tri koncepta stolnog sata-budilice [50]. Analizirani proizvodi, odnosno koncepti prilično se razlikuju u radnim principima, odnosno „*konstrukcijom* i *funkcijama"* [50]. Prema Bernstein i drugima [50] to je očekivano jer je razvoj ovih proizvoda vjerojatno bio vođen nastojanjem da se osmisle nova rješenja, a ne razvojem ekološki prihvatljivijih proizvoda.

Kod digitalnog i mehaničko-digitalnog sata-budilice, glavna funkcija 'alarm aktivirati' uzrokuje najviši udio svih utjecaja na okoliš. Kod mehaničkog sata-budilice, utjecaji na okoliš koncentrirani su u nekoliko sporednih funkcija*;* kućištu i konstrukciji proizvoda, dok glavna funkcija 'alarm aktivirati' uzrokuje samo mali dio ukupnih utjecaja na okoliš [50].

Prelazak sa mehaničkog na elektronički (digitalni) mehanizam donosi pogodnosti za korisnike (nema potrebe za ručnim navijanjem sata i lakše očitavanje vremena), no noviji koncepti ne donose pogodnosti po pitanju smanjenih utjecaja na okoliš. Najveći uzrok visokim utjecajima na okoliš digitalnog sata-budilice je u procesu proizvodnje tiskane pločice i elektroničkih komponenata [50].

## 4.8. Ograničenja predložene metode

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda predloženom metodom tijekom razvojnog procesa uslijed sljedećih ograničenja metode može biti zahtjevno za konstruktora ili tim konstruktora koji provodi vrednovanje.

Ograničenja predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti:

1.) Metoda zahtjeva prikupljanje podataka o konceptima koji se vrednuju, radnim principima, fizikalnim efektima i sekundarnim efektima prema okolišu koncepata te analizu koncepata i njihovih radnih principa u prvom koraku primjene metode.

2.) Primjena metode može zahtijevati dodatnu obuku konstruktora o tome kako generirati lance fizikalnih efekata, kako identificirati fizikalne efekte i sekundarne efekte prema okolišu, te kako koristiti kataloge fizikalnih efekata i principijelnih rješenja.

3.) Obzirom da su koncepti koji se vrednuju na razini razrade koncepcijskog rješenja, neke sekundarne efekte prema okolišu nije moguće predvidjeti, a time niti vrednovati u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

4.) Postoji rizik od nekonzistentnog dodjeljivanja ocjena sekundarnim efektima prema okolišu.

5.) Vrednovanje koncepata s velikim brojem transformacija i kompliciranim interakcijama fizikalnih efekata je vremenski zahtjevno.

6.) Metoda nije primjenjiva za kompleksne tehničke sustave jer generiranje lanaca fizikalnih efekata kod takvih sustava zahtjeva analizu fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu koja može biti preopširna i resursno prezahtjevna za provedbu u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

# 5. VREDNOVANJE TEMELJEM PROCJENE ŽIVOTNOG CIKLUSA

*U ovom poglavlju opisan je postupak, rezultati i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja metodom procjene životnog ciklusa (LCA). Ulazni podaci LCA metode generiraju se temeljem analize referentnih proizvoda i procjene životnog ciklusa koncepata. Podaci nužni za kvantifikaciju utjecaja na okoliš aproksimirani su temeljem analize već postojećih ili sličnih proizvoda i koncepata. Usporedba LCA koncepata pranja rublja i kvalitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti istih koncepata opisana je u 6. poglavlju ove disertacije.*

## 5.1. Uloga procjene životnog ciklusa u provedenom istraživanju

Unatoč ograničenjima primjene *LCA* metode tijekom razvoja tehničkih sustava, vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda koje se temelji na rezultatima *LCA* jedini je znanstveno utemeljeni i objektivan način vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda, te koncepata proizvoda. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi, u fazi konstrukcijske razrade i tijekom rekonstrukcije proizvoda provode se kombinirajući podatke o životnom ciklusu i utjecaju na okoliš referentnih proizvoda. Referentni proizvodi mogu biti već realizirani proizvodi poduzeća ili proizvodi konkurencije već prisutni na tržištu.

U cilju validacije kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata tehničkih sustava i predložene metode, potrebno je generirati dodatne podatke o ekološkoj prihvatljivosti koncepata pranja rublja jer su ovi koncepti identificirani kao ogledni primjer problema vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata u konceptualnoj fazi. Validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode podrazumijeva provjeru empirijske konzistentnosti i učinkovitosti razvijene potpore [77].

U istraživanju opisanom u ovoj disertaciji, provjera empirijske konzistentnosti i učinkovitosti temelji se na usporedbi rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata kvalitativnim metodama s vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata kvantitativnim metodama. Nakon studije u kojoj su ispitanici imali zadatak vrednovati ekološku prihvatljivost koncepata pranja rublja na kvalitativan način, ovo poglavlje donosi rezultate procjene utjecaja na okoliš istih koncepata, a koristeći metodu procjene životnog ciklusa (*LCA*) koja je kvantitativna metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda.

*Eco-Design Value* smjernice [82] u kombinaciji s tehnikom vrednovanja pravilo većine [91] odabrane su za reprezentativni primjer vrednovanja kvalitativnim metodama u studiji vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja. U literaturi su kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti okarakterizirane subjektivnima. Služeći se metodama koje su kvalitativne, konstruktori moraju imati na umu da će njihove osobne preferencije, znanje i iskustvo imati veliki utjecaj na ishode vrednovanja i rangiranja razmatranih rješenja. Obzirom da su koncepti (a ne do kraja realizirani proizvodi) predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, postoji dodatna neizvjesnost u pogledu predviđanja njihovih karakteristika i odlika jednom kada budu realizirani kao gotovi proizvodi.

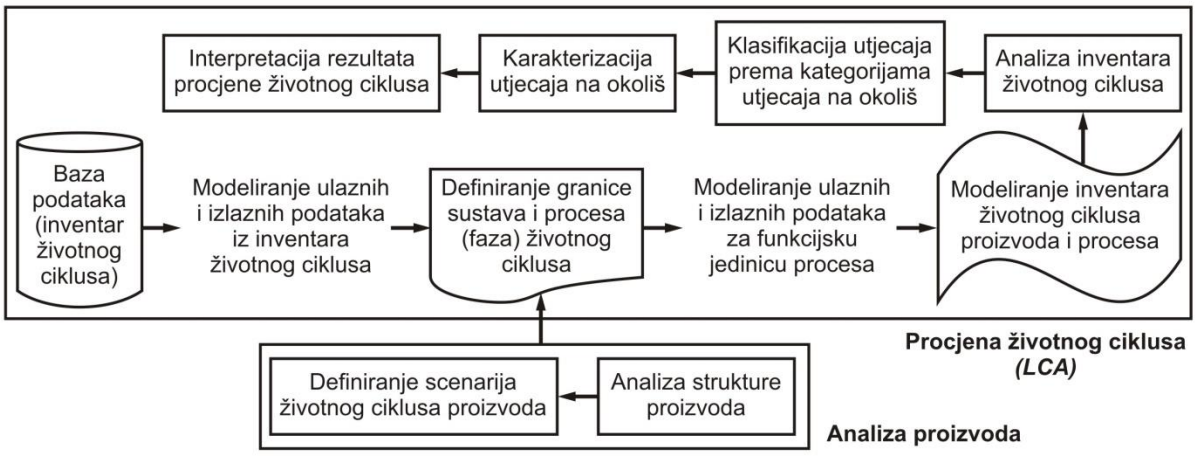
Metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) odabrana je kao ogledni primjer kvantitativnih metoda koje se koriste u cilju procjene utjecaja na okoliš. Ova metoda koristi se u procesu razvoja proizvoda kako bi se naknadno ustanovili utjecaji proizvoda na okoliš do kojih dolazi uslijed procesa koji čine njegov ukupni životni ciklus. *LCA* se uobičajeno provodi retroaktivnom analizom prošlih projekata i procjenom utjecaja na okoliš proizvoda tijekom konstrukcijske razrade. Primjeri u literaturi otkrivaju da je primjena *LCA* metode ostvariva i u

konceptualnoj fazi, ali potrebno je pretpostaviti neke ključne značajke (geometrijske značajke, materijale i tehnološke postupke u proizvodnji), te životni ciklus budućeg proizvoda.

## 5.2. *LCA* metoda

Utjecaj na okoliš svaka je promjena u okolišu, negativna ili pozitivna, nastala potpuno ili djelomično kao rezultat aktivnosti neke organizacije (ISO EN ISO 14001) [134]. Potrošnja materijala i energije tijekom životnog ciklusa proizvoda potencijalno može prouzročiti utjecaje na okoliš, bilo u obliku onečišćenja okoliša, promjenom staništa biljnog i životinjskog svijeta okoliša ili drugim promjenama u okolišu. Stoga što služi kvantifikaciji utjecaja proizvoda i proizvodnih aktivnosti na okoliš [134], [229], [292], a uslijed životnog ciklusa materijala, proizvoda ili procesa [36], [233], [331], metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) [1] prikladna je za primjenu u procesu konstruiranja i razvoja proizvoda [262].

Pomoću *LCA* moguće je prikazati procijenjeni utjecaj na okoliš proizvoda tijekom životnog ciklusa proizvoda, odnosno utjecaje na okoliš do kojih dolazi uslijed aktivnosti povezanih sa proizvodom i njegovom proizvodnjom [1], [34], [206]. Za potrebe procjene utjecaja na okoliš, životni ciklus proizvoda treba biti poznat, te podijeljen na faze kako bi utjecaji na okoliš mogli biti analizirani u svakoj fazi odvojeno [117], [332]. Zasebno se razmatraju ulazne sirovine i materijali, nabava i transport, proizvodnja, faza eksploatacije proizvoda, te gospodarenje otpadom kada proizvodu prestane uporabna vrijednost [134].




Slika 5-1. Koraci analize proizvoda i procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [101]

Dvije osnovne aktivnosti potrebne za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš su analiza proizvoda i procjena životnog ciklusa ili *LCA* proizvoda (Slika 5-1). U skladu sa zaključcima donesenima nakon analize proizvoda i njegovog budućeg životnog ciklusa, ekološka prihvatljivost proizvoda vrednuje se uzimajući u obzir potrošnju energije i materijala, emisije i otpad, te karakteristike proizvoda poput rastavljivosti, ekološke prihvatljivosti tehnoloških postupaka proizvodnje i reciklabilnosti materijala. Proizvodu se pristupa na način da se tijekom vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda uzimaju u obzir sve faze njegovog životnog vijeka, odnosno životni ciklus proizvoda u cijelosti.

Procjena životnog ciklusa može poslužiti za ekodizajn, optimiranje proizvoda i okolišnog utjecaja proizvođača ili poduzeća, postavljanja prioriteta primjene poboljšanja na proizvodu ili procesu, usporedbu proizvoda, marketing ili certificiranje proizvoda [147]. *LCA* metodologija nastala je u suradnji proizvodnih, vladinih i znanstvenih organizacija. Metodološki okvir i način provedbe metode propisani su standardom ISO 14040 [1].

Tablica 5-1. Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) [1]

| Koraci *LCA* | Opis |
|---|---|
| 1. Definiranje cilja i opsega studije | Definiraju se ciljevi i svrha za koju će se koristiti rezultati procjene životnog ciklusa. Zatim se definira opseg studije, koje faze životnog ciklusa su uključene u studiju, a koje ne, (pretpostavke procjene životnog ciklusa). Potom se definira funkcionalna jedinica za usporedbu i kategorije utjecaja na okoliš koje će se koristiti za prikaz utjecaja na okoliš. |
| 2. Analiza inventara životnog ciklusa | Razvoj inventara životnog ciklusa uključuje prikupljanje podataka o analiziranom proizvodu, procesima, definiranje ulaza i izlaza materijala i energije u pojedinim fazama životnog ciklusa (potrošnja resursa) i procjenu emisija, istjecanja i otpada u zrak, vodu i tlo. Rezultat analize inventara životnog ciklusa je tablica inventara životnog ciklusa i utjecaja na okoliš. Razvoj inventara životnog ciklusa uključuje rad sa digitalnim bazama licenciranih podataka za sastavljanje inventara životnog ciklusa i otkrivanje utjecaja na okoliš temeljem podataka u inventaru. |
| 3. Procjena utjecaja na okoliš | Procijenjena potrošnja razvrstava se između pojedinih materijala ili sirovina, te emisija primjereno uzroku djelovanja na okoliš. Utjecaji na okoliš kvantificiraju se provođenjem četiri računarske tehnike na inventaru podataka: klasifikacija utjecaja na okoliš u kategorije utjecaja na okoliš, karakterizacija, normalizacija i dodjeljivanje važnosti (težinskih faktora) kategorijama utjecaja na okoliš. |
| 4. Tumačenje rezultata (interpretacija) | Rezultati se procjenjuju dovođenjem u odnos potrošnje resursa u odnosu na poznate svjetske rezerve za svakog stanovnika. Ovaj dio analize rezultata naziva se normalizacija i oba rezultata se množe težinskim faktorima čime se omogućava vrednovanje rezultata. Rezultati se tumače obzirom na pretpostavke, ciljeve i opseg studije definirane u ranijim koracima procjene životnog ciklusa. |

Standardom ISO 14040 [1] propisuju se četiri metodološka koraka primjene metode procjene životnog ciklusa (Tablica 5-1). U prvom koraku definiraju se ciljevi i opseg studije, za što je nužno definirati tzv. funkcionalnu jedinicu (eng. *functional unit*). Funkcionalna jedinica je kvantificirani učinak razmatranog sustava ili proizvoda koji se koristi kao referentna jedinica pri analizi životnog ciklusa i procjeni utjecaja na okoliš [86]. Kako bi rezultati procjene životnog ciklusa bili usporedivi, potrebno je usporediti proizvode koji realiziraju istu funkciju. Definiranje jednakih funkcionalnih jedinica u prvom metodološkom koraku *LCA*, preduvjet je za ostvarivanje usporedivosti rezultata procjene životnih ciklusa proizvoda, odnosno alternativa koji se uspoređuju [229].

Pristup razmatranja životnog ciklusa proizvoda razlikuje se od tradicionalnog pristupa konceptualnoj fazi razvoja proizvoda jer u žarištu nisu isključivo faza eksploatacije proizvoda i zadovoljenje zahtjeva korisnika, već otkrivanje kritičnih parametara proizvoda i procesa u životnom ciklusu proizvoda koji rezultiraju neprimjerenim utjecajima na okoliš.

Izračunavanje utjecaja na okoliš i vrednovanje postupka u iterativnim koracima se ponavljaju dok nije postignuta zadovoljavajuća razina detaljnosti i pouzdanosti [333]. Proizvod koji je predmet analize obično je završio svoj životni vijek, a procjeni životnog ciklusa prethodi prikupljanje podataka o proizvodu, životnom ciklusu proizvoda, potrošnji energije i materijala, te emisijama i otpadu. Prikupljeni podaci unose se u tzv. inventar životnog ciklusa proizvoda (eng. *Life Cycle Inventory*). Inventar životnog ciklusa sastavlja se temeljem podataka o tehnološkim procesima koji se tiču proizvodnje i potrošnje sirovina, materijala i energije, te emisijama i otpadu pohranjenih u licenciranim bazama podataka, a radi standardizacije metode. Primjer takve baze je europska baza podataka *Ecoinvent*™ [89], [90] koja je korištena tijekom procjene životnog ciklusa koncepata pranja rublja.

Tijekom procesa konstruiranja naglasak je na definiranju značajki proizvoda koje imaju veliki utjecaj na funkcionalnost, izgled, kvalitetu i troškove poput značajki oblika, strukture i radnih principa proizvoda. Te značajke ne moraju biti ključne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš. Značajke proizvoda koje su ključne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš su masa [141] i volumen proizvoda [125], [206]. Iako ove značajke uobičajeno nisu dostupne u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda, u praksi se njihove veličine procjenjuju temeljem usporedbe s prošlim projektima, konkurentskim proizvodima i drugim tržišnim pokazateljima.

Poboljšavanje i rekonstrukcija proizvoda temeljem rezultata procjene životnog ciklusa nije jednostavan zadatak za konstruktore. Rezultati procjene su korisni za razmatranje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda te razmatranje izmjena procesa životnog ciklusa alternativnim procesima s ciljem smanjivanja potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu. Zatim, kako bi se usporedili utjecaji prije i nakon izmjena scenarija životnog ciklusa ili procesa, potrebno je unijeti izmjene u inventaru životnog ciklusa. Time se omogućava generiranje nove slike utjecaja na okoliš, a usporedbom rezultata varijanata alternativnih životnih ciklusa proizvoda moguće je dobiti uvid u posljedice pojedinih izmjena na magnitude utjecaja na okoliš proizvoda. Rezultate procjene životnog ciklusa proizvoda nije jednostavno vrednovati. Inkrementalne promjene u inventaru životnog ciklusa proizvoda mogu rezultirati značajnim promjenama ukupnih utjecaja na okoliš.

Zbog praktičnih razloga (brojnost podataka i kompleksnost metode), procjena životnog ciklusa izvodi se pomoću specijalističkih računalnih alata. Posebne digitalne baze podataka razvijene su za potrebe daljnje analize inventara životnog ciklusa. Inventari životnog ciklusa kompatibilni su s računalnom potporom u obliku alata za procjenu životnog ciklusa.

Računalom podržani alati (softveri) [334], kao što su *SimaPro*™ [88], koriste se pri modeliranju životnog ciklusa proizvoda ili procesa, te za kvantificiranje utjecaja na okoliš. Utjecaji na okoliš grupirani su prema kategorijama utjecaja na okoliš, normalizirani u ekvivalentne jedinice utjecaja na okoliš (eng. *Ecopoints, Pt*), te se zbrajaju preko težinskih faktora. Težinski faktori kvantifikacija su razina opasnosti utjecaja na okoliš i utjecaja na zdravlje ljudi. Definirani su posebnim metodama [335].

Metode procjene utjecaja na okoliš su mnogobrojne i razlikuju se u načinu karakterizacije (broj i vrsta kategorija utjecaja na okoliš), metodama normalizacije utjecaja na okoliš, metodama za određivanje težinskih faktora, te načinu prikaza. Utjecaji na okoliš mogu biti prikazani u obliku srednjih ili krajnjih utjecaja na okoliš. U literaturi se mogu pronaći brojni pregledi i analize postojećih metoda procjene utjecaja na okoliš ([206], [229], [336], [337], [338]). Neke od najraširenijih metoda procjene utjecaja na okoliš su *CML2001*™ [268], *EDIP 2003*™ [339], *Ecoindicator 99*™ [328], *IMPACT 2002+*™ [340], *TRACI 2.0*™ [341], *USEtox*™ [342] i *ReCiPe*™ [87].

Utjecaji proizvoda na okoliš klasificiraju se i prikazuju obzirom na kategorije utjecaja na okoliš:

- *Klimatske promjene*

U ovu kategoriju utjecaja na okoliš svrstavaju se kemijski spojevi koji lako apsorbiraju infracrveno zračenje. Ovi spojevi u atmosferi uzrokuju zadržavanje topline unutar Zemljine atmosfere, pridonose efektu zelenog staklenika, te posljedično tomu porastu prosječne temperature na Zemlji.

- *Smanjivanje ozonskog omotača*

Kemijski spojevi koji se ponašaju kao katalizatori procesa smanjivanja ozonskog omotača u stratosferi. Smanjivanje ozonskog omotača utječe na porast opasnosti od potencijalno štetnih ultravioletnih zraka koje dospiju do Zemljine površine.

- *Kiselost okoliša*

Određeni kemijski spojevi uzrokuju stvaranje kiselina ili pospješuju stvaranje takvih spojeva. Ova karakteristika kemijskih spojeva ocjenjuje se s obzirom na potencijal spoja k stvaranju slobodnih vodikovih iona i u usporedbi sa sumporovim dioksidom ($SO_2$). Povećani postotak takvih spojeva u okolišu uzrokuje porast kiselosti okoliša, pojavu kiselih kiša i time remećenje bioloških procesa.

- *Foto-oksidacija*

Foto-oksidansi su zagađivači koji nastaju uslijed djelovanja sunčevih zraka na ugljikovodike u okolišu. Radi se o organskim kemijskim spojevima koji su štetni u visokim koncentracijama u okolišu. Proces foto-oksidacije uzrokuje razgradnju polimera na mikro spojeve, čija prisutnost u atmosferi može dovesti do remećenja prirodnih i bioloških procesa u okolišu.

- *Deforestacija*

Smanjeni udio šumskog pokrova može uzrokovati manjak hranjivih tvari u tlu ili vodi, kao što su nitrati, fosfor, ugljik ili kisik. Udio ovih hranjivih tvari u kemijskom spoju

ukazuje na smanjivanje količine hranjivih tvari u okolišu i potencijalni utjecaj na deforestaciju okoliša.

- *Utjecaj toksičnih kemijskih spojeva na eko-sustav i zdravlje ljudi*

Na toksičnost utječu kemijski spojevi koji uzrokuju porast smrtnosti (ljudi, biljnih ili životinjskih vrsta) uslijed njihove izloženosti i prisutnosti u okolišu iznad određenog neškodljivog udjela toksičnih kemijskih spojeva.

## 5.3. Primjena *LCA* metode na primjeru koncepata iz studije slučaja

Zbog toga što je *LCA* metodom omogućena kvantifikacija utjecaja proizvoda na okoliš, čime se omogućava objektivnost pri odlučivanju [343], radi se o prikladnom i jedinoj pouzdanoj metodi koja omogućava vrednovanje i usporedbu ekološke prihvatljivosti proizvoda [9], [36], [262], [331].

### *5.3.1. Cilj i opseg procjene životnog ciklusa koncepata*

U prvom koraku procjene životnog ciklusa definiraju se cilj i opseg procjene proizvoda ili koncepcijskih rješenja proizvoda koji su predmet procjene utjecaja na okoliš, funkcionalna jedinica koja je temelj za usporedbu, faze životnog ciklusa koje su razmatrane u studiji, te razina detaljnosti proizvoda i životnog ciklusa proizvoda. Procjena životnog ciklusa provedena je s ciljem vrednovanja ekološke prihvatljivosti pet koncepcijskih rješenja:

1.) Koncept A – proces pranja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (60-95°C),

2.) Koncept B – proces pranja pjenom deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom (30°C),

3.) Koncept C – proces ultrazvučnog pranja tekućim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom,

4.) Koncept D – proces čišćenja suhim ledom (ugljikovim dioksidom),

5.) Koncept E – proces pranja polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (30°C).

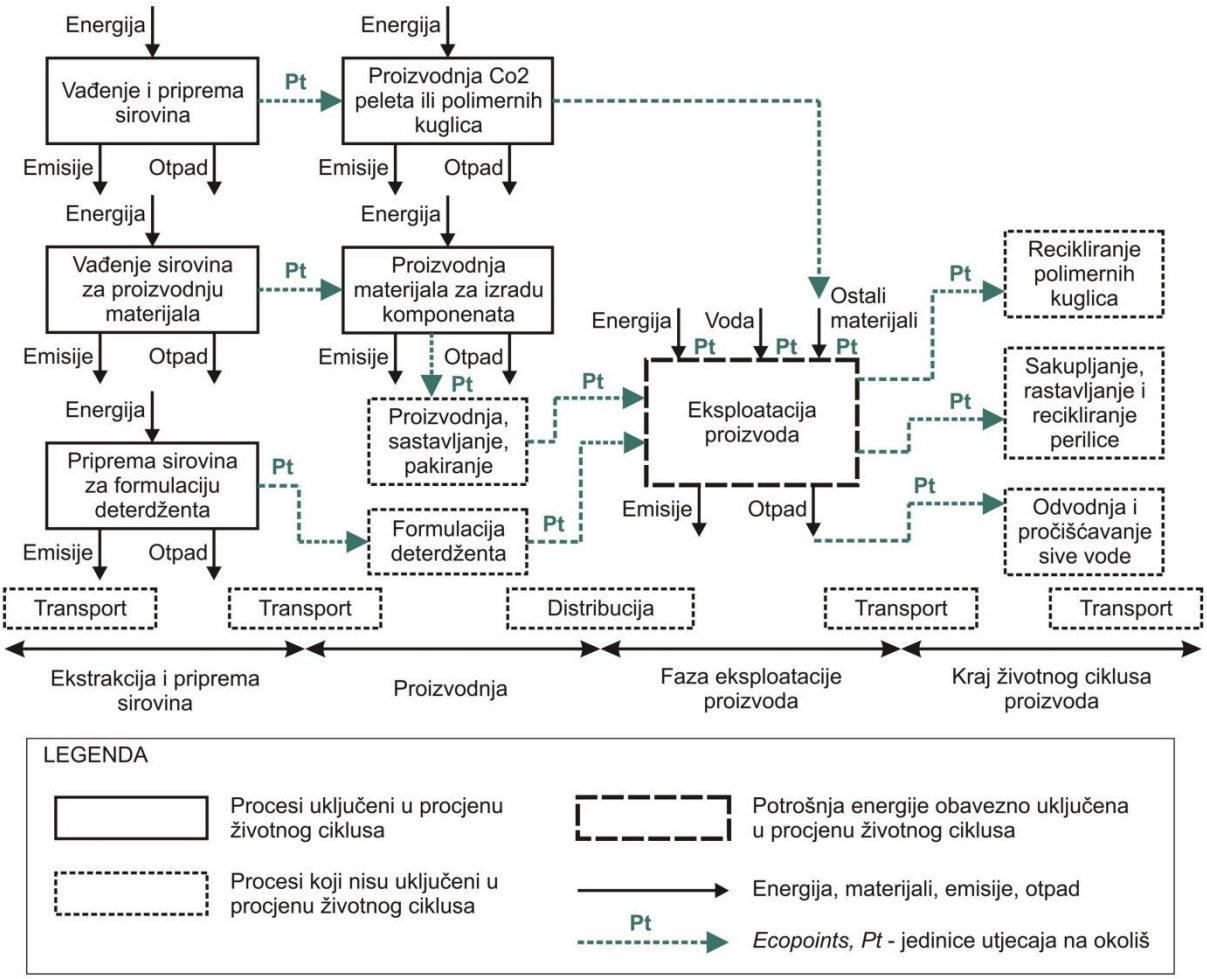
Korak u kojem se definira cilj i opseg procjene životnog ciklusa služi kao vodič za dosljedno provođenje *LCA* analize, a stoga jer se metoda temelji na subjektivnim izborima procjenitelja.

Ukupni životni vijek perilice rublja je u opadanju sa 7 do 12 godina na 5 do 10 godina [344]. Prosječni broj ciklusa pranja rublja po kućanstvu (u državama Europske Unije) iznosi 234 [345] ili 220 [346] ciklusa godišnje. Uzimajući u obzir preporuke Rüdenauer i drugih [279], prosječni životni vijek perilice rublja za strojno pranje rublja u kućanstvima je 10 godina, te 200 ciklusa pranja godišnje (2-3 puta tjedno po kućanstvu [347]). Stoga je ukupni broj ciklusa pranja rublja tijekom životnog vijeka svih pet analiziranih koncepcijskih rješenja procijenjen na 2000 ciklusa pranja. Funkcionalna jedinica iznosi 4,5 kilograma rublja uz dopušteno odstupanje u iznosu ±0,5 kilograma rublja po jednom ciklusu pranja.

Emisije prema okolišu uslijed aktivnosti neformalnog načina prikupljanja perilica i transporta imaju zanemariv udio na ukupne utjecaje na okoliš. Emisije do kojih može doći uslijed nestručnog gospodarenja i prikupljanja perilica ovise u potpunosti o udjelu opasnih i toksičnih materijala proizvoda [348]. U ovoj studiji životnog ciklusa koncepata proizvoda u kojoj je cilj vrednovanje ekološke prihvatljivosti i usporedba utjecaja na okoliš koncepcijskih rješenja, zanemarene su sljedeći procesi u životnom ciklusu: proizvodnja i potrošnja energije i materijala za ekstrakciju i vađenje sirovina za proizvodnju materijala od kojih su izrađene komponente proizvoda, potrošnja energije tijekom proizvodnje komponenata proizvoda, procesi prijevoza (transporta) sirovina, materijala, komponenata i distribucija proizvoda, proizvodnja i potrošnja materijala i energije za pakiranje proizvoda, proizvodnja i potrošnja materijala i energije tijekom procesa održavanja i popravaka proizvoda tijekom faze eksploatacije, te potrošnja energije i materijala tijekom faze kraja životnog vijeka proizvoda (potencijalno recikliranje, rekonstrukcija, ponovna proizvodnja ili oporaba proizvoda).

Temeljem analize utjecaja na okoliš i troškova uslijed neformalnog načina prikupljanja perilica rublja (za strojno pranje rublja u kućanstvima) nakon završetka njihovog životnog vijeka, Pertl i drugi [348] zaključili su da se recikliranjem komponenata proizvoda nakon

završetka faze eksploatacije mogu postići brojne pogodnosti u pogledu smanjivanja utjecaja na okoliš proizvoda. Cilj je identificirati komponente proizvoda sa visokim stupnjem reciklabilnosti i komponente proizvoda koji su najbolji kandidati za rekonstrukciju, a temeljem liste materijala proizvoda. Slika 5-2 prikazuje granice sustava i procese koji su uključeni u analizu i procjenu životnih ciklusa koncepcijskih rješenja pranja rublja. Utjecaji na okoliš koji su uzrokovani uslijed procesa u fazama životnog ciklusa proizvoda koje nastupaju nakon faze eksploatacije proizvoda nisu uzeti u obzir u ovoj *LCA* studiji zbog zanemarivog udjela tih utjecaja u ukupnim utjecajima na okoliš proizvoda kroz čitav životni vijek proizvoda.




Slika 5-2. Prikaz procesa i faza životnog ciklusa koji su uključeni u studiju životnog ciklusa koncepcijskih rješenja A, B, C, D i E (ilustracija prema [349])

### 5.3.2. LCA koncepta pranja rublja A

U nastavku je analiziran problem odstranjivanja nečistoća sa tekstila na primjeru automatske perilice rublja za strojno pranje rublja u kućanstvima. Koncept pranja rublja A je koncept pranja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (60/90°C).

Na efikasnost procesa pranja utječu: vrsta, masa i sastav tekstila, vrsta i količina nečistoća, kvaliteta vode (teški metali u vodi, tvrdoća vode, ...), parametri procesa pranja (vrsta mehaničkog djelovanja na tekstil, temperatura pranja i vrijeme pranja) i sastav deterdženta [345].

Razmatrani koncepti pranja rublja razlikuju se u vrsti fizikalnih efekata i radnim principima kojima se ostvaruje pranje, odnosno čišćenje tekstila. Nečistoće i prljavština vežu se na tekstilnu odjeću putem sljedećih mehanizama [283]:

- Čestice u šupljinama između tekstilnih vlakana, pređe i konca
- Čestice između šavova i u pukotinama tekstila
- Uslijed van der Waalsovih i Coulombovih sila
- Stvaranjem kemijskih veza na površini vlakna (primjerice posredstvom kalcija iz vode).

Većina nečistoća odstranjuje se s vlakana fizičkim putem uslijed među-površinskog djelovanja deterdženta. U tom procesu, važnu ulogu imaju fizikalne sile koje djeluju na vlakna, adsorpcija površinski aktivnih tvari (u sastavu deterdženta) uslijed čega dolazi do pucanja slabijih veza između nečistoća i vlakana i stabilizatora u sastavu deterdženta. Otklanjanje nečistoća može se ostvariti i kemijskim djelovanjem na vlakna, bjelilima i enzimima u sastavu deterdženta. U sastavu praškastih deterdženata za strojno pranje rublja u kućanstvima na europskom tržištu nalaze se:

- Površinski aktivne tvari (npr. linearni alkil benzen sulfonat – *LAS*, sapun [350])
- Omekšivači vode i punila (npr. zeolit [350], praškasti natrij-silikat, silikat u slojevima, natrij-trifosfat (*STPP*) [351])

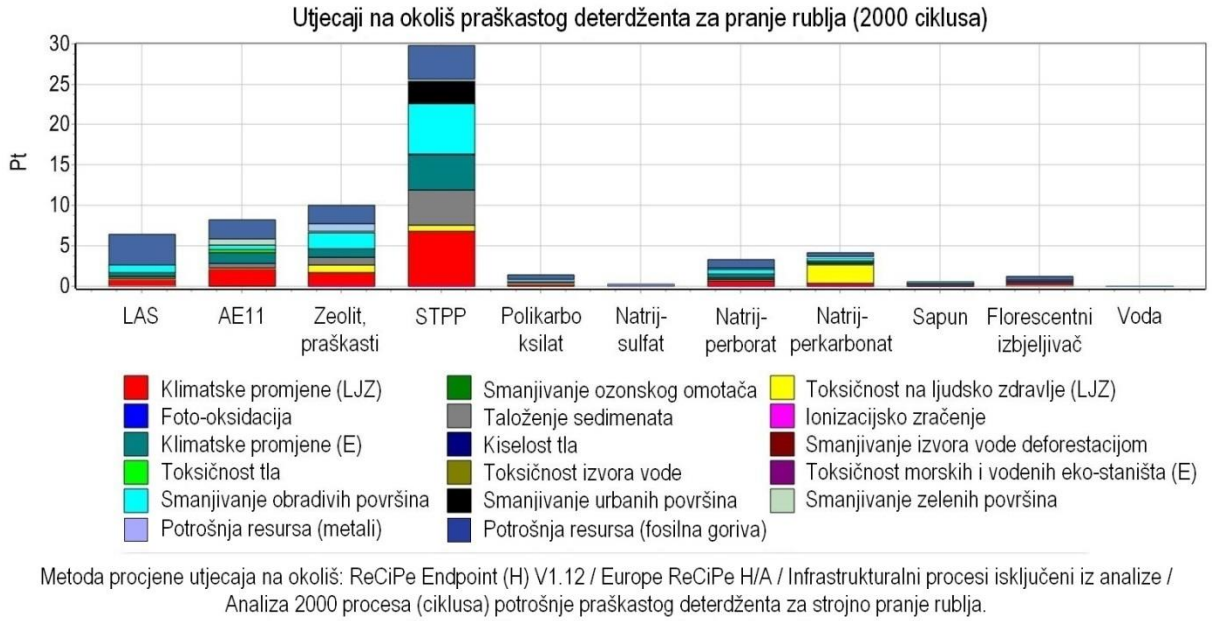
- Izbjeljivači (npr. natrij-hipoklorit, monohidrat i tetrahidrat natrij-perborat, natrij-perkarbonat, hidrogen peroksid [351])
- Dodaci deterdžentu (npr. poliakrilat, natrij-sulfat, polietilen glikol, silikon [350]).

Tablica 5-2 prikazuje sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja kod koncepata A, B i E. EN60456:2010 standardom propisana je norma za doziranje deterdženta koja iznosi 40 grama, te još 12 grama po svakom kilogramu tekstila [352].

Tablica 5-2. Sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja

| Sastojci u sastavu deterdženta [353] | Maseni udio sastojaka prema [353] | Maseni udio sastojaka (*LCA* studija) |
|---|---|---|
| Linearni alkil benzen sulfonat (*LAS*) | 10-25% | 15% |
| Etoksilirani alkohol (*AE11*) | | 10% |
| Zeolit, praškasti | 30-55% | 10% |
| Natrij-trifosfat (*STPP*) | | 30% |
| Polikarboksilat, 40% površinski aktivne tvari | 3-8% | 5% |
| Natrij-sulfat | 0-30% | 14% |
| Natrij-perborat, monohidrat, praškasti | 8-15% | 5% |
| Natrij-perkarbonat, praškasti | | 5% |
| Sapun | 0.1-4% | 0.5% |
| Florescentni izbjeljivač (*DAS1*) | 0.2-2% | 0.5% |
| Voda | 5-15% | 5% |

Slika 5-3 prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš uzrokovani životnim ciklusom praškastog deterdženta za strojno pranje rublja. Najveći utjecaji na okoliš praškastog deterdženta za strojno pranje rublja nastaju uslijed natrij-trifosfata u sastavu deterdženta.




Slika 5-3. Utjecaji na okoliš deterdženta za strojno pranje rublja

Najveći udio potrošnje energije u životnom ciklusu perilice za strojno pranje rublja je u fazi eksploatacije (~80%). Udio potrošnje energije u fazi ekstrakcije i nabave sirovina (kemijskih tvari u sastavu deterdženta) te u fazi proizvodnje praškastog deterdženta značajno je manji od potrošnje energije u fazi eksploatacije perilice rublja i iznosi oko 16% ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja. Potrošnja energije za formulaciju deterdženta je oko 1,4% ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja. Proces potrošnja energije za odvodnju sive vode i potrošnja energije za pakiranje proizvoda iznose oko 1,5% ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja, te samo mali dio ukupne potrošnje energije (~0,4%) u životnom ciklusu deterdženta za strojno pranje rublja [350].

Stamminger i drugi [354] navode da za 1 ciklus pranja 4 kilograma rublja u automatskoj perilici rublja proizvedenoj 2004. godine, potrošnja vode iznosi 49 litara, a potrošnja deterdženta 118 grama. Ovi podaci odgovaraju istovjetni su podacima o potrošnji električne energije i vode kod [348] (Tablica 5-3).

Tablica 5-3. Potrošnja električne energije i vode koncepta A [348]

| | Potrošnja električne energije (kWh/ciklus) | Potrošnja vode (m³/ciklus) |
|---|---|---|
| Perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2000.) | 1,5 | 0,1 |
| Perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2010.) | 0,85 | 0,04 |
| Troškovi | 0,17 EUR/kWh | 3,5 EUR/m³ |

Tablica 5-4. Potrošnja električne energije i vode za 1 ciklus strojnog pranja 5 kilograma rublja u perilici rublja [279]

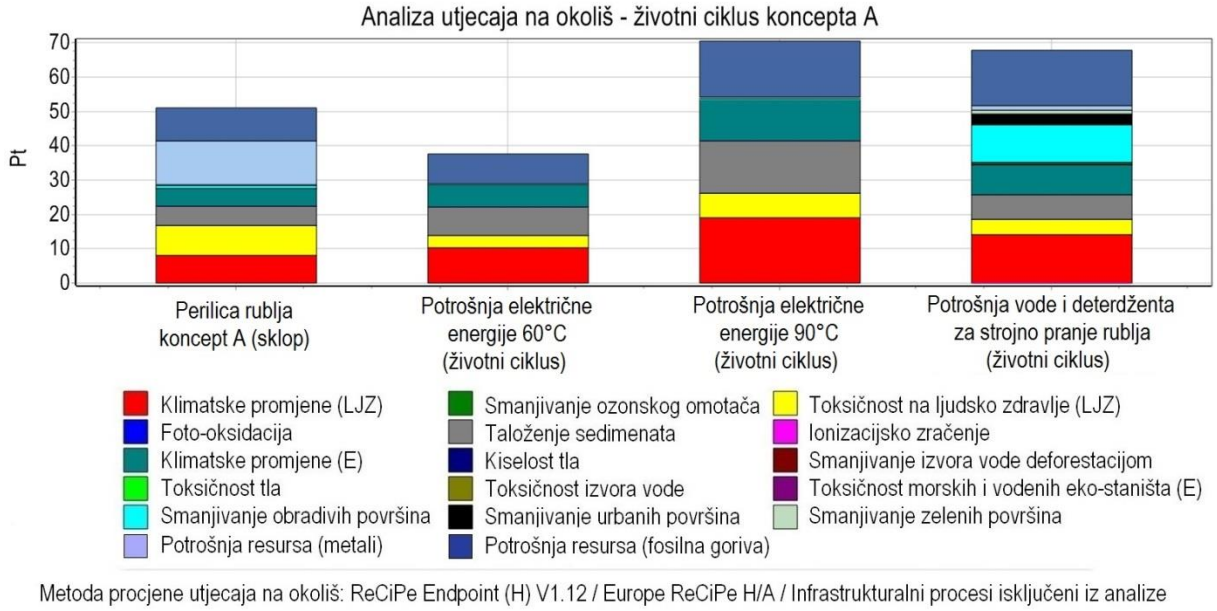
| | Potrošnja električne energije (kWh/ciklus pranja) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura pranja | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 60 °C | 95 °C |
| Potrošnja električne energije za zagrijavanje vode za pranje | 0,06 | 0,1 | 0,28 | 0,64 | 1,15 |
| Potrošnja električne energije uslijed mehaničkog djelovanja na rublje | 0,19 | | | | |
| Ukupna minimalna potrošnja električne energije | 0,25 | 0,29 | 0,47 | 0,83 | 1,34 |
| Potrošnja električne energije perilice rublja A klase (godina proizvodnje 2004.) | nema podataka | 0,32 | 0,52 | 0,95 | 1,54 |
| Potrošnja električne energije, perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2004.) | nema podataka | 0,33 | 0,54 | 0,98 | 1,59 |
| | Potrošnja vode (m³/ciklus pranja) | | | | |
| Potrošnja zagrijane vode, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.) | 0,011 | | | | |
| Potrošnja vode po ciklusu ispiranja, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.) | 0,008 | | | | |
| Ukupna potrošnja vode, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.) | 0,035 | | | | |

Potrošnja vode za proces pranja rublja koncepta A iznosi 35 litara po ciklusu. U prvom dijelu ciklusa pranja, 11 litara vode se zagrijava, a potom je potrebno još 3 ispiranja rublja (8 litara po svakom ispiranju) [279]. Iz rada Rüdenauer i drugih [279] preuzeta je potrošnja energije po ciklusu za pranje na temperaturama 30 °C, 60 °C i 95 °C (Tablica 5-4). Tijekom

procjene pretpostavljena je potrošnja deterdženta za pranje rublja u kućanstvima po ciklusu od 4 do 5 kilograma rublja u iznosu 110 grama.

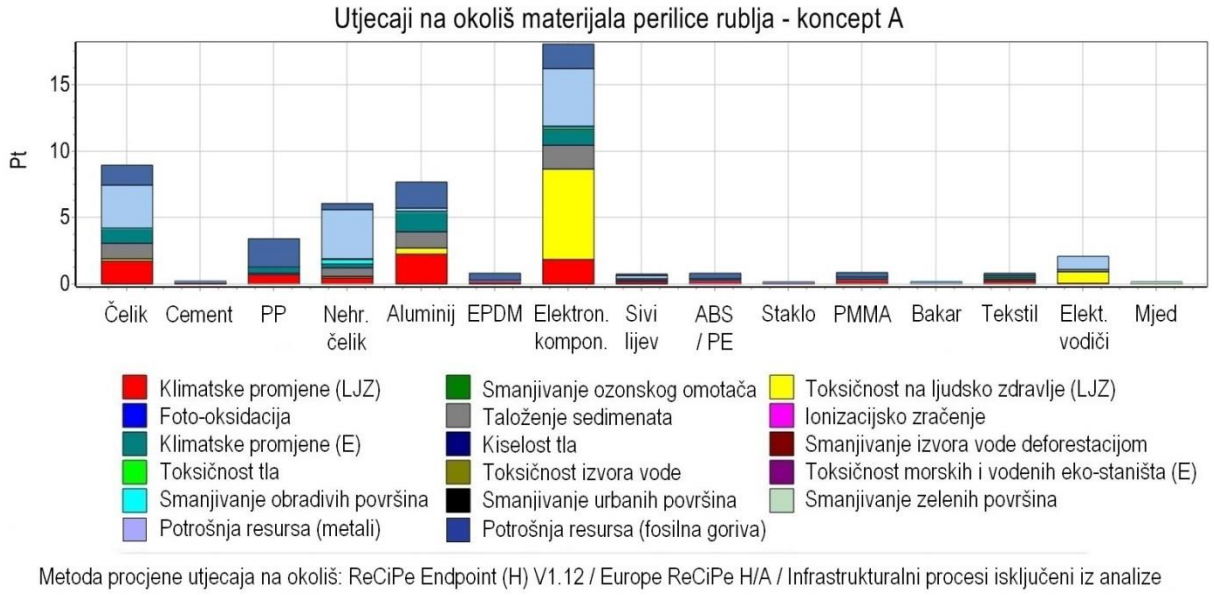
Otprilike 20% potrošnje električne energije u programu pranja rublja na 60 °C je potrošnja električne energije uslijed mehaničkog djelovanja na rublje i pumpanja, a iznosi 0,19 kWh [279]. Takahashi i drugi [149] nalaze da je potrošnja električne energije kod modela perilice iz 2004. godine 66% manja u usporedbi sa modelom iz 1991. godine. Rüdenauer i drugi [279] smatraju da se potrošnja električne energije uslijed mehaničkog djelovanja na rublje i pumpanja vode tijekom procesa pranja u perilici rublja A energetske klase neće mijenjati ili poboljšavati u budućnosti.

Na Slici 5-4 prikazani su utjecaji na okoliš uslijed životnog ciklusa koncepta pranja rublja A (Slika 5-4). Kod potrošnje električne energije pretpostavljeno je da se 50% ciklusa pranja odvija programu pranja na 60°C, a preostalih 50% ciklusa pranja na programu s temperaturom pranja 95°C. U procjenu je uključena i faza dobave sirovina i proizvodnje materijala za izradu perilice rublja.




Slika 5-4. Analiza utjecaja na okoliš, kategorije srednjih utjecaja, životni ciklus koncepta pranja rublja A

Najveći utjecaji na okoliš perilice koncepta pranja rublja A uzrokovani su potrošnjom električne energije, zatim potrošnjom praškastog deterdženta za strojno pranje rublja, te tek potom materijalima od kojih je perilica proizvedena.




Slika 5-5. Utjecaji na okoliš materijala perilice rublja koncepta pranja rublja A

U slučaju koncepta perilice rublja A korišteni su podaci o listi materijala perilice iz rada Rüdenauer i drugih [279]. Radi se o perilici rublja proizvedenoj 2004. godine i ukupne mase 76 kilograma. Najveći utjecaji na okoliš uslijed materijala za izradu perilice koncepta A nastaju uslijed materijala potrebnih za izradu elektroničkih komponenata, čelika i aluminija (Slika 5-5). Tablica 5-5 prikazuje materijale perilice koncepta A.

Tablica 5-5. Lista materijala automatske perilice rublja za kućanstva: a) Machine II.2, godina proizvodnje: 2004. [279]; b) Novomatic, godina proizvodnje: 2005. [355]; c) Adora, godina proizvodnje: 2011. [355]; d) Eco Bubble™ [345]

| Br. | Materijal | Masa (kg) MACHINE II.2 [279] | Masa (kg) NOVOMATIC 2005 [355] | Masa (kg) ADORA 2011 [355] | Masa (kg) Eco Bubble™ [345] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Čelik | 20,6 | 25,54 | 25,11 (-1,68%) | 20,25 |
| 2 | Beton | 18,68 | 18,51 | - | 0 |
| 3 | Polipropilen (PP) | 12,67 | 16,34 | 16,83 (+3%) | 13,05 |
| 4 | Nehrđajući čelik | 5,87 | 5,84 | 5,69 | 5,7 |
| 5 | Aluminij | 4,13 | 1,28 | 1,33 (+4%) | 6,28 |
| 6 | Etilen-propilen (EPDM) ili etilen-vinil-acetat kopolimer | 2,95 | 1,790 | 1,94 (+8,38%) | 3,2 |
| 7 | Elektroničke komponente | 2,89 | 0,11 | 0,047 (+427%) | 5,19 |
| 8 | Sivi lijev | 1,92 | - | 9,28 (+483%) | 9,27 |
| 9 | Akril-butadien-stirol (ABS) / polietilen (PE) | 1,87 | 0,4 | 0,56 (+40%) | 2,62 |
| 10 | Staklo | 1,69 | 1,84 | 2,39 (+29,89%) | 2,19 |
| 11 | Poli-metil-metakrilat (PMMA) | 1,15 | - | - | 1,15 |
| 12 | Bakar | 0,75 | 1,25 | 1,68 (+34,4%) | 1 |
| 13 | Tekstil (pamuk) - kompozit | 0,38 | 0,34 | 0,53 (+55,88%) | 0,59 |
| 15 | Elektronički vodiči | 0,31 | - | - | 0,31 |
| 16 | Mjed | 0,02 | - | - | 0,02 |
| 18 | Aluminijska legura (Al+Zn+Cu) | - | - | 1,99 | - |
| 19 | MDF (medijapan) | - | 2,16 | 2,31 | - |
| 20 | LCD staklo | - | - | 0,02 | 0,02 |
| Ukupno | | 75,88 | 75,4 | 70,13 | 65,14 |
| Ostali materijali (nisu uključeni u procjenu) | | 1,188 | - | - | - |

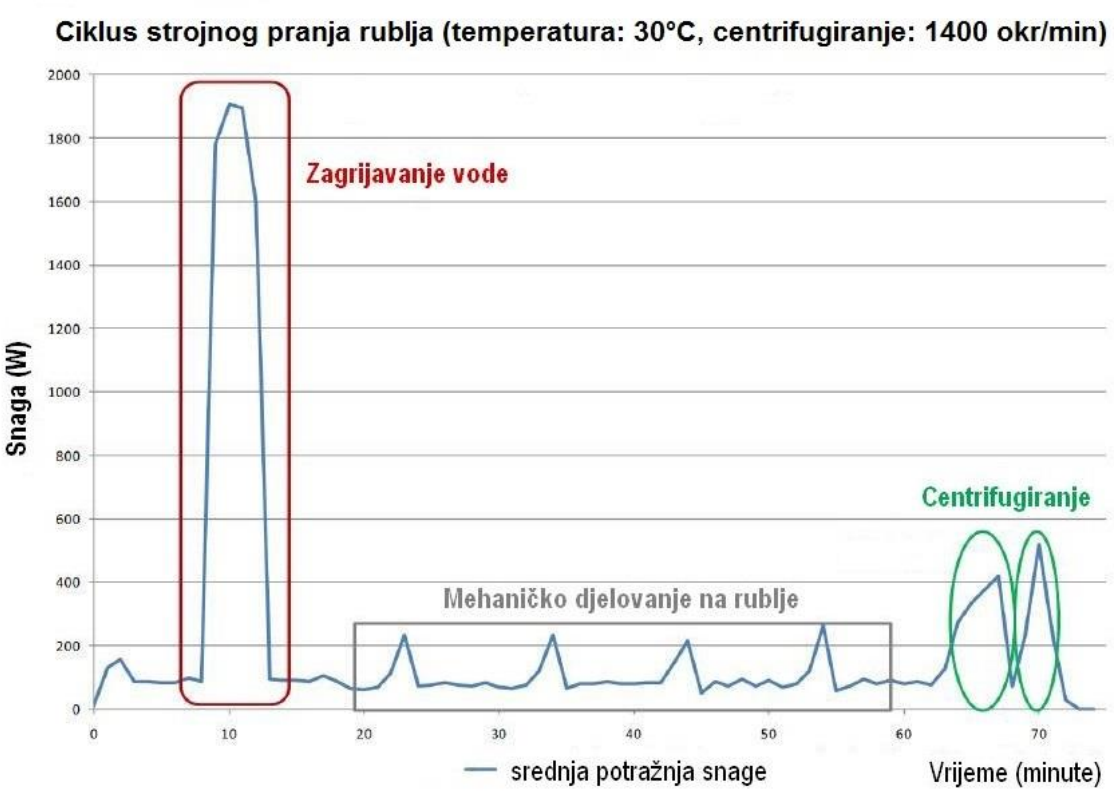
### 5.3.3. LCA koncepta pranja rublja B

Koncept pranja rublja B je koncept pranja pjenom deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom (30°C). Koncept je implementiran u Samsung perilici za strojno pranje rublja u kućanstvima koja je komercijalno dostupna na europskom tržištu.

Eco Bubble™ tehnologija podrazumijeva miješanje praškastog deterdženta sa vodom prije početka ciklusa pranja, prilikom čega se posredstvom zraka stvaraju mjehurići i pjena praškastog deterdženta i vode [284]. Pjena brže prodire u prostor između tekstilnih vlakana od praškastog deterdženta čime se ostvaruje jednaka učinkovitost pranja na nižim temperaturama, te štedi električna energija [284].

Potrošnja električne energije uslijed zagrijavanja vode na 30°C je 0,33 kWh za 1 ciklus pranja (Tablica 5-4). Isto tako, potrošnja električne energije jednaka je 0,3 kWh prema radu Gallego-Juárez i drugih [285] gdje je učinkovitost po pitanju potrošnje energije koncepta C usporediva sa ciklusom pranja deterdžentom i toplom vodom (30°C), odnosno potrošnjom energije koncepta B. Slika 5-6 prikazuje potrošnju električne energije standardnog ciklusa strojnog pranja rublja toplom vodom (30°C).

Potrošnja vode (u najboljem slučaju perilice proizvedene 2010. godine) [279] procijenjena je na 35 litara u slučaju koncepta A pranje deterdžentom i toplom vodom (60°C). Testiranje potrošnje energije i vode jednog većeg modela (Samsung Eco Bubble™ perilica rublja WF80F5E5U4W kapaciteta 8 kilograma) pokazuje dobar omjer potrošnje električne energije (0,19 kWh) i vode (45 litara) pri korištenju programa hladnog pranja (15°C) uz djelomično napunjenu perilicu (oko 3 kilograma rublja u perilici kapaciteta 8 kilograma). Nema dodatnih podataka o doziranju deterdženta, te je stoga pretpostavljena jednaka potrošnja deterdženta po ciklusu pranja kao kod koncepta A (110 grama po ciklusu pranja).




Slika 5-6. Dijagram potraživanja snage električne energije za 1 ciklus pranja deterdžentom i toplom vodom (30°C) [356]

Lista materijala perilice rublja koncepta B procijenjena je temeljem podataka o listi materijala perilice rublja Novomatic proizvedene 2005. godine i perilice rublja Adora proizvedene 2011. godine. Perilica rublja iz rada Rüdenauer i drugih [279] konstrukcijom je slična perilici rublja Novomatic [355], te je stoga lista materijala perilice rublja koncepta B sastavljena temeljem liste materijala perilice spomenute u radu Rüdenauer i drugih [279], te temeljem lista materijala perilice Novomatic iz 2005. godine i perilice Adora novijeg datuma proizvodnje [355]. Perilica rublja koncepta B prema podacima proizvođača ima masu 56 kilograma [345].

Ukupna masa Samsung Eco Bubble™ perilice rublja je 56 kilograma (Tablica 5-6). Za potrebe *LCA* koncepta pranja rublja B, masa perilice koncepta B je procijenjena na oko 66 kilograma, što je u granicama dozvoljene nesigurnosti procjene životnog ciklusa koncepata.

Tablica 5-6. Značajke i performanse perilice rublja s Eco Bubble™ tehnologijom kapaciteta 6 kg (model WFF400E, Samsung) [345]

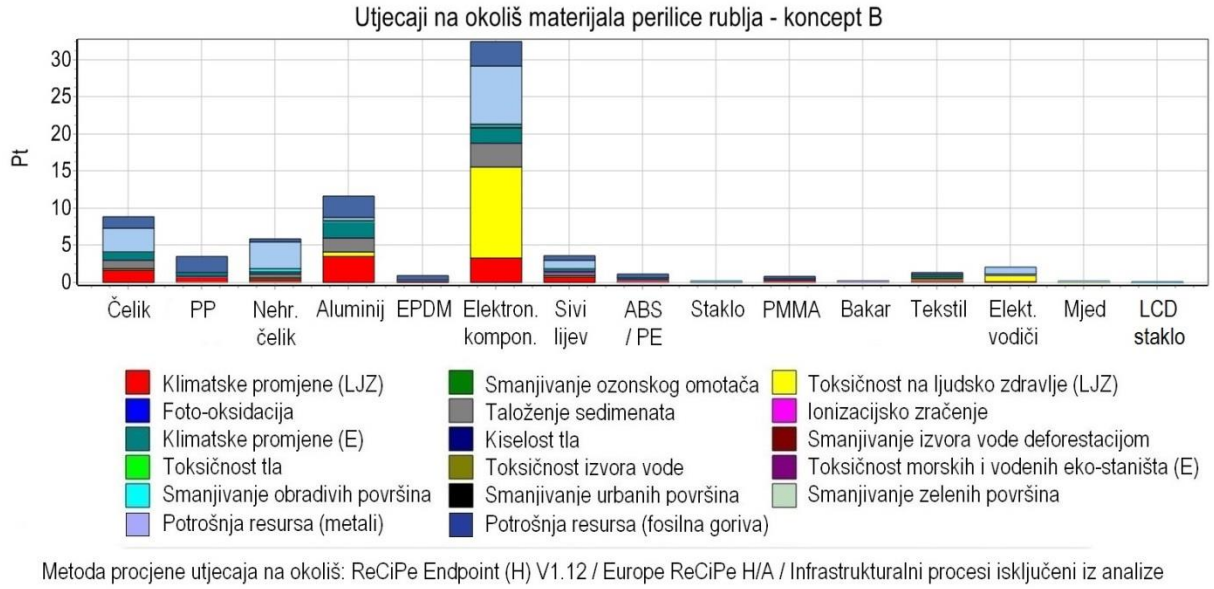
| Značajke, tehničke specifikacije i pokazatelji radnog učinka | |
|---|---|
| Kapacitet pranja | 6 kg |
| Maksimalna brzina centrifugiranja | 1200 okr./min |
| Standardno trajanje ciklusa | 135 min |
| Godišnja potrošnja energije (220 ciklusa) Wh/god. | 170 kWh |
| Godišnja potrošnja vode (220 ciklusa) l/god. | 8580 L ~ 39 L po ciklusu |
| Razina buke, pranje (dB) | 61 dB |
| Razina buke, centrifugiranje (dB) | 76 dB |
| Izbor temperature | Hladno (15°C), 20°C, 30°C, 40°C, 60°C, 95°C |
| Izbor brzine centrifugiranja | 0, 400, 800, 1.000, 1.200 |
| Masa perilice rublja | 56 kg |

Tablica 5-5 prikazuje listu materijala Eco Bubble™ perilice po uzoru na razlike u konstrukciji perilice Adora i Novomatic [355]. Masa i lista materijala perilice koncepta B procijenjena na temelju podataka o konstrukciji i materijalima perilice proizvedene 2004. godine koja je poslužila i za procjenu perilice koncepta pranja rublja A (iz rada Rüdenauer i drugih [279]).

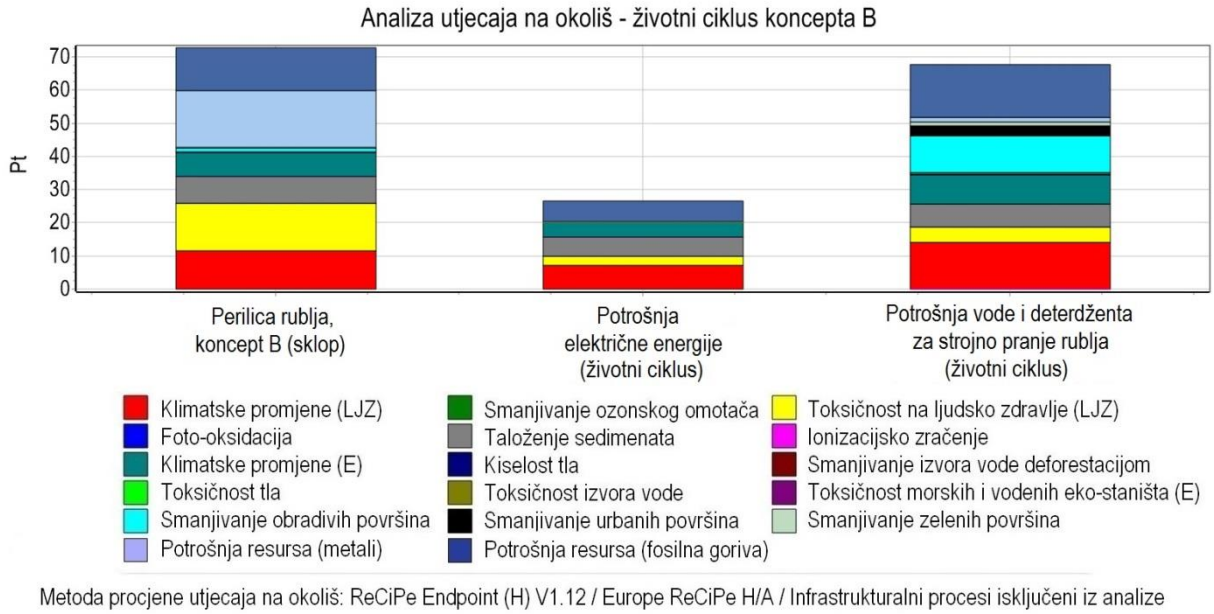
Masa betona u starijoj Novomatic perilici iz 2005. godine je oko 18,5 kilograma, dok je kod novije perilice rublja Adora (godina proizvodnje je 2011.) cement zamijenjen sivim lijevom (ukupno 9,28 kilograma) [355]. Masa čelika i aluminija, te polimera (polipropilen, polietilen) je gotovo identična u slučaju Adora i Novomatic perilica. Masa stakla, bronce, MDF-a i EPDM-a su nešto više kod novije Adora perilice.

Masa integriranih elektroničkih sklopova i elektroničkih komponenata je do 4 puta veća nego u starijem modelu perilice, što se može objasniti većim brojem funkcija novije perilice [355]. U listi materijala napravljena je korekcija u količini materijala integriranih elektroničkih sklopova. Integrirani elektronički sklopovi najviše doprinose utjecajima na okoliš (Slika 5-7), te je stoga napravljena iznimka za potrebe usporedbe s konceptom A. Radi lakše procjene

utjecaja na okoliš, masa integriranih elektroničkih sklopova jednaka je kao u slučaju perilice koncepta A.



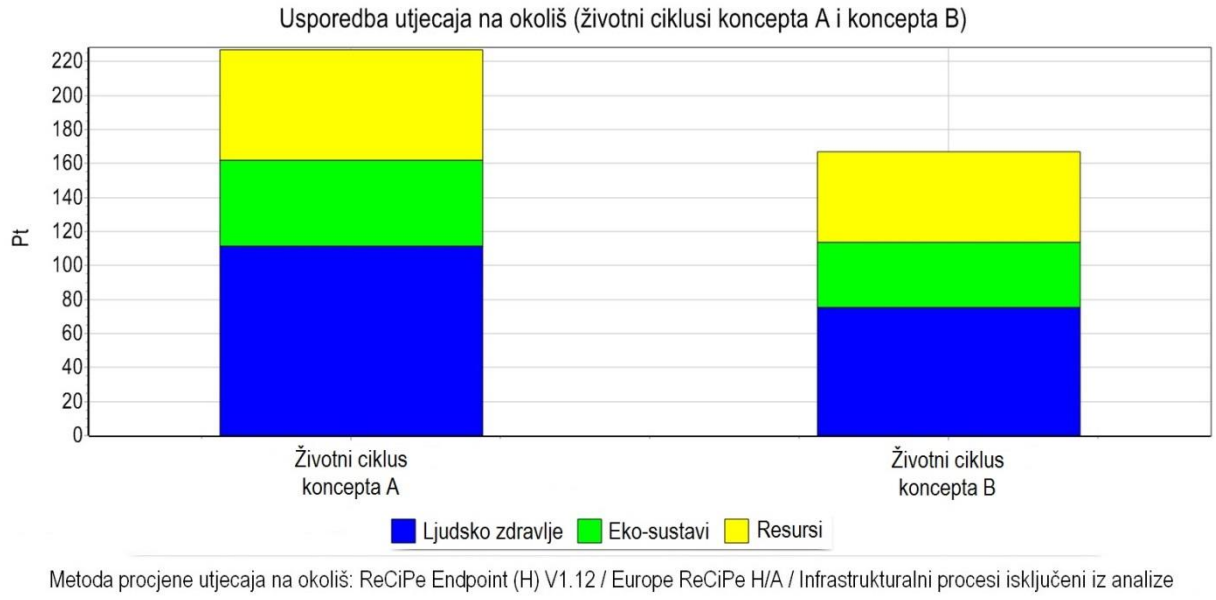

Slika 5-7. Kategorije srednjih utjecaja na okoliš materijala perilice rublja (koncept B)




Slika 5-8. Analiza utjecaja na okoliš koncepta B (životni ciklus, kategorije srednjih utjecaja)

Slika 5-8 prikazuje utjecaje na okoliš koncepta pranja rublja B kategorizirane prema srednjim utjecajima na okoliš. Utjecaji na okoliš koncepta pranja rublja B su manji od utjecaja

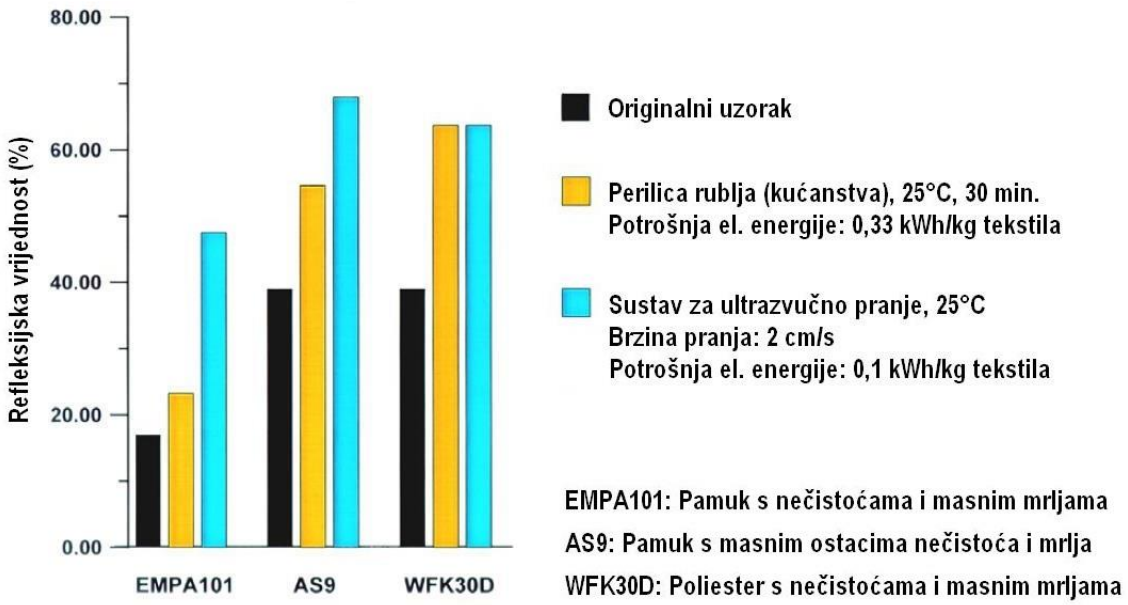
na okoliš koncepta pranja rublja A zbog manjih utjecaja uslijed potrošnje energije u životnom ciklusu proizvoda i potrošnje deterdženta za strojno pranje rublja (Slika 5-9).




Slika 5-9. Usporedba utjecaja na okoliš životnih ciklusa koncepta A i B

### *5.3.4. LCA koncepta pranja rublja C*

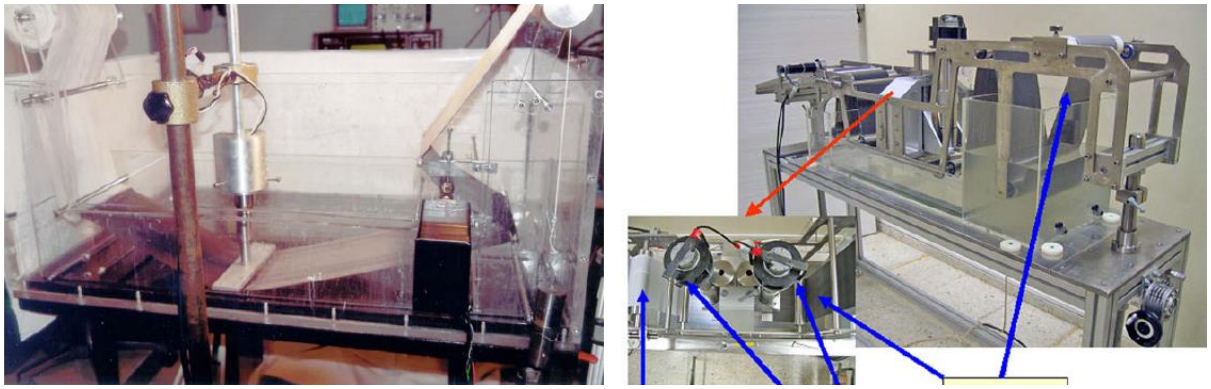
Koncept pranja rublja C je proces ultrazvučnog pranja tekućim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom. Podaci za procjenu životnog ciklusa dostupni su u radu Gallego-Juárez i drugih [323]. U studiji su opisani parametri i ishodi testiranja prototipa i procesa ultrazvučnog pranja za primjenu u tekstilnoj industriji. U nedostatku preciznijeg podatka o potrošnji vode potrebne za ultrazvučno pranje 4 do 5 kilograma rublja, iz rada Vouters i drugih [357] preuzet je podatak da je za odmašćivanje 1 kilograma tekstila potrebno između 5 i 10 litara vode.




Slika 5-10. Usporedba refleksijskih vrijednosti pranja deterdžentom i toplom vodom (25°C) i ultrazvučnog pranja [323]

Procjena potrošnje energije u eksploataciji temeljena je na podatku Gallego-Juárez i drugih [323] o prosječnoj potrošnji električne energije po kilogramu tekstila koja iznosi 0,1 kWh (Slika 5-10). Ukupno vrijeme ultrazvučnog pranja 4,5 kilograma tekstila izračunato je temeljem podatka o brzini ultrazvučnog pranja koje je jednako brzini vođenja tekstilne tkanine (prema [323]), te izračunatoj ukupnoj površini tkanine mase 4,5 kilograma. Prema podacima o testiranju prototipa Gallego-Juárez i drugih [323], brzina pranja ultrazvukom iznosi 0,02 m/s. Ukupno vrijeme pranja ultrazvukom 4,5 kilograma tekstila prototipnim primjerom procesa opisanom u radu Gallego-Juárez i drugih [323] iznosi oko 30 minuta. Temeljem tog podatka potrošnja električne energije za ultrazvučno pranje 4,5 kilograma tekstila iznosi otprilike 0,05 kW.

Za koncept pranja rublja C osmišljeno je rješenje kod kojeg su dva pretvarača ultrazvuka montirana paralelno jedan uz drugi (Slika 5-11). Time je za razliku od prototipnog rješenja Gallego-Juárez i drugih [323] omogućeno ultrazvučno odstranjivanje nečistoća po cijeloj površini rublja (obzirom na to da je prosječna širina odjeće otprilike dva puta veća nego širina oprane tkanine u procesu Gallego-Juárez i drugih [323]).



Slika 5-11. Koncept C - prototip ultrazvučne perilice rublja [323]

Zbog dva pretvarača ultrazvuka na jednom uređaju, potrošnja električne energije je dvostruka nego u slučaju samo jednog pretvarača ultrazvuka. Procijenjena potrošnja električne energije povoljnija je u slučaju koncepta pranja rublja C, nego u slučaju koncepata pranja rublja B, odnosno koncepata pranja rublja A i E.

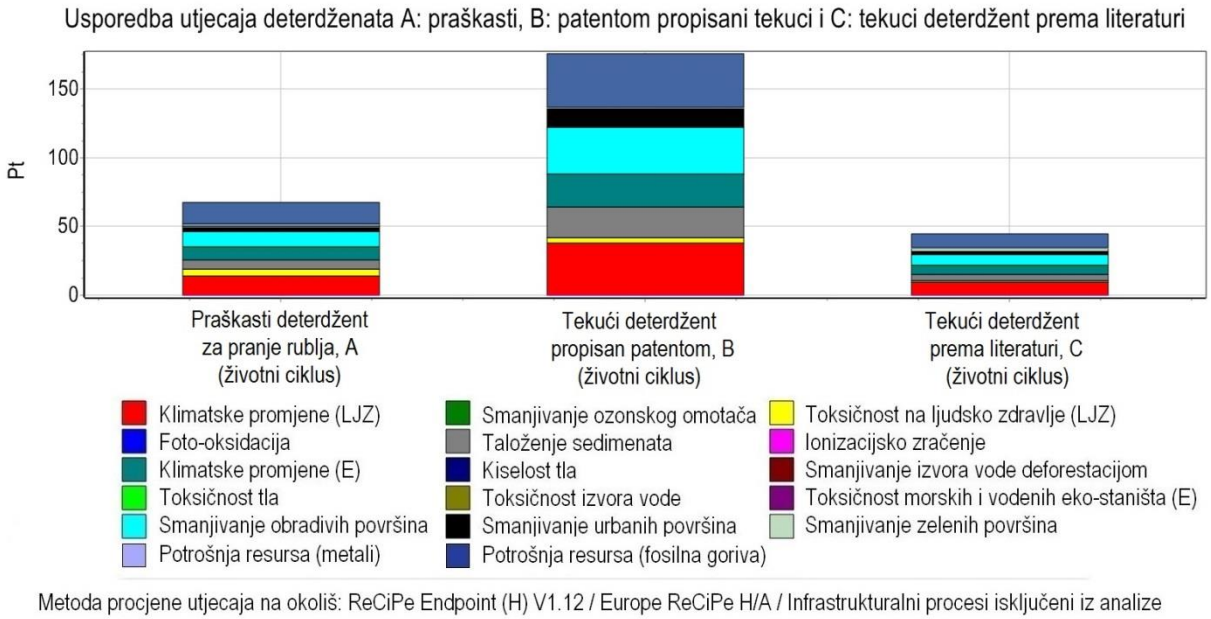
Gallego-Juárez i drugi u radu [323] opisani su rezultati procesa ultrazvučnog pranja i provjera efektivnosti pranja, a dostupni su i osnovni podaci o prototipu temeljem kojih su doneseni zaključci o ključnim dijelovima prototipnog rješenja i materijalima komponenata.

Tzv. nestrukturirani tekući deterdženti za strojno pranje rublja su češći na tržištu [352], no sastav tzv. strukturiranih tekućih deterdženata prikladniji je za usporedbu ekološke prihvatljivosti praškastih i tekućih deterdženata u *LCA* studiji jer se njihov sastav može preciznije odrediti. Iako se pranjem toplom vodom i deterdžentom potroši više vode (35 litara/ciklusu) nego pranjem ultrazvukom i tekućim deterdžentom i vodom (10,6 litara/kilogram tekstila), udio kemijskih tvari *STTP* i *LAS* je veći u tekućini za pranje tekstila ultrazvukom iz rada Gallego-Juárez i drugih [323]. Utjecaji na okoliš sredstva za pranje u slučaju koncepta C veći su nego kod koncepata A i B. Uzroci tomu su veće koncentracije omekšivača vode (*STTP*) i punila (*LAS*) u sastavu tekućine za pranje.

Kako bi se postigla usporedivost koncepta pranja rublja C s ostalim konceptima pranja rublja u *LCA* studiji, pristupilo se definiciji koncepta C_NEW kod kojeg je umjesto tekućine za pranje definirane u radu Gallego-Juárez i drugih [323] definiran sastav komercijalno dostupnog tekućeg deterdženta prema [355] (Tablica 5-7).

Tablica 5-7. Sastav tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja

| Sastojci u sastavu deterdženta [352] | Maseni udio sastojaka prema [352] | Maseni udio sastojaka (*LCA* studija) |
|---|---|---|
| Linearni alkil benzen sulfonat (*LAS*) | 10-25% | 15% |
| Etoksilirani alkohol (*AE11*) | 6-10% | 9% |
| Zeolit, praškasti | 15-30% | 5% |
| Natrij-trifosfat (*STPP*) | | 20% |
| Alkohol-sulfat | 0-5% | 0.9% |
| Sapun | 4-6% | 5% |
| Florescentni izbjeljivač (*DAS1*) | 0.05-0.25% | 0.1% |
| Voda | 30-50% | 45% |



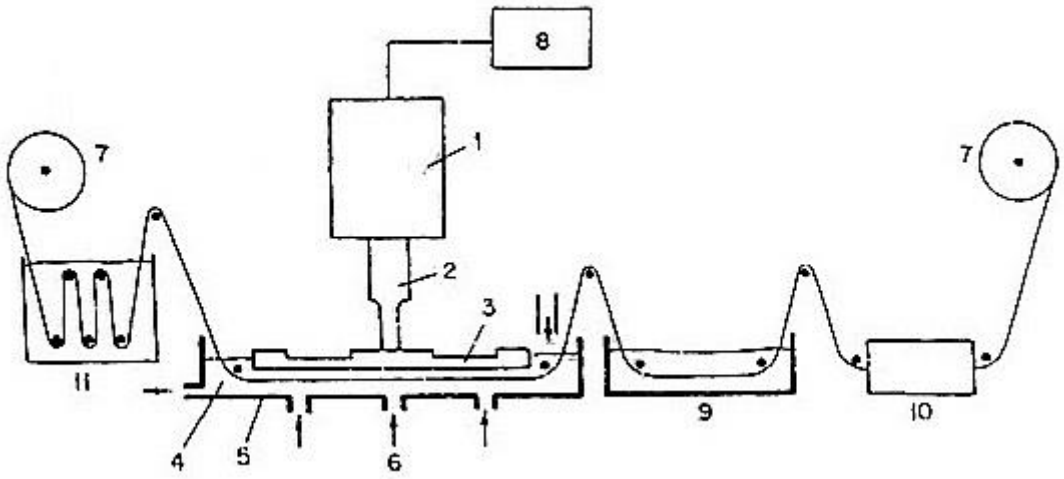

Slika 5-12. Usporedba utjecaja na okoliš: a) praškastog deterdženta (koncepti A i B); b) tekućeg deterdženta za pranje tekstila koji je propisan patentom [323]; c) tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja

Kako nema podataka o materijalima za izradu prototipa koncepta C, pretpostavljena je lista materijala za izradu prototipa (Tablica 5-8). Na listi materijala dominiraju materijali nehrđajući čelik i aluminij, dok je pretpostavljeno da je udio polimera značajno manji nego kod koncepata A i B.

Tablica 5-8. Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju [358]

| Oznaka | Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju | Komada |
|---|---|---|
| 1 | Piezoelektrični ili elektromagnetski generator (pretvarač) ultrazvučnih valova snage 200/600 W | 2 |
| 2 | Mehanički pojačivač ultrazvuka | 2 |
| 3 | Vibrirajuća ploča (emiter ultrazvučnih valova)<br>- aluminijska ploča (titan legura dimenzije: 220mmx220mmx10mm) | 4 |
| 4 | Tekući medij za pranje (mješavina tekućeg deterdženta i vode) | 1 |
| 5 | Spremnik | 1 |
| 6 | Sustav zamjene tekućine za pranje | 1 |
| 7 | Sustav kolotura za vođenje tekstila | 1 |
| 8 | Električni motor | 1 |
| 9 | Spremnik za ispiranje u vodi | 1 |
| 10 | Sustav za tretiranje ultrazvučnim valovima bez tekućeg medija (funkcije: cijeđenje, otklanjanje vode) | 1 |
| 11 | Sustav za pred namakanje | 1 |

Oznake dijelova sustava prema patentu (Slika 5-13).

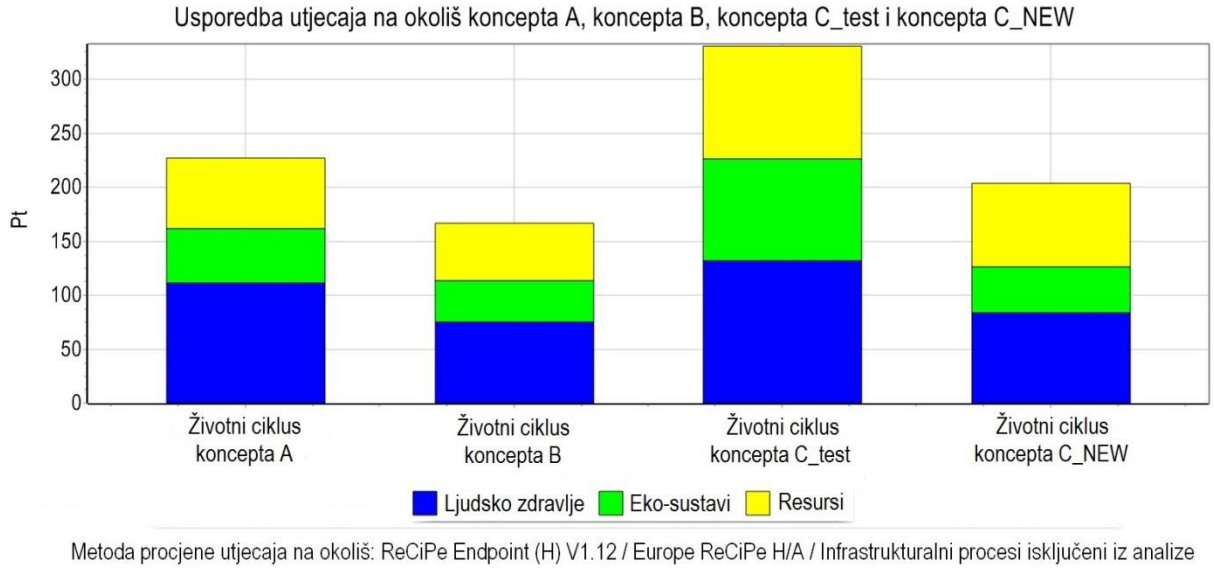



Slika 5-13. Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila prema patentu [358], oznake dijelova sustava: Tablica 5-8

Pretpostavljeno je da je za izradu prototipa koncepta C potrebno tri puta više materijala koji su čelik i aluminija nego što je to potrebno za izradu perilice koncepta pranja rublja A. Isto

je određeno za elektroničke komponente, dok je masa polipropilena nepromijenjena. Polipropilen ne dominira listom materijala perilice koncepta C. Inače i malim variranjem udjela polipropilena i elektroničkih komponenata moguće je dobiti značajno izmijenjene utjecaje na okoliš, te time izmijeniti rang ekološke prihvatljivosti koncepata.

Kako nema pouzdanih podataka o listi materijala perilice koncepta C, pretpostavljen je najgori slučaj liste materijala prototipa C gdje je masa osnovnih materijala za izradu perilice koncepta C tri puta veća nego kod koncepta perilice koncepta A. Slika 5-14 prikazuje usporedbu utjecaja na okoliš koncepata A, B i dvije varijante koncepta C. U slučaju koncepta C_NEW (Slika 5-14) nema neželjenih utjecaja na okoliš do kojih dolazi kod koncepta C kod kojeg je korištena tekućina za pranje tekstila iz rada Gallego-Juárez i drugih [323].




Slika 5-14. Usporedba utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta A, koncepta B, koncepta C_test i koncepta C_NEW

Utjecaji na okoliš koncepta C_NEW manji su od utjecaja na okoliš koncepta A, te veći od utjecaja na okoliš koncepta B. Uzrok tomu je ekološki prihvatljivija potrošnja energije u fazi eksploatacije, no i nešto veća potrošnja materijala jer je koncept C osmišljen prema prototipu ultrazvučne perilice, a lista materijala je pretpostavljena temeljem liste materijala prethodnih generacija perilice rublja (perilice koncepta A). Valja imati na umu da je rekonstrukcijom moguće smanjiti utjecaje na okoliš do kojih dolazi uslijed utjecaja materijala od kojih je izrađen

tehnički sustav za do 50% bez negativnih posljedica na funkcionalnost proizvoda. Malim izmjenama konstrukcije ultrazvučne perilice time bi se postigla ekološki prihvatljivija varijanta koncepta C, no ne možemo sa sigurnošću tvrditi da bi se radilo i o ekološki prihvatljivijem konceptu od koncepta B.

### *5.3.5. LCA koncepata čišćenja rublja $D^a$ i $D^b$*

Koncept $D^a$ je koncept čišćenja rublja sublimacijom peleta ugljikovog dioksida, a koncept $D^b$ je koncept čišćenja rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom.

Koncepcijskom varijantom $D^a$ čišćenje rublja ostvaruje se usmjerenom strujom zraka i ugljikovog dioksida. Ugljikov dioksid u krutom agregatnom stanju pohranjen je u obliku peleta. Rublje se pohranjuje u bubanj po uzoru na perilice koncepata pranja rublja A, B i E. Najvažniji dijelovi uređaja za strojno čišćenje ugljikovim dioksidom su motor, kompresor, spremnik ugljikovog dioksida, regulator tlaka, komora za miješanje i mlaznice [359].

Rublje se čisti smjesom zraka i ugljikovog dioksida. Ugljikov dioksid iz peleta sublimira u plin, te se putem mlaznica jednoliko raspršuje u bubanj na rublje. Parametri procesa čišćenja suhim ledom su: gustoća kuglica, protok zraka, brzina peleta i temperatura zraka [359].

Ugljikov dioksid u plinovitom stanju koristi se u prehrambenoj i kemijskoj industriji, kao sredstvo za stvaranje inertne atmosfere. Ugljikov dioksid je nusprodukt procesa proizvodnje amonijaka (metan) i vodika.

Prema podacima iz kataloga uređaja za odmašćivanje i čišćenje površina peletima suhog leda [359], potrošnja peleta ugljikovog dioksida iznosi 4 litre po ciklusu čišćenja. Pritom nisu navedene specifikacije poput dimenzija površine koju je moguće tretirati u jednom ciklusu, kao ni vrijeme standardnog ciklusa čišćenja. Sutanto [324] navodi primjer procesa čišćenja 17 kilograma rublja kod kojeg potrošnja ugljikovog dioksida iznosi 2 kilograma.

U slučaju koncepta $D^b$, ugljikov dioksid u tekućem stanju nalazi se pod visokim tlakom u spremniku što omogućava da se veće količine plina pohrane za više ciklusa čišćenja [324]. Zrak se dobavlja se iz neposredne okoline tehničkog sustava, te stlačuje što omogućava strujanje kojim se uklanjaju nečistoće s rublja.

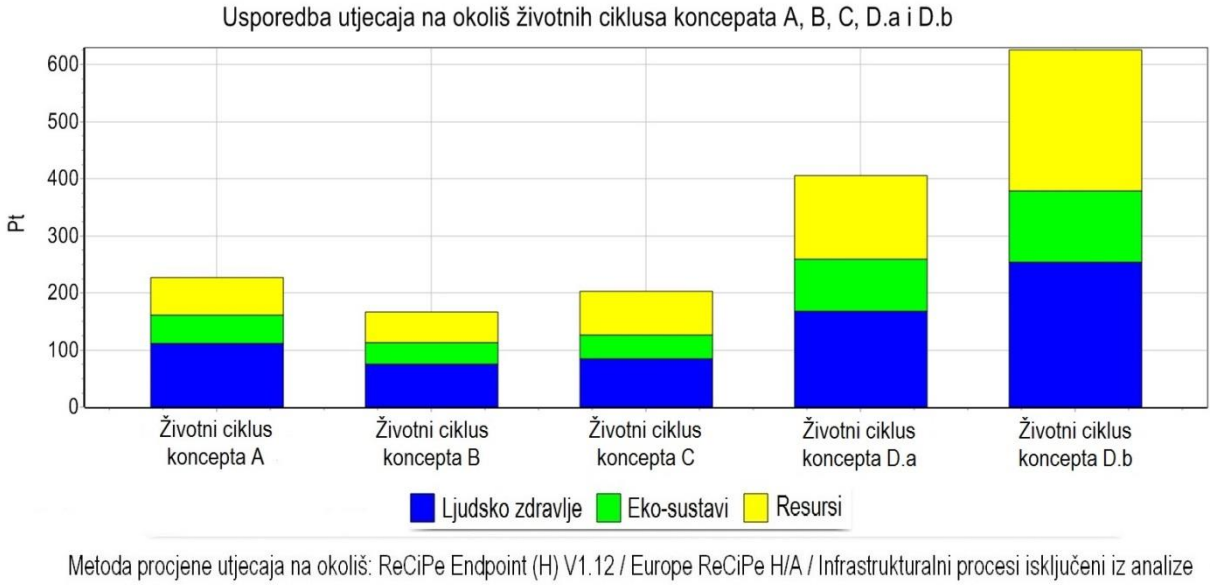
Za pranje 17 kilograma potrebno je 120 kilograma ukapljenog ugljikovog dioksida [324]. Po završetku procesa 'suhog' pranja ugljikovim dioksidom, 2 kilograma ugljikovog dioksida u plinovitom stanju otpušta se u okolinu, a ostatak ugljikovog dioksida u tekućem stanju vakuumskom pumpom odvodi se do destilacijske jedinice (Slika 4-22).

Uslijed velikog protoka smjese zraka i ugljikovog dioksida koji se ostvaruje na mlaznicama usmjerenoj na rublje generira se buka (razina buke od 85 dB do 130 dB [360]). Buka je sekundarni efekt procesa čišćenja suhim ledom koji nastaje uslijed protoka i brzine strujanja plinovite smjese zraka i ugljikovog dioksida kroz mlaznicu (koncept $D^a$).

Kako se čišćenje odvija u zatvorenom prostoru bubnja perilice potrebna je ventilacija. Ugljikov dioksid nije toksičan ukoliko se omogući pravovremeno i postepeno ispuštanje ugljikovog dioksida u neposrednu okolinu. Kratkotrajna izloženost koncentraciji od 2% ne djeluje štetno na ljudsko zdravlje. Veće koncentracije ugljikovog dioksida mogu smanjiti koncentraciju kisika u zraku, što otežava disanje, a može uzrokovati i gušenje. Pri istjecanju ugljikovog dioksida iz bubnja pod tlakom stvara se statički elektricitet koji može uzrokovati paljenje lako zapaljivog materijala u blizini perilice.

Rotacija bubnja u koji je pohranjeno rublje ostvaruje se na isti način kao kod koncepata A, B i E, te je stoga moguće procijeniti potrošnju energije za mehaničko djelovanje bubnja na rublje pohranjeno u bubnju na 0,19 kWh (Tablica 5-4).

Masa uređaja koncepta $D^a$ može se procijeniti na zbroj uređaja koji omogućavaju njegovu punu funkcionalnost, a to su kompresor, uređaj za čišćenje peletima ugljikovog dioksida [325] i ostali dijelovi uređaja među kojima je masom najdominantniji bubanj perilice. Ukupna masa uređaja procijenjena je na 150 kilograma. Sutanto [324] navodi primjer uređaja za pranje ukapljenim ugljikovim dioksidom kao ekološki prihvatljivu alternativu u kemijskim čistionicama. Masa uređaja iznosi 3600 kilograma. Potrošnja električne energije je 2,2 kWh po ciklusu pranja. Ovaj parametar procesa pranja uzet je u obzir prilikom procjene životnog ciklusa koncepta $D^b$ (Slika 5-15).




Slika 5-15. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, D[a] i D[b]

## *5.3.6. LCA koncepta pranja rublja E*

Koncept pranja rublja E je koncept pranja polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom.

Za pranje polimernim kuglicama preporuka je koristiti sljedeće omjere vode i tekstila: 1,75:1, 1,5:1, 1,2:1 i 1,1:1 [361]. Potrošnja polimernih kuglica je u omjeru 2:1 na rublje. Uz 4,5 kilograma rublja potrošnja polimernih kuglica je 9 kilograma. Polimerne kuglice su reciklabilne, pa se mogu koristiti za oko 30 pranja. Nakon toga, istrošene polimerne kuglice potrebno je zamijeniti novima. Materijal polimernih kuglica je najlon [361]. Slika 5-16 prikazuje skicu i uređaj za pranje rublja polimernim kuglicama.

a) b) c)

Slika 5-16. a) Skica polimernih kuglica u bubnju perilice [362]; b) Prikaz upravljanja perilicom Xeros [363]; c) Prikaz polimernih kuglica u bubnju perilice Xeros [363]

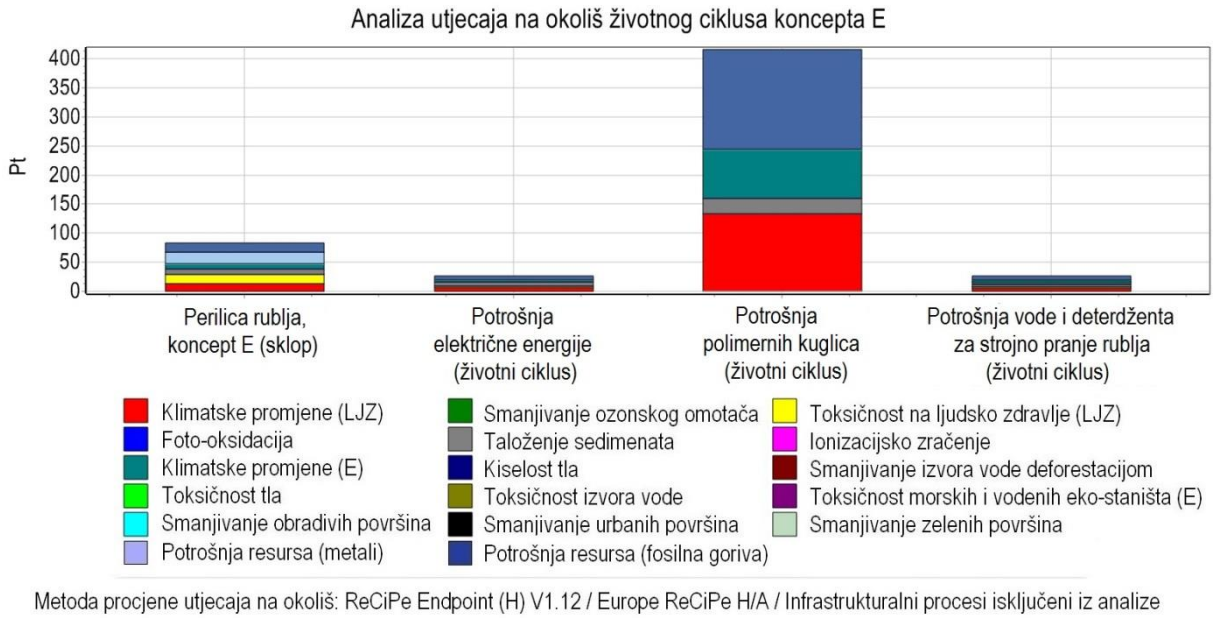
Potrošnja električne energije uslijed mehaničkog djelovanje na tekstil usporediva je potrošnji energije procesa pranja toplom vodom (30°C) i deterdžentom (Slika 5-6) [354]. Rotacijom bubnja ostvaruju se centrifugalne sile kojima se djeluje na polimerne kuglice i rublje u bubnju. Pritom se postižu brzine rotacije u iznosu oko 500 okr/min tijekom prvog dijela pranja, zatim 40 i 60 okr/min tijekom srednje faze ciklusa pranja i 180 okr/min za posljednju fazu procesa pranja tijekom koje se odvija odvajanje polimernih kuglica od tekstila i centrifuga, odnosno cijeđenje tekstila u bubnju.

Proces pranja polimernim kuglicama usporediv je s procesom pranja deterdžentom i toplom vodom (30°C) u pogledu potrošnje električne energije potrebne za ostvarivanje mehaničkog djelovanja na polimerne kuglice i tekstil u bubnju, vremenu potrebnom za 1 ciklus pranja, te po potrošnji energije za zagrijavanje vode (30°C) u prvom dijelu ciklusa pranja ukoliko je tako specificirano opisom koncepta.

Patentom US2015128358A1 [361] je opisan test efektivnosti pranja polimernim kuglicama. Testom je definirana potrošnja vode, deterdženta i polimernih kuglica po 1 ciklusu pranja (4 do 5 kilograma rublja). Test je proveden u perilici rublja kapaciteta 4,3 kilograma tekstila, što je u skladu sa parametrima procesa pranja za procjenu životnog ciklusa (4 do 5 kilograma rublja). Potrošnja vode za namakanje tekstila u prvom dijelu procesa pranja iznosi 4 litre, nakon čega se rublje namače s dodatnih 4 litre vode i standardnom dozom deterdženta od 75 grama. 14,5 litara vode služi za transport polimernih kuglica u bubanj perilice. U završnom dijelu procesa potrebno je dodatnih 15 litara vode za ispiranje i još 5 litara vode za ispiranje polimernih kuglica u zasebnom spremniku. Ukupno je testom propisano 43 litre vode za jedan ciklus pranja. Konstrukcija perilice E ne razlikuje se mnogo od konstrukcije perilice koncepta A, te je pretpostavljeno da se sastoji od istih materijala kao perilica A, no u dvostrukoj količini, osim integriranih elektroničkih sklopova čija je masa jednaka svim analiziranim konceptima u ovoj procjeni i iznosi 2,35 kilograma.

Komercijalizaciju koncepta E nalazimo u obliku automatske perilice tekstila u industriji, hotelijerstvu i drugim granama djelatnosti pranja tekstila na veliko i za američko tržište (Slika 5-17). Stoga su i parametri koji su definirani patentom i specificirani testom učinkovitosti pranja tekstila, prilagođeni takvoj primjeni.

Slika 5-17. Prikaz Xeros perilice rublja [364]




Slika 5-18. Analiza utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta E

Utjecaj na okoliš uslijed životnog vijeka polimernih kuglica čini 58% svih utjecaja na okoliš koncepta pranja rublja polimernim kuglicama, deterdžentom i vodom (Slika 5-18).

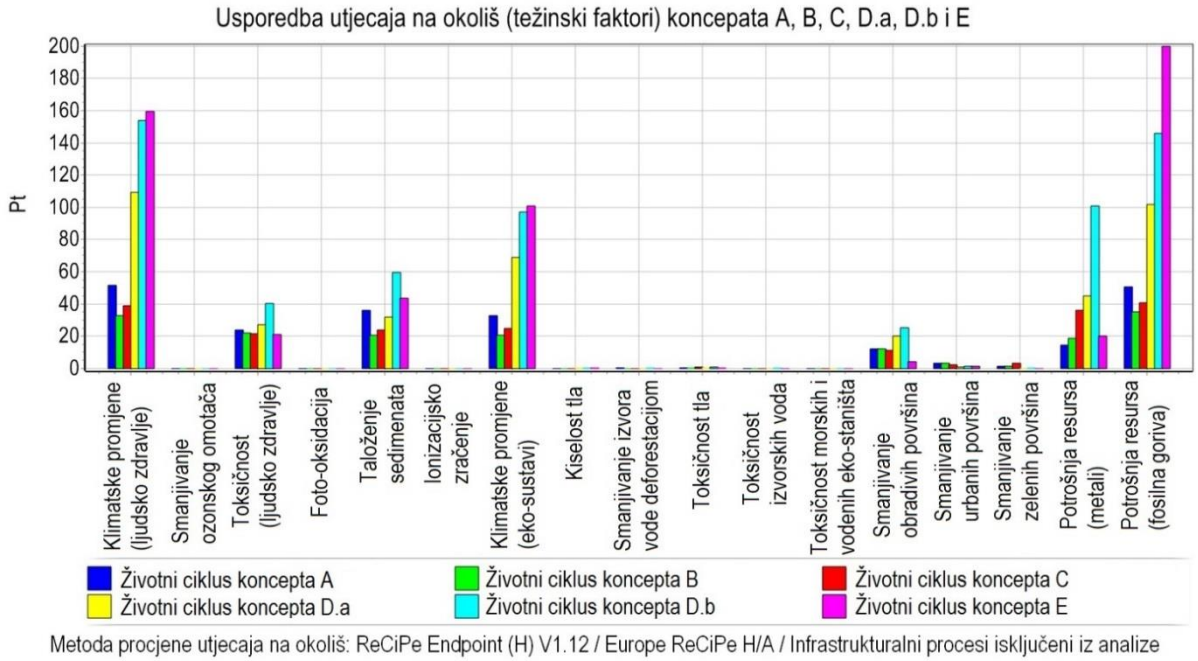
## 5.4. Rezultati procjene utjecaja na okoliš i rangiranje koncepata

Tumačenje rezultata *LCA* prema normi ISO 14044 [86] podrazumijeva analizu pretpostavki o proizvodu i njegovom životnom ciklusu, ulaznim podacima te odabranim

metodama i tehnikama procjene utjecaja na okoliš. Kao softverska potpora unosu i obradi podataka *LCA* korišten je softver *SimaPro*™ [88]. Odabrana metoda procjene utjecaja na okoliš je *ReCiPe*™ metoda [90] kojom se tvari iz inventara proizvoda klasificiraju prema učinku na okoliš, normaliziraju te prikazuju prema kategorijama utjecaja na okoliš.

Podaci iz inventara životnog ciklusa se grupiraju u kategorije (razrede) utjecaja na okoliš kako bi se procijenile razine štetnosti pojedinih tvari. Neke tvari mogu biti svrstane u više od jedne kategorije utjecaja na okoliš. Primjerice, kemijski spojevi dušikovih oksida su toksični, lako se pretvaraju u kiselinu i uzrokuju deforestaciju, te time doprinose kategorijama utjecaja toksičnost, deforestacija i kiselost tla.

Tumačenje rezultata procjene je jednostavno ukoliko rezultati ukazuju na veći utjecaj na okoliš jednog proizvoda obzirom na veći broj kategorija utjecaja na okoliš. Ali ukoliko procjena ukazuje na primjerice rezultate visoke kiselosti jednog proizvoda, te klimatskih promjena drugog proizvoda, teško je usporediti razine štetnosti pojedinih kategorija utjecaja na okoliš [226]. Slika 5-19 prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš perilica rublja prema kategorijama srednjih utjecaja na okoliš.

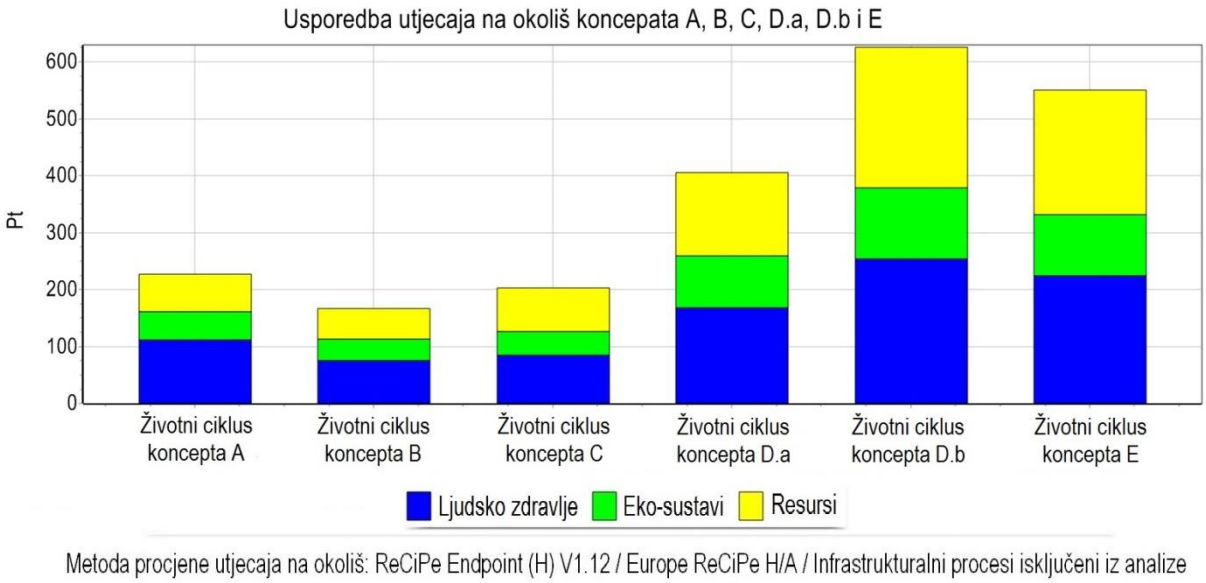



Slika 5-19. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata (težinski faktori, prikaz po kategorijama srednjih utjecaja)

Slika 5-19 prikazuje jasnu podjelu na koncepte s većim utjecajima na okoliš u kategorijama klimatske promjene (ljudsko zdravlje), klimatske promjene (eko-sustavi) i potrošnja resursa (fosilna goriva). To su koncepti perilice rublja E i $D^b$.

Kategorije srednjih utjecaja su kategorije utjecaja na okoliš kao što su klimatske promjene, kiselost tla, toksičnost, itd. Utjecaji na okoliš grupirani prema kategorijama zdravlje ljudi, eko-sustav i prirodni resursu su kategorije krajnjih utjecaja. Rezultati procjene krajnjih utjecaja podrazumijevaju veću razinu nesigurnosti u usporedbi s rezultatima procjene srednjih utjecaja. Međutim, procjena krajnjih utjecaja često je praktičnija za donositelje odluka u razvojnom procesu i za dionike koje zanima krajnji rezultat usporedbe, a ne parcijalni doprinosi kategorijama srednjih utjecaja na okoliš.

Slika 5-20 prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš koncepata perilica rublja nakon primjene težinskih faktora i normalizacije. Težinski faktori, modeli i metode kojima se rezultati inventara životnog ciklusa prikazuju u obliku kategorija utjecaja na okoliš nisu strogo standardizirani ili propisani ISO standardom [1], već su dani na izbor procjeniteljima [227].




Slika 5-20. Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, $D^a$, $D^b$ i E

Kvantifikacija utjecaja na okoliš postiže se pomoću inventara životnog ciklusa u kojemu su zabilježeni svi resursi, ulazni podaci o potrošnji energije i materijala, te emisije i izlazi

materijala, kemijskih spojeva i tvari, te neiskorištena energija za ukupni životni ciklus "od kolijevke do groba" proizvoda. Podaci u inventaru životnog ciklusa sakupljeni su za pojedine faze životnog ciklusa proizvoda, procese vađenja i proizvodnje sirovina do kojih su proizvedeni materijali za izradu proizvoda, zatim podaci o proizvodnim postupcima i potrošnji energije i materijala (primjerice vode u proizvodnji), distribuciji, transportu (prijevozu), eksploataciji i odlaganju proizvoda, te recikliranja, oporabe ili drugih alternativa odlaganja proizvoda [28].

Potrošnja energije potrebne za formulaciju deterdženta za strojno pranje rublja u slučaju koncepata A, B, C i E zanemarena je jer iznosi samo mali dio ukupne potrošnje energije [350]. Utjecaj na okoliš uslijed eksploatacije deterdženta za strojno pranje rublja uzet je u obzir za procjenu životnog ciklusa koncepata i to u fazi eksploatacije, odnosno procjeni ukupnih utjecaja tijekom životnog ciklusa koncepata.

Prilikom procjene utjecaja na okoliš koncepta ultrazvučnog pranja rublja tekućim deterdžentom i vodom (C_patent) kategorije srednjih utjecaja na okoliš kao što su deforestacija, smanjivanje zelenih površina i obradivog tla, te toksičnost pitkih voda pokazuju veće relativne udjele utjecaja na okoliš uslijed veće koncentracije fosfata u sastavu tekućeg deterdženta definiranog patentom.

Europski parlamenta i Vijeće Europske Unije propisali su ograničenja uporabe fosfata u deterdžentima za pranje rublja koji se koriste u kućanstvima [365]. Ovom odredbom o ograničavanju uporabe fosfata u deterdžentima za pranje rublja i deterdžentima za strojno pranje posuđa koji se koriste u kućanstvu nastoji se smanjiti utjecaj fosfata iz deterdženata na rizik eutrofikacije, te snizili troškovi odstranjivanja fosfata u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. Takve uštede nadilaze trošak preformulacije (izmjenjivanja sastava postojeće mješavine) deterdženata za pranje rublja sa zamjenama za fosfate.

Godine 2014. dopušteni udio *STTP-a* u sastavu deterdženata ograničen je na do 14% sastava deterdženata [366]. Za potrebe usporedbe koncepcijskih rješenja iz studije slučaja, udio *STTP-a* i *LAS-a* je prilagođen novim zakonskim regulativama, što je rezultiralo procjenom utjecaja na okoliš koncepta C_test. To je stoga kako bi se ostvarila usporedivost koncepcijskih rješenja tehničkih sustava. Naime, kod prototipnog rješenja C_prototip nije unaprijed vođeno računa o ekološkoj prihvatljivosti tekućeg deterdženta za pranje [285].

Tablica 5-9. Lista materijala perilica – koeficijenti za procjenu liste materijala

| Naziv koncepta | Koeficijent kojim je množena masa materijala iz liste materijala koncepta A [279] i koncepta B [355] |
|---|---|
| Koncept A | 1 |
| Koncept B | Tablica 5-5 |
| Koncept C_NEW | 3 |
| Koncept D[a] | 4 |
| Koncept D[b] | 10 |
| Koncept E | +25% |

Prilikom sastavljanja inventara životnog ciklusa potrebno je donijeti brojne pretpostavki o tehnološkim postupcima proizvodnje, potrošnji energije i materijala, emisijama i otpadu na kraju životnog vijeka proizvoda.

Inventar životnog ciklusa sadrži podatke o svim ulazima i izlazima energije i materijala procesa u životnom ciklusu proizvoda, uključujući emisije i otpad. Ti podaci mogu proizlaziti iz različitih izvora u literaturi (kao što je i ovdje slučaj) uslijed čega kvaliteta ulaznih podataka može varirati.

Prema studiji životnog ciklusa perilice rublja u radu Rüdenauer i drugih [279], može se zaključiti o tome da se životni ciklus analizirane perilice može podijeliti na dvije osnovne faze: proizvodnju i eksploataciju. Udio utjecaja na okoliš u fazi eksploatacije je visokih 64,8%, a udio utjecaja na okoliš u fazi proizvodnje je 35,2%, od čega 33,3% čini eksploatacija sirovina za izradu materijala proizvoda. Iz tog razloga opseg provedene procjene životnog ciklusa uključivao je proizvodnju materijala prema listi materijala koja je procijenjena za svaki koncept zasebno, a prema podacima iz literature o masi i materijalima komponenata uređaja. U procjenu utjecaja na okoliš nije uključena potrošnja energije uslijed formulacije deterdženta, jer prema Saouter i van Hoofu [350] radi se o maloj potrošnji energije koja ima zanemarivi udio u ukupnim utjecajima na okoliš perilice rublja.

Zanemarivo je odstupanje podataka o ukupnoj potrošnji električne energije u radu Rüdenauer i drugih [279] i podataka o potrošnji električne energije koncepta A koji su korišteni u ovom istraživanju. U procjeni životnog ciklusa provedenoj u okviru ovog istraživanja, životni

ciklus je određen brojem ciklusa pranja u fazi eksploatacije koji iznosi 2000 ciklusa, a što je nešto manje od broja ciklusa koji je definiran u radu Rüdenauer i drugih [279].

Prema Rüdenauer i drugima [279] faza kraja životnog vijeka koju uključuju recikliranje ili oporaba proizvoda imaju mali udio u ukupnoj slici utjecaja na okoliš. Radi se o udjelu -8,2% u ukupnim utjecajima na okoliš koji se odnose na fazu kraja životnog ciklusa proizvoda. Negativni predznak ukazuje na pozitivne (poželjne) utjecaje na okoliš.

Nije jednostavno zaključiti o kandidatima za recikliranje samo temeljem liste materijala, jer komponente koje imaju visoki stupanj reciklabilnosti, ne moraju biti ekonomski isplative za recikliranje. Komponente od čelika kao što je kućište ili bubanj primjerice imaju pravo prvenstva da budu reciklirane, zatim motori, elektronički kablovi, transformatori itd. S druge strane integrirani elektronički sklopovi i ABS prvi su na listi za ekodizajn odnosno rekonstrukciju i poboljšavanje ekološke prihvatljivosti, jer su njihovi utjecaji na okoliš među najvećima, a ekonomičnost i reciklabilnost su mali [367].

Utjecaji na eko-sustav, ljudsko zdravlje i potrošnju resursa do kojih dolazi uslijed buke, te kao posljedica utjecaja na okoliš koji imaju procesi povezani sa sustavom odvodnje sive vode nisu uzeti u obzir u ovoj studiji utjecaja na okoliš koncepata pranja rublja. Utjecaji na okoliš koji se mogu otkriti proučavanjem posljedica na eko-sustav, ljudsko zdravlje i potrošnju resursa, a koji postaju mjerljivi tek nakon dužeg vremenskog perioda nisu obuhvaćeni granicom sustava provedene *LCA* studije. Uobičajeno se takvi utjecaji na okoliš uzimaju u obzir samo ukoliko su posebno značajni za vrednovanje i usporedbu proizvoda, te ako je procjenu njihovog utjecaja moguće provesti u zadanom vremenu, s raspoloživim informacijama o proizvodu i bez dodatnih troškova. U poduzećima koja se bave konstruiranjem i razvojem proizvoda, najčešće se ne provode takve dodatne studije utjecaja na okoliš, a zbog toga što su takve *LCA* studije vremenski i resursno prezahtjevni za razvojna poduzeća.

Kvalitativne, semi-kvantitativne, kvalitativno-kvantitativne i kvantitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti nisu u potpunosti prilagođene vrednovanju koncepata koji su originalnog dizajna, konceptima pranja rublja.

Kritike na metodologiju procjene životnog ciklusa mogu se podijeliti prema pojedinim koracima *LCA* metodologije (Tablica 5-10). Tijekom definiranja ciljeva i opsega studije, potrebno je obratiti pažnju na izbor funkcionalne jedinice, definiranje opsega studije i granica razmatranog sustava, definiranje društvenih i ekonomskih pokazatelja utjecaja na okoliš, te razmatranje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda [367].

Prilikom analize inventara životnog ciklusa, potrebno je razmotriti posljedice odluka koje se tiču kvalitete podataka, dodjeljivanja generičkih procesa iz licenciranih baza podataka, te odstupanja uslijed specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa [368].

Odstupanja u kvaliteti rezultata procjene mogu proizlaziti iz odabira kategorija utjecaja na okoliš, pretpostavki o geografske i prostorne određenosti utjecaja na okoliš (uslijed specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa), pretpostavke o lokalnim utjecajima na okoliš i specifičnostima lokalnog okoliša, te pretpostavke o trajanju izloženosti okoliša utjecajima na okoliš.

Prilikom interpretacije rezultata studije procjene životnog ciklusa, potrebno je donijeti odluke o težinskim faktorima važnosti utjecaja na okoliš koji su predstavljeni kategorijama utjecaja na okoliš, te uključiti procjenu nesigurnosti uslijed navedenih pretpostavki i ograničenja uslijed svih metodoloških koraka studije [369]. Tablica 5-10 prikazuje ograničenja *LCA* metode.

Tablica 5-10. Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) i uzroci mogućih odstupanja i nesigurnosti pri generiranju rezultata procjene [368], [369]

| Koraci *LCA* | Mogući problemi povezani sa provedbom procjene životnog ciklusa, tj. uzroci mogućih odstupanja u rezultatima i kvaliteti procjene |
|---|---|
| 1. Definiranje cilja i opsega studije | Izbor funkcionalne jedinice<br>Definicija opsega studije<br>Društveni i ekonomski pokazatelji utjecaja na okoliš koji su uključeni ili isključeni iz studije<br>Razmatranje ili zanemarivanje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda |
| 2. Analiza inventara životnog ciklusa | Alokacija procesa (dodjeljivanje utjecaja na okoliš obzirom na pretpostavke o uzrokovanim utjecajima na okoliš)<br>Kriteriji prema kojima se zanemaruju određeni procesi i faze životnog ciklusa<br>Specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa (regionalne, vremenske, kulturološke) |
| 3. Procjena utjecaja na okoliš | Izbor kategorija utjecaja na okoliš i ograničenja uslijed izbora metodologije procjene utjecaja na okoliš<br>Varijantnost rezultata uslijed odstupanja s obzirom na geografske i prostorne određenosti utjecaja na okoliš<br>Odstupanje rezultata s obzirom na lokalne utjecaje na okoliš koji su specifični za lokalni okoliš<br>Dinamika promjena u okolišu uslijed djelovanja utjecaja na okoliš i prisutnosti emisija i otpada u okolišu<br>Trajanje utjecaja na okoliš, odnosno specifičnosti uslijed vremenske izloženosti okoliša utjecajima na okoliš |
| 4. Tumačenje rezultata | Težinskih faktora važnosti kategorija utjecaja na okoliš i kvalitativno vrednovanje<br>Nesigurnosti prilikom odlučivanja |
| Svi koraci metodologije | Dostupnost i kvaliteta podataka za procjenu životnog ciklusa. |

# 6. VALIDACIJA PREDLOŽENE METODE I VERIFIKACIJA ISTRAŽIVANJA

*Validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja provedena je s ciljem provjere korisnosti, konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i metode. Kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni su konceptualnoj fazi konstruiranja, a predložena metoda služi vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti koncepcijskih varijanti tehničkih sustava. Validacija je provedena primjenom metode na primjerima koncepata pranja rublja i koncepata stolnog sata budilice. Rezultati vrednovanja predloženom metodom uspoređeni su s rezultatima studije kvalitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti, zatim vrednovanja procjenom životnog ciklusa i vrednovanja temeljem u literaturi objavljene LCA studije.*

## 6.1. Postupak validacije predložene metode

Metodologije, metode i alati su znanstveni doprinosi istraživanja u području konstruiranja i razvoja tehničkih sustava. Validaciju metoda konstruiranja i razvoja tehničkih

sustava često nije moguće provesti na „formalan, precizno točan, strogo propisan i kvantitativan" način [77]. To je stoga što se tvrdnje i pretpostavke istraživanja, osim na matematičkom modeliranju, temelje na subjektivnim tvrdnjama i argumentiranim vrijednosnim sudovima istraživača, eksperata i sudionika u istraživanju.

Validacija metoda provodi se zbog provjere svrsishodnosti, korisnosti i primjenjivosti metoda za propisanu namjenu. Za potrebe validacije u doktorskoj disertaciji predložene metode, odabran je metodološki pristup validaciji metoda u području konstruiranja i razvoja tehničkih sustava - *Validacijski kvadrat* [77]. Prema metodologiji *Validacijskog kvadrata*, validacija metode je postupak u kojem se provjerava svrsishodnost i korisnost predložene metode [77]. Postupak validacije sastoji se od provjere unutarnje konzistentnosti (efektivnost) i vanjske relevantnosti (efikasnost) predložene metode.

Validacija se provodi na način da se propituje prikladnost metode za njezinu deklariranu namjenu. Prije provedbe validacije navode se osnovne informacije o metodi [370]:

- Svrha (namjena) metode: *Predložena metoda je metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava.* Metoda je namijenjena usporedbi (rangiranju) koncepata prema kriterijima ekološke prihvatljivosti koji su propisani metodom. Metoda je primjenjiva za koncepte tehničkih sustava koji su originalan dizajn. Metoda je namijenjena konceptima koji su tehnički sustavi, a nije namijenjena sustavima proizvod-usluge i socio-tehnički sustavi. Metoda nije namijenjena da bude jedina metoda vrednovanja koncepta u konceptualnoj fazi stoga što metodom nisu propisani ostali, za odabir koncepta važni kriteriji.
- Područje primjene metode: *Predložena metoda namijenjena je konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.* Metoda nije primjenjiva u fazama razvoja kad su koncepti u fazi idejne razrade (nedostatak informacija o konceptima) ili u fazi konstrukcijske razrade (koncepcijsko rješenje se više ne mijenja). Metoda nije namijenjena razvoju kompleksnih tehničkih sustava, jer takvi sustavi zahtijevaju specifičan razvojni proces i metode.

- Vrsta očekivanog rezultata: *Predložena metoda rezultira rangiranjem skupa koncepta prema ekološkoj prihvatljivosti.* Zbog toga što se temelji na kvalitativnim kriterijima, subjektivnoj procjeni tijekom dodjeljivanja ocjena prema kriterijima, te kvantitativnoj tehnici agregiranja kriterija, metoda je kvalitativno-kvantitativna. Metodom nisu propisani ostali kriteriji vrednovanja važni za odabir koncepta. Rezultate predložene metode valja koristiti kao ulazne podatke metode vrednovanja koncepata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Predložena metoda ne uzima u obzir utjecaje na okoliš do kojih dolazi u fazama životnog ciklusa prije eksploatacije proizvoda i na kraju životnog vijeka proizvoda.

## 6.2. Validacija predložene metode

Postupak validacije predložene metode temelji se na provjeri unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti [77], a sastoji se od šest koraka.

Validaciju unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode čine sljedeća tri koraka:

*1.) Provjera valjanosti elemenata metode*

Validacija individualnih konstrukata koji integrirani zajedno čine metodu provodi se putem obrazloženja pojedinačnih elemenata metode. Obrazloženje elemenata metode potvrđuje se navodima iz literature čime se daje znanstvena utemeljenost tvrdnji. Pojedinačni (konstruktivni) elementi predložene metode su pet kriterija ekološke prihvatljivosti i tehnika sume rangova [91].

Analiza kriterija ekološke prihvatljivosti koji su propisani metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti je polazna točka za definiranje kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih predloženom metodom.

Analizirane su sljedeće metode: *Dominance Matrix* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177], *Eco-compass* [187], *LiDS-Wheel* [147], *Eco-products tool* [178], *Econcept Spiderweb* [3], *ERPA matrix* [20], *Eco-Design Value guidelines* [82] i *Design for Environment guidelines* [170]. Ove metode namijenjene su konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Poznavanje

životnog ciklusa važan je preduvjet primjene metoda, no informacije o životnom ciklusu najčešće nisu dostupne tijekom konceptualne faze [2].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti implementirani u analiziranim metodama su kvalitativni, te time prilagođeni vrednovanju u konceptualnoj fazi. No, dodjeljivanje numeričke vrijednosti konceptu ili atributu koncepta pri vrednovanju mora biti temeljeno na smjernicama ili uputama [46], što je zahtjev koji nije zadovoljen u slučaju analiziranih metoda. Dakle, ne postoji podrška u obliku smjernica ili uputa kojima bi se omogućilo dodjeljivanje kvalitativnih ocjena ekološke prihvatljivosti karakteristici ili značajki koncepta i agrigiranje ukupne ocjene ekološke prihvatljivosti koncepta.

Temeljem nabrojanih nedostataka i ograničenja postojećih metoda pristupilo se definiranju kriterija ekološke prihvatljivosti i metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu. Predložena metoda temelji se na pet kriterija ekološke prihvatljivosti. Kriteriji su kvalitativni, no propisane su vrijednosne skale kojima se kvalitativne ocjene (prema svakom od pet kriterija vrednovanja) agregiraju u jednu kvantitativnu ocjenu – rang koncepta. Tablica 6-1 prikazuje elemente predložene metode.

Provjera unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode demonstrirana je na primjeru koncepata pranja rublja kada je ispitano da li se rangiranje ekološki prihvatljivijih koncepata mijenja ako je jedna od ne-optimalnih alternativa zamijenjena ekološki najmanje prihvatljivom alternativom [327]. Koncept pranja rublja peletima suhog leda zamijenjen je konceptom pranja ukapljenim ugljikovim dioksidom. Rangiranje ekološki prihvatljivijih koncepata nije se promijenilo što potvrđuje valjanost tehnike sume rangova.

Tablica 6-1. Vrednovanje elemenata predložene metode [85]

| Elementi metode | Obrazloženje |
|---|---|
| Eko-efektivnost pretvorbi energije i signala | Pretvorbe energije, materijala i signala značajke su karakteristične za radni princip koncepcijskog rješenja, te su kriterij vrednovanja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Kriterij je inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o razmatranju varijantnih radnih principa s ciljem razvoja inovativnih proizvoda.<br>Temelj vrednovanja prema ovom kriteriju su faktori solarne transformabilnosti oblika energije [70]. Faktori solarne transformabilnosti oblika energije [70] definirani su temeljem hijerarhijskog modela oblika energije [243] i solarne transformabilnosti oblika energije [308].<br>Prema principu maksimiziranja snage [309], pozitivno se vrednuju pretvorbe kojima se 'niži' oblici energije (oblici energije s nižim faktorom solarne transformabilnosti) koriste za ostvarivanje oblika energije 'višeg' oblika (oblika energije s višim faktorom solarne transformabilnosti).[1]* |
| Broj pretvorbi energije i signala | Kriterij inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o razmatranju varijantnih radnih principa s ciljem razvoja inovativnih proizvoda. Pretvorbe energije, materijala i signala značajke su karakteristične su za radni princip koncepcijskog rješenja, te su kao takve valjan kriterij vrednovanja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. |
| Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu | Kriterij se temelji na kategorijama strategija gospodarenja otpadom [315]. Definirana je stupnjevita podjela karakteristika sekundarnih efekata prema okolišu prema literaturi [74], [75] i [76]. |
| Broj sekundarnih efekata prema okolišu | Kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda daje informaciju o broju sekundarnih efekata prema okolišu. Koncept može biti visoko rangiran obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, no ukoliko se radi o velikom broju (različitih) latentnih efekata prema okolišu, ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti mora biti uvjetovana i ovim kriterijem vrednovanja. |
| Broj promjena agregatnog stanja materijala | Kriterij inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o povezanosti broja promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu i troškova proizvoda. |
| Tehnika agrigiranja | Tehnika agregiranja kriterija odnosi se na način određivanja zbirne ocjene ili dobrote koncepta temeljem više kriterija koji su implementirani u metodi vrednovanja. Funkcija determinira način okrupnjavanja parcijalnih ocjena atributa alternative prema pojedinim kriterijima vrednovanja u zbirnu vrijednost dobrote koncepta [91].<br>Ako je značajka koncepta vrednovana kvalitativno, radi se o dobroti značajke koncepta. Za svaki kriterij ekološke prihvatljivosti definirane su funkcije dobrote rješenja. Zbog toga što kriteriji nisu istih dimenzija, odabrana tehnika agregiranja je suma rangova [91]. |

[1] Svaka pretvorba energije iz jednog oblika u drugi povezuje se s gubicima energije [312]. Zbog lakšeg razumijevanja pojmova kvaliteta energije i energetska efikasnost u nastavku je dano objašnjenje ta dva pojma. Iako se smatra da energetska efikasnost pretvorbe električne u toplinsku energiju iznosi ~100% [312], ta efikasnost pretvorbe oblika energije ne uzima u obzir 'rad okoliša' potreban za pretvorbu. Cullen i Allwood [371] objašnjavaju da energetska efikasnost računata na konvencionalni način (uz uvažavanje samo prvog stavka termodinamike) ne uzima u obzir kvalitetu energije. Ohta [311] definira kvalitetu oblika energije prema tome koliko je taj oblik energije dostupan u prirodi. Odum [70], [243], te Brown i Ulgiati [308] definiraju kvalitetu oblika energije prema broju jedinica solarne energije potrebne za obavljanje rada u iznosu 1 džula drugog oblika energije. Naime, kvaliteta oblika energije poput mehaničke energije i električne energije je veća od kvalitete primjerice toplinske energije. To je vidljivo i u tablici faktora solarne transformabilnosti (Tablica 4-4).

*2.) Provjera informacijskog toka metode*

Validacija unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode, tj. konstruktivnih elemenata metode (integriranih zajedno) demonstrira se prikazom informacija i podataka, te provjere ispravnosti pretpostavki.

Vrednovanje predloženom metodom temelji se na vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti što je čini više-kriterijskom metodom. Predložena metoda je relativna metoda vrednovanja i kvalitativno-kvantitativna metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Tehnika agregiranja ocjena vrednovanja prema kriterijima vrednovanja predložene metode je suma rangova [91].

Predložena metoda je:

- više-kriterijska
- kvalitativna (ordinarna)
- relativna
- konjuktivna
- služi odabiru i eliminaciji koncepata.

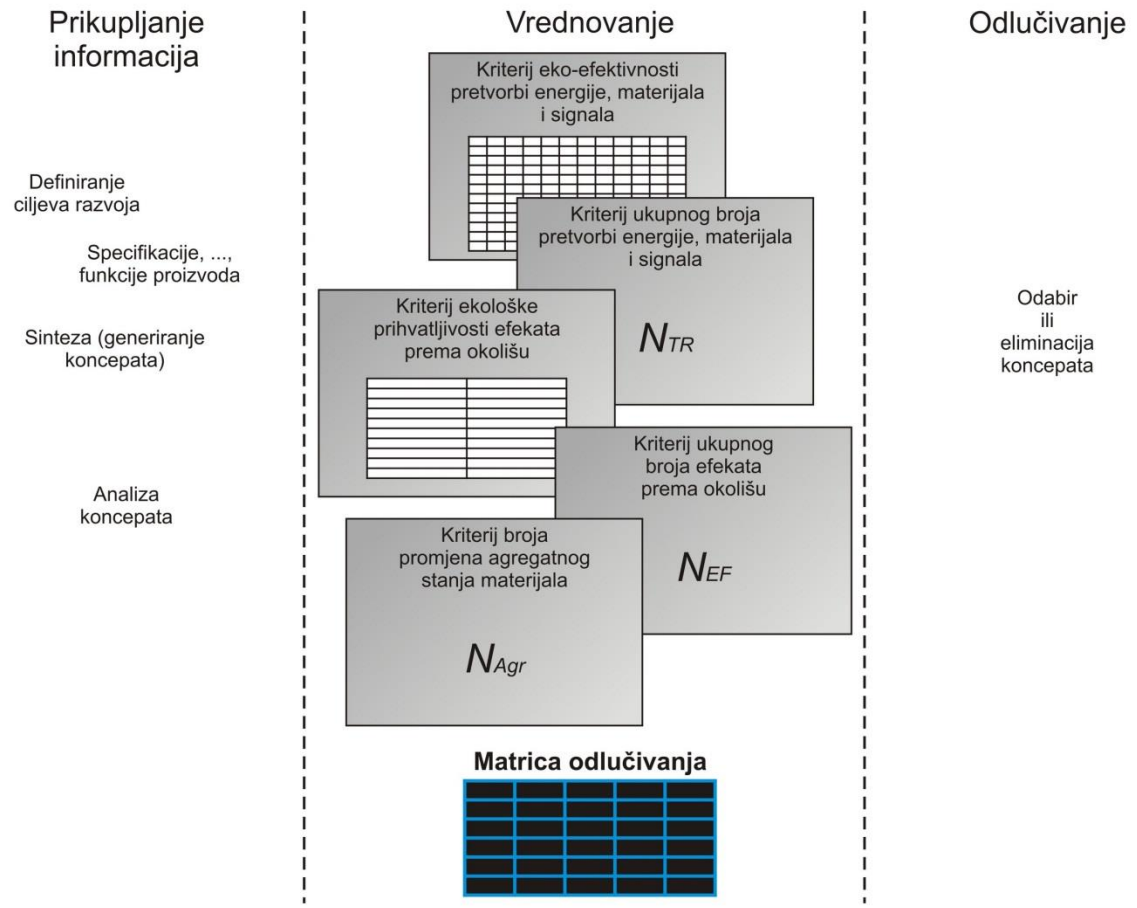
*Predložena metoda je više-kriterijska metoda.* Pri vrednovanju koncepata često se mora uzeti u obzir više kriterija vrednovanja, kao što je i u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Kod više-kriterijskog problema vrednovanja može postojati tzv. hijerarhija kriterija vrednovanja. U tom slučaju težinski faktori trebaju biti definirani jer opisuju relativnu važnost kriterija. Metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti razvijene u okviru ovog istraživanja nije propisana hijerarhija kriterija ekološke prihvatljivosti. Koncept koji je optimalan ima dobar učinak prema svim kriterijima ekološke prihvatljivosti. S druge strane, ekološki neprihvatljivi koncepti su rangirani nisko.

*Predložena metoda je ordinarna metoda.* To znači da rangiranje ovom metodom ukazuje na kvalitativni rang dobrote pojedinog koncepta iz skupa vrednovanih koncepata. Rezultati ne ukazuju na to koliko je određeni koncept proizvoda po pitanju ekološke prihvatljivosti povoljniji ili nepovoljniji od drugog koncepta. Rezultati vrednovanja predloženom metodom prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti zapisuju se u matrici odlučivanja, što omogućava detaljniji pregled dobrote koncepta prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti. Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti primjerenije je konceptualnoj fazi od kvantitativnog vrednovanja metodama procjene životnog ciklusa zbog toga što su informacije o proizvodu (njegovom konceptu) u konceptualnoj fazi uglavnom kvalitativne.

*Predložena metoda je relativna metoda.* Time rezultati vrednovanja i rangiranja ovise o promjeni skupa koncepata. Metode vrednovanja razlikuju u tome da li metoda vrednovanja podržava vrednovanje samo određenog skupa koncepata (relativno vrednovanje obzirom na određeni skup koncepata) ili su rezultati vrednovanja neovisni o promjeni skupa koncepata (apsolutno vrednovanje neovisno o skupu koncepata koji se vrednuju). Apsolutne metode vrednovanja zavise jedino o kriterijima vrednovanja, rezultiraju identičnim vrijednostima i dobroti koncepata neovisno o drugim konceptima u skupu koncepata koji se vrednuju. Kod relativnih metoda vrednovanja, rezultati vrijede samo za određeni skup koncepata koji se vrednuje, a promjena skupa koncepata determinira i vrijednosti generirane za svaki pojedini skup koncepata kao što je slučaj kod predložene metode. To je stoga što primjena ove metode rezultira rangiranjem koncepata iz skupa koncepata koji se vrednuje, od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog koncepta.

*Predložena metoda je konjuktivna metoda.* Funkcija agregiranja kriterija ekološke prihvatljivosti je konjuktivna [292], a to znači da pozitivno vrednovanje prema jednom kriteriju može nadoknaditi negativno vrednovanje prema drugom kriteriju. Rješenja pobjednici su koncepti s najviše pozitivno vrednovanih značajki, a slijede ih koncepti s ravnomjerno raspoređenim brojem pozitivno i negativno vrednovanih značajki koncepcijskog rješenja [91].

*Predložena metoda rezultira rangiranjem koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti*. Kako bi se postiglo smanjivanje skupa koncepata i razlikovanje dobrih od loših rješenja u skupu, moguće je koristiti dvije različite strategije: odabir rješenja (odabir najboljih rješenja iz skupa mogućih rješenja) ili eliminacija rješenja (otkrivanje loših ili neprihvatljivih rješenja iz skupa mogućih rješenja). Potonje zahtijeva manje informacija o konceptima, no ta strategija ne garantira da su preostala rješenja iz skupa mogućih rješenja ekološki prihvatljiva [72]. Studija slučaja, *LCA* analiza i rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja predloženom metodom pokazali su da je u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata važnije eliminirati ekološki neprihvatljive koncepte, nego identificirati koncept koji će biti odabran za daljnju razradu. Izbor ekološki neprihvatljivog koncepta se teško može ispraviti u kasnijim fazama konstruiranja.




Slika 6-1. Prikaz vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom u konceptualnoj fazi

Ulazni podaci metode generiraju se tijekom aktivnosti *Analiza koncepata* (Slika 6-1). Analizu koncepata čine aktivnosti kao što su: analiza fizikalnih efekata, generiranje lanaca fizikalnih efekata i identifikacija sekundarnih efekata prema okolišu. Vrednovanje prema predloženim kriterijima vrednovanja ekološke prihvatljivosti primjenjivo je u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava jer se vrednovanje temelji na analizi fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu razmatranih koncepata. Fizikalni efekti i sekundarni efekti prema okolišu (Chakrabarti i Johnson [317] ih nazivaju latentnim fizikalnim efektima) značajke su koncepta te ih konstruktori uzimaju u obzir tijekom analize koncepata.

Broj i vrsta kriterija ekološke prihvatljivosti su ključni za efikasno vrednovanje metodom zbog sinergijskog učinka. Primjenom istovremeno pet kriterija ekološke prihvatljivosti u obliku zasebne metode vrednovanja postiže se svrsishodnost metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu. Sinergijom kriterija ekološke prihvatljivosti i tehnike agregiranja kriterija postiže se bolja efektivnost kriterija, nego što bi to bilo moguće postići vrednovanjem prema svakom kriteriju zasebno.

*3.) Upotreba primjera*

Validacija predložene metode propisuje primjenu metode na primjerima [77]. Postupak validacije kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode razvijenih u okviru provedenog istraživanja specifičan je iz dva razloga:

*a) <u>Predložena metoda namijenjena je vrednovanju ekološke prihvatljivosti.</u>*

Predloženi kriteriji i metoda namijenjeni su vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Kvantitativne metode smatraju se pouzdanijim metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti jer propisuju da se analize tehničkih sustava provode na sistematičan način, uzimaju u obzir kvantitativne podatke i manje su podložne utjecaju subjektivnih mišljenja onih koji ih koriste [36], [315]. Pregledom literature ustanovljeno je da je ekološku prihvatljivost moguće vrednovati temeljem kvantitativne procjene utjecaja na okoliš tek po završetku konstrukcijske razrade [372].

Stoga su kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti primjerenije konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, ali smatraju se subjektivnima. Razlog tomu je što u konceptualnoj fazi uobičajeno nema dostatan broj informacija, niti dovoljno pouzdanih informacija o proizvodu koji se razvija [7], pa su konstruktori primorani oslanjati se na informacije koje su im dostupne te vlastito znanje i iskustvo.

b) *Predložena metoda namijenjena je vrednovanju u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.*

Druga specifičnost postupka validacije je u tome što su kriteriji i predložena metoda namijenjeni konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

U konceptualnoj fazi, rješenje i proizvod su ugrubo opisani, te je malo informacija temeljem kojih bi se dobila preciznija slika budućeg životnog ciklusa proizvoda i utjecaja na okoliš. Nadalje, u konceptualnoj fazi se iz skupa mogućih rješenja odabire najbolji koncept i to ne samo temeljem jednog, nego više različitih kriterija vrednovanja koncepata. Najbolji koncept ne mora nužno biti ocijenjen najvišom ocjenom ekološke prihvatljivosti, ali mora zadovoljavati kriterije vrednovanja koje su konstruktori odredili prioritetnima.

Poželjna karakteristika koncepcijskih rješenja koja će se vrednovati tijekom validacije predloženih kriterija i metode je da se koncepti međusobno razlikuju u radnim principima. Time se želi ispitati da li se metoda može koristiti za koncepte koji su inovativni, te koncepte koji nisu nužno na istom stupnju konstrukcijske razrade.

Odlukom o konceptu odabire se uobičajeno jedan koncept za daljnju razradu koji će rezultirati gotovim modelom proizvoda. Ostali koncepti iz skupa razmatranih koncepata ne razmatraju se dalje, te se u pravilu ne provode daljnje analize koncepata koji su ocijenjeni sub-optimalnima. To mogu biti oni koncepti koji ne zadovoljavaju zahtjeve korisnika ili neke od drugih važnih kriterije vrednovanja koncepata (definiranih ranije tijekom razvoja).

Koncepti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja nisu još komercijalni proizvodi, te je stoga njihovu kvalitetu moguće ocijeniti jedino temeljem procjene konstruktora, a ne

temeljem ekonomskih pokazatelja uspješnosti kao što je to moguće provjeriti za proizvode koji su već komercijalno dostupni na tržištu.

Zbog navedenih specifičnosti istraživanja u pogledu zahtjeva za validacijom metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koja je također namijenjena konceptualnoj fazi, bilo je nužno osmisliti primjere koncepata na kojima će biti moguće primijeniti kvalitativne i kvantitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti predloženom metodom provedeno je na dva skupa primjera: konceptima pranja rublja i konceptima stolog sata budilice.

*A) Koncepti pranja rublja*

Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja provedeno je u studiji ([63], [81]). Ispitanici u studiji služili su se kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti kako bi rangirali koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti.

Procjena životnog ciklusa (*LCA*) koncepata pranja rublja provedena je s ciljem potvrde valjanosti odabranih koncepata za provjeru vanjske relevantnosti predložene metode.

Tržište kućanskih električnih perilica rublja uređeno je Uredbom Komisije Europske Unije [365]. Uredbom se utvrđuju zahtjevi za ekološki dizajn kućanskih perilica rublja, kao i onih koje su prodane za korištenje izvan kućanstava. Uredbom je propisano da tehničke i izvedbene karakteristike perilica rublja na tržištu kao što su kapacitet, potrošnja energije, vode i buka moraju biti deklarirane od strane proizvođača. Zbog prognoza o potrebi smanjivanja potrošnje vode u kućanstvima, ali i ostalih, za ekološku prihvatljivost važnih pokazatelja, postoji potreba za razvojem ekološki prihvatljivih proizvoda i proizvoda koji implementiraju inovativne tehnologije pranja i čišćenja rublja. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti takvih koncepata zahtijeva dugotrajne i skupe analize.

Među primjerima u ovoj doktorskoj disertaciji, koncepti pranja polimernim kuglicama, ultrazvučnog pranja, pranja ukapljenim ugljikovim dioksidom i čišćenja peletima suhog leda inovativni su obzirom na radne principe odstranjivanja nečistoća s rublja, te time valjani kandidati za provjeru predložene metode. Temeljem analize koncepata pranja rublja ustanovljeno je da je skup razmatranih koncepata odgovarajući u pogledu toga što sadrži

koncepte koji su varijantna rješenja sličnih koncepata proizvoda (koncepti pranja rublja A i B), ali i originalne (inovativne) koncepte (koncepti pranja rublja C, D i E).

*B) Koncepti stolnog sata-budilice*

Provjera predložene metode upotrebom primjera također je provedena za skup tri koncepta stolnog sata-budilice. Koncepti stolnog sata-budilice opisani su u radu Bernstein i drugih [50]. Učinkovitost metoda *LCA, LiDS-Wheel* [147] i *Function Impact Matrix* [52] u svrhu odabira koncepta za rekonstrukciju i razvoj ekološki prihvatljivog koncepta opisana je u studiji Bernstein i drugih [50].

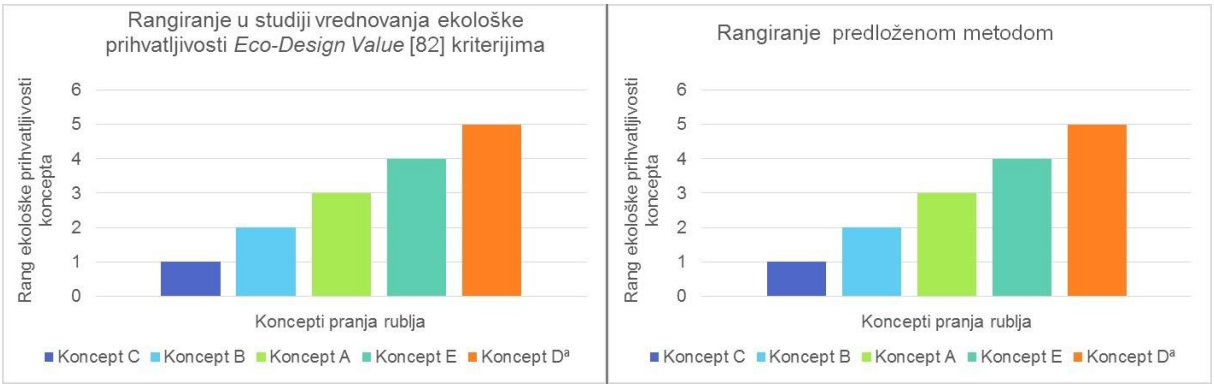
Metoda i postupak vrednovanja validirani su na dva primjera vrednovanja ekološke prihvatljivosti: vrednovanjem šest koncepata procesa pranja rublja i tri koncepta stolnog sata-budilice. Nakon primjene predložene metode indikativno je da je predložena metoda valjana potpora vrednovanju u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Primjena metode na primjerima potvrđuje da predložena metoda ispunjava namijenjenu svrhu u okviru unutarnje konzistentnosti.

Validaciju vanjske relevantnosti predložene metode čine sljedeća tri koraka:

*4.) Povrđivanje korisnosti metode upotrebom primjera*

Cilj ovoga koraka validacije je potvrđivanje koliko pojedini elementi metode i predložena metoda u cjelini zadovoljavaju namijenjenu svrhu u pogledu vanjske relevantnosti. Temeljem rezultata primjene predložene metode na skupu koncepata pranja rublja može se zaključiti da metoda zadovoljava namijenjenu svrhu.

Slika 6-2 prikazuje usporedbu rangiranja koncepata pranja rublja *Eco-Design Value* [82] kriterijima i rangiranja predloženom metodom. Rangiranje *Eco-Design Value* [82] kriterijima proveli su ispitanici u studiji vrednovanja ekološke prihvatljivosti ([63], [81]).




Slika 6-2. Usporedba rangiranja koncepata pranja rublja u studiji vrednovanja ([63], [81]) i predloženom metodom

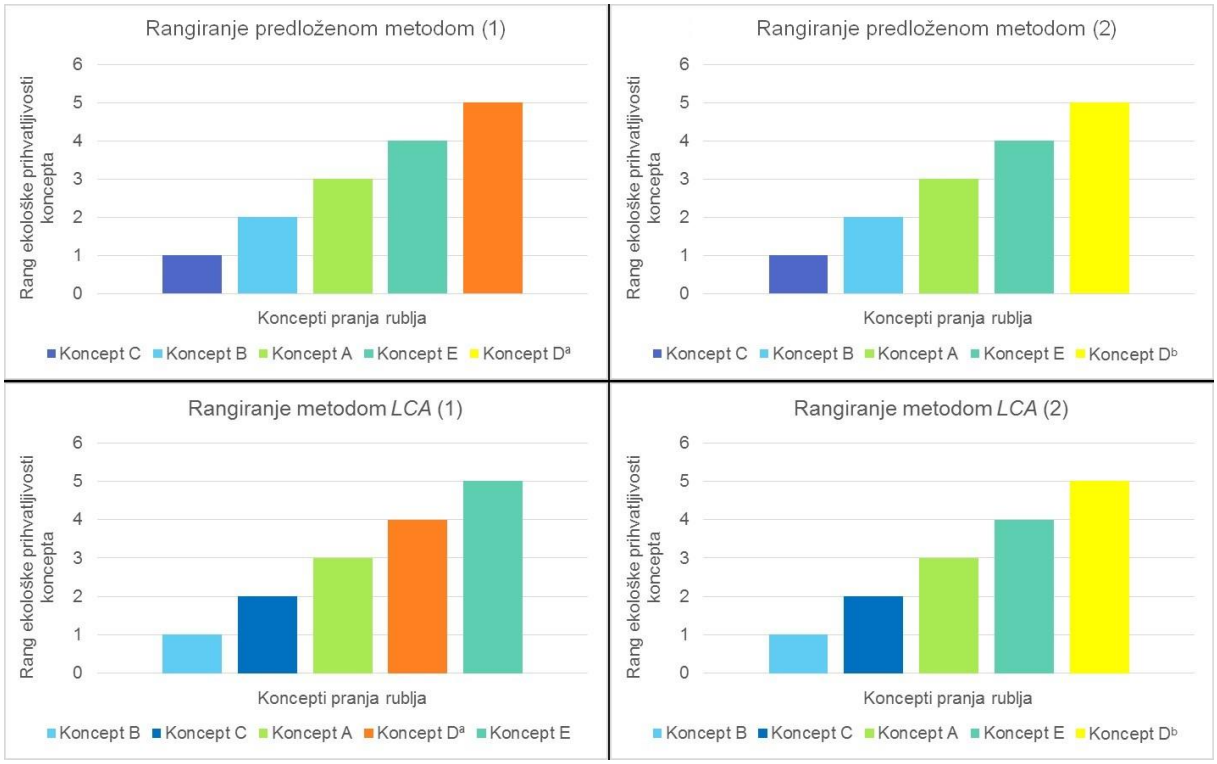
Koncept C ocijenjen je ekološki najprihvatljivijim koncept u usporedbi s ostalim konceptima u skupu vrednovanih koncepata (koncepti pranja rublja A, B, C, D[a] i E). Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u studiji ([63], [81]), rezultati vrednovanja predloženom metodom (Tablica 4-14, Tablica 4-16) i procjena životnog ciklusa koncepata (Slika 5-20) ukazuju da su koncepti pranja rublja B i C među ekološki najprihvatljivijim konceptima u skupu.

Prema rezultatima *LCA* koncepata (Slika 5-20), koncept B je ekološki prihvatljiviji od koncepta C, dok je koncept D[a] ekološki prihvatljiviji od koncepta E. Razlike u rezultatima rangiranja moguće je objasniti razlikama između kvalitativnog i kvantitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti (Slika 6-3).

Prema mišljenju ispitanika u studiji, koncepti pranja rublja C i D[a] nisu bili dostatno opisani u pogledu značajki, funkcija i karakteristika koncepata. Ispitanici nisu zabilježili pretpostavke o konceptima koje su donijeli tijekom vrednovanja koncepata. Predložena metoda zahtijeva da se pretpostavke o konceptima eksplicitno izraze tijekom generiranja lanaca efekata i sekundarnih efekata prema okolišu. Primjer je koncept pranja rublja C. Lanci efekata koncepta C (Slika 4-13) generirani su za poluautomatski uređaj kod kojega čovjek obavlja pozicioniranje za prihvat rublja, a uređaj dalje obavlja transport i pranje rublja.

Rezultati *LCA* skupa koncepata A, B, C, D[a] i E (1) ukazuju na zamjenu ranga koncepta E i koncepta D[a] (Slika 6-3: lijevo). *LCA* koncepta pranja rublja E otkriva da je 75% svih utjecaja na okoliš u životnom ciklusu koncepta uzrokovano utjecajem na okoliš polimernih kuglica

(Slika 5-18). Razlike u rangiranju predloženom metodom i rangiranju metodom *LCA* mogu se objasniti time što su uspoređeni rezultati vrednovanja kvalitativnom i kvantitativnom metodom. *LCA* metoda uzima u obzir kvantitativne podatke o konceptima i životni ciklus koncepata, dok kvalitativne metode kao što je predložena metoda ne uzimaju u obzir kvantitativne podatke o konceptima.




Slika 6-3. Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom i metodom *LCA*; lijevo: skup koncepata A, B, C, $D^a$ i E (1), desno: skup koncepata A, B, C, $D^b$ i E (2)

Vrednovanje mehaničkog, mehaničko-digitalnog i digitalnog sata-budilice predloženom metodom ukazuje da je koncept mehaničkog sata-budilice ekološki prihvatljiviji od ostala dva koncepta u vrednovanom skupu koncepata. U studiji koju su proveli Bernstein i drugi [50], konstruktori su odabrali koncept mehaničkog sata-budilice za rekonstrukciju i predlaganje novih rješenja, unatoč tomu što vrednovanje temeljem *LCA* metode ukazuje da je koncept digitalnog sata-budilice ekološki prihvatljiviji.

*5.) Potvrđivanje korisnosti primjene metode*

Provjera korisnosti primjene predložene metode temelji se na analizi studije u kojoj su ispitanici imali zadatak rangirati koncepte pranja rublja prema ekološkoj prihvatljivosti ([63], [81]). Iako su ispitanici vrednovali istih pet koncepata, zabilježene su razlike u dodijeljenim ocjenama na razini pojedinačnih *Eco-Design Value* [82] kriterija. Rezultati vrednovanja *Eco-Design Value* [82] kriterijima ukazuju da su neki od kriterija ekološke prihvatljivosti ispitanicima bili nerazumljivi ili im nisu bili od ranije poznati.

Nikander i drugi [372] proučavaju utjecaj eksplicitno propisanih i implicitno definiranih kriterija vrednovanja koncepata. Kada kriteriji nisu eksplicitno definirani, sudionici u eksperimentalnoj studiji [372] odstupali su od prethodno definiranih kriterija i nekonzistentno vrednovali koncepte oslanjajući se na *intuiciju* ([7], [11]). Obzirom da rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja u studiji [81] također ukazuju na nekonzistentnost vrednovanja kada kriteriji nisu bili propisani, predloženi kriteriji ekološke prihvatljivosti su eksplicitni i kao takvi implementirani u predloženom metodi.

Sljedivost zaključaka o rangiranju koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti ostvarena je na sljedeći način. Obzirom da predložena metoda omogućava vrednovanje prema svakom od ukupno pet kriterija ekološke prihvatljivosti i pregled dodijeljenih vrijednosti, korisnik metode ima uvid u korake vrednovanja. U matrici odlučivanja omogućen je uvid u dobrotu koncepata prema svakom od kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta. Time se omogućava usporedba radnih principa i sekundarnih efekata prema okolišu koncepata. Metode *LCA* [1], *Function Impact Matrix* [52], *LiDS-Wheel* [147], *Eco-Design Value* [82] i *Design for Environment* [170] smjernice ne omogućavaju takvu usporedbu.

Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti predloženom metodom može se provesti temeljem informacija o konceptima koje su dostupne u konceptualnoj fazi. Funkcijska struktura, analiza tokova energije, materijala i signala, te analiza fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu preduvjeti su za primjenu predložene metode. Analiza fizikalnih efekata i okvirno razmatranje sekundarnih efekata prema okolišu uobičajeno se povode u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava zbog čega nema prepreka provedbi detaljnije analize koncepata originalnog dizajna.

*6.) Razmatranje korisnosti metode u širem kontekstu*

Iako je preporuka da se s ciljem potvrđivanja korisnosti metode u širem kontekstu provede empirijsko istraživanje, implementacija metoda u razvojnim poduzećima je dugotrajan proces koji nije bilo moguće provesti u okvirima provedenog istraživanja. Predložena metoda namijenjena je vrednovanju novih koncepcijskih rješenja čiji je razvoj zahtjevniji od razvoja tehničkih sustava koji su inkrementalni ili adaptivni dizajn.

Suvremena razvojna poduzeća orijentiraju se na razvoj socio-tehničkih sustava koji su kompleksni tehnički sustavi i sustavi proizvoda i usluga. Zbog toga nije bilo moguće provesti validaciju metode koja je namijenjena isključivo tehničkim sustavima. Nadalje, ekološka prihvatljivost samo je jedan od brojnih kriterija vrednovanja, a po važnosti se ne smatra jednim od prioritetnijih za uspješnost poslovanja.

Iako su istraživači ([35], [50], [53], [199], [315]) proučavali povezanost ekološke prihvatljivosti (utjecaja na okoliš) i funkcija proizvoda, nisu uspjeli dovesti u vezu ekološku prihvatljivost s vrstom pretvorbi energije, materijala i signala, fizikalnim efektima i sekundarnim (latentnim) efektima prema okolišu.

Funkcije proizvoda opisuju proizvod na način da su poveznica između ciljeva (zadaća) koje proizvod ima ostvariti (tj. koje fizikalne efekte isporučiti) i strukture proizvoda [374]. Devanathan i drugi [52] demonstrirali su da je razmatranje funkcija proizvoda ključno u procesu donošenja odluka. U slučaju kada im nisu bili dostupni podaci o utjecajima na okoliš, a u izostanku ostalih, za vrednovanje ekološke prihvatljivosti važnih podataka o proizvodu, konstruktori su donosili sudove i odluke temeljem prijašnjih iskustva, nastojeći zadovoljiti zahtjeve ekološke prihvatljivosti.

Rezultati koji su dobiveni metodom su korisni obzirom na svrhu metode što je moguće demonstrirati preko pokazatelja učinkovitosti metoda kao što su kvaliteta rezultata, optimalni troškovi ili smanjenje troškova implementacije, odnosno troškova uslijed korištenja metode, te optimalno vrijeme ili smanjivanje vremena potrebnog za obavljanje aktivnosti vrednovanja i odlučivanja o ekološkoj prihvatljivosti koncepata drugom ili referentnom metodom. Tablica 6-2 prikazuje vrednovanje kvalitete odlučivanja temeljem pokazatelja kvalitete odlučivanja [293].

Tablica 6-2. Provjera vanjske relevantnosti predložene metode temeljem kvalitete odlučivanja

| Br. | Pokazatelji kvalitete odlučivanja [293] | Vrednovanje |
|---|---|---|
| 1. | Izbor najprihvatljivije opcije (ekološki najprihvatljivije) | •• |
| 2. | Prikupljanje informacija i istraživanje skupa mogućih rješenja | ••• |
| 3. | Identificiranje kritičnih parametara i karakteristika vrednovanih rješenja | • |
| 4. | Validacija (potvrda) odabiru rješenja i eliminaciji drugih rješenja | ••• |
| 5. | Potvrda donesenih odluka i konačne odluke u cilju odlučivanja | •• |

Stupanj zadovoljenja kvalitete odlučivanja: • - nizak, •• - srednji, ••• - visok.

Rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja semi-kvantitativnom metodom temeljenom na *Eco-Design Value* smjernicama [82], *LCA* metodom i predloženom metodom ukazuju na konzistentno razlikovanje ekološki prihvatljivih od ekološki neprihvatljivih koncepata.

Rodriguez Moreno i drugi [375] analizirali su vrijeme potrebno za analizu funkcija proizvoda za potrebe funkcijske dekompozicije i procjene životnog ciklusa proizvoda. Prosječno trajanje procesa analize funkcija proizvoda je nekoliko dana, dok primjena metode procjene životnog ciklusa proizvoda zahtijeva nekoliko mjeseci. Analiza funkcija proizvoda, tokova energije, materijala i signala, te sekundarnih efekata prema okolišu nužni su preduvjet za primjenu metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti, te stoga određuju razinu znanja potrebnu za primjenu metode i vrijeme potrebno za primjenu metode.

Učinkovitost predložene metode prema pokazatelju vremena potrebnog za primjenu metode i generiranje rezultata slična je učinkovitosti ostalih metoda vrednovanja namijenjenih konceptualnoj fazi. Vrijeme potrebno za primjenu metode (npr. *LiDS-Wheel* [147] ili [61]) značajno ovisi o količini iskustva rada s metodom i da li je prethodno provedena detaljna analiza koncepcijskih rješenja. Prema pokazatelju znanja potrebnog za primjenu metode, predložena metoda zahtijeva ekspertno znanje korisnika (o konceptima, radnim principima, načinu generiranja lanaca fizikalnih efekata, sekundarnim efektima prema okolišu, dodjeljivanju faktora transformabilnosti, itd.).

Vrednovanje prema predloženim kriterijima ekološke prihvatljivosti ne zahtijeva dodatne troškove prikupljanja informacija ili računalom podržanog softvera. Za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti eko-efektivnost pretvorbe energije i signala potrebno je vrednovanje provesti prema Tablici 4-6, a za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu prema Tablici 4-8.

Procijenjeno prosječno vrijeme za primjenu metode stoga iznosi od nekoliko dana za koncepte sa zadovoljavajućom razinom razrade (poznati radni principi, lanci efekata i sekundarni efekti prema okolišu) do nekoliko tjedana za koncepte kod kojih je potrebno provesti dodatno prikupljanje podataka, analizu konkurentskih proizvoda i proučavanje tehnologije i tehničkih procesa koncepata.

U radu Bernstein i drugih [50] konstruktori su trebali izvršiti rekonstrukciju stolnog sata-budilice. U studiji redom su trebali to učiniti: 1) bez pomoći ikakvih ekodizajn alata, 2) koristeći *LiDS-Wheel* [147] i ekodizajn listu kriterija ekološke prihvatljivosti, 3) uz pomoć podataka iz procjene utjecaja na okoliš (*LCA*) i 4) koristeći *Function Impact Matrix* metodu [52]. Preko upitnika koji su ispunili konstruktori koji su sudjelovali u studiji, Bernstein i drugi [50] zaključili su da su ispitanici najvišim ocjenama ocijenili *FIM* metodu [52] u usporedbi sa ostalim načinima provođenja rekonstrukcije i traženja optimalnih rješenja. Kriteriji vrednovanja metoda prema kojima su ispitanici studije ocijenili ponuđene im metode za potporu rekonstrukciji su: jednostavnost metode, kvaliteta podataka, mogućnost identificiranja rješenja za rekonstrukciju i ukupna efektivnost metode.

U studiji Bernstein i drugih [50] konstruktori su za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata odabrali kombinaciju metoda *LiDS-Wheel* [147] i *FIM* [52]. U slučaju kad su koristili samo podatke o utjecajima na okoliš koncepata kako bi rekonstruirali stolni sat-budilicu, generiranje ekološki prihvatljivijeg koncepta je bilo otežano. Razlog je način prikazivanja podataka o utjecajima na okoliš. Naime, veze između pojedinih komponenata proizvoda i utjecaja na okoliš nisu neovisne od funkcija koje ostvaruju. Tako primjerice, zamjena mehaničkih komponenata elektroničkima zahtjeva uvođenje novih elektroničkih komponenata, što znači dodavanje novih funkcija proizvoda. Time dolazi do novih ili konstruktorima još nepoznatih utjecaja na okoliš. Konstruktori su zapazili da zamjena komponenata takvog tipa

(uvođenje novih parcijalnih funkcija) zahtjeva kompromise koje bi trebalo napraviti za potrebe rekonstrukcije.

Zbog povećanja podataka uslijed dodavanja novih komponenata, konstruktori nisu mogli generirati novi koncept proizvoda na zadovoljavajući način. Konstruktori su stoga zaključili da je rekonstrukcija proizvoda temeljem isključivo *LCA* analize proizvoda manje efektivna potpora za rekonstrukciju proizvoda u usporedbi s drugim metodama koje su im bile ponuđene [50].

*FIM* metoda [50] se pokazala efektivna za rekonstrukciju i predlaganje novih rješenja za rekonstrukciju jer omogućava vrednovanje glavnih i sporednih funkcija proizvoda. No, ograničenje *FIM* metode [52] je što je za primjenu metode nužna procjena utjecaja na okoliš koncepata koji se vrednuju, dok za primjenu predložene metode *LCA* analiza nije nužna.

## 6.3. Rasprava ograničenja predložene metode

Vrednovanje prema kriterijima definiranim u okviru prikazanog istraživanja pretpostavlja analizu pretvorbi energije, materijala i signala, identificiranje sekundarnih efekata prema okolišu koncepata, te dodjeljivanje ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efekatima prema okolišu. Primjenom predložene metode na primjerima ustanovljena su i ograničenja metode.

U konceptualnoj fazi konstruktori se suočavaju s problemom nedostatka informacija o razmatranim konceptima. Kako u razvoju proizvoda ne postoji propisana detaljnost i razina razrade koncepata, konstruktori se često moraju dodatno upoznati s konceptima i radnim principima koncepata koje vrednuju. Prikupljanje informacija o konceptima provodi se analizom tržišta, konkurencije, zahtjeva korisnika, analizom već postojećih proizvoda na tržištu (referentnih proizvoda), te patenata. Nabrojane aktivnosti i pristup resursima mogu generirati dodatne troškove za poduzeće.

Predložena metoda zahtjeva dodatnu analizu koncepata, te upoznavanje konstruktora s metodama i tehnikama generiranja lanaca fizikalnih efekata. Srinivasan i drugi [376] primijetili su da je definiranje fizikalnih efekata i lanaca efekata zadatak koji konstruktorima predstavlja

izazov ako nemaju iskustva s takvom analizom koncepata proizvoda. Predložena metoda zahtjeva analizu fizikalnih efekata i definiranje lanaca efekata do razine detaljnosti gdje su definirane transformacije energije, materijala i signala, a koje podrazumijevaju promjene oblika energije i signala, te promjene agregatnog stanja materijala.

Konstruktori često nisu dovoljno dobro upoznati s načinom generiranja lanaca fizikalnih efekata, kako identificirati fizikalne efekte ili odabrati fizikalne efekte iz kataloga, te im je stoga potrebna dodatna obuka i pristup literaturi. Konstruktori mogu učiti iz postojećih primjera, te uz pomoć objavljenih kataloga efekata [298], [314] ili tražilica efekata dostupnih na internetu. Nabrojane aktivnosti i resursi mogu generirati dodatne troškove za poduzeće.

Tijekom primjene predložene metode konstruktori također definiraju sekundarne efekte prema okolišu. Postupak identifikacije sekundarnih efekata prema okolišu koncepata može zahtijevati ponovno razmatranje transformacija u tehničkom procesu, analizu modela funkcija prema toku energije, materijala i signala, zatim radnih principa i fizikalnih efekata karakterističnih za razmatrane koncepte.

Postupak dodjeljivanja ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima, iako je potpomognut tablicom za dodjeljivanje dobrote, nije imun na nekonzistentno dodjeljivanje ocjena od strane konstruktora. Primjerice, sekundarni efekt prema okolišu jednog koncepta konstruktor može ocijeniti visokom ocjenom, a isti sekundarni efekt prema okolišu kod drugog koncepta može ocijeniti niskom ocjenom. Vjerojatnost nekonzistentnog vrednovanja to je veća što konstruktor ima vrednovati više koncepata. To je stoga što konstruktor može „zaboraviti" zašto je određenom sekundarnom efektu prema okolišu jednog koncepta dodijelio upravo određenu ocjenu, a kad se suoči s istim sekundarnim efektom prema okolišu drugog koncepta, neće prepoznati da se radi o sekundarnom efektu prema okolišu iste dobrote.

Mogućnost nekonzistentnog vrednovanja sekundarnih efekata prema okolišu postoji unatoč tomu što konstruktor zapisuje dodijeljene ocjene u pomoćnu tablicu svakog koncepta. Preporuka konstruktorima je da po završetku dodjeljivanja ocjena konceptima koje vrednuju i rangiraju, provjere da li su konzistentno vrednovali iste ili slične sekundarne efekte prema okolišu.

Inženjeri koji sudjeluju u procesu konstruiranja i razvoja proizvoda donose odluke temeljem stečenih vještina, znanja i iskustava, ali pritom nisu nužno i objektivni. Ponekad konstruktori ne surađuju direktno sa korisnicima i kupcima, nego preko većih organizacija ili timova, što također može biti razlog tomu da konstruktori nemaju potrebne informacije o potrebama i zahtjevima korisnika. Zahtjevi i specifikacije često do tima dolaze preko odjela u poduzeću kao što su odjel prodaje ili marketinga. Najkompleksniji oblici ovih interakcija identificirani su u vanjskim lancima (mrežama) nabave u kojima surađuju stručnjaci iz različitih područja, kompetencija, te kultura [93]. Proces konstruiranja je i socio-tehnički proces, te je stoga često uvjetovan subjektivnim preferencijama inženjera koji sudjeluju u aktivnostima vrednovanja koncepata i proizvoda.

Kod koncepata s većim brojem transformacija energije, materijala i signala, te time i većem broju funkcija, fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu, predložena metoda zahtjeva više vremena kako bi se došlo do konačnog rezultata koji govori o relativnom rangu koncepata u razmatranom skupu. Pomak prema razvoju efikasnije metode mogao bi se postići razvojem računalne potpore predloženoj metodi, no potrebno je dodatno istraživanje mogućnosti i dosega takve računalne potpore.

Proces odlučivanja o konceptu iz skupa koncepata za daljnju razradu temelji se na razmatranju karakteristika koncepata temeljem vrednovanja obzirom na zahtjeve ili kriterije vrednovanja. Kriterije i relativnu važnost kriterija vrednovanja definira poduzeće, menadžment i razvojni tim. Radi se o internoj odluci poduzeća. Odluka o tome koji kriteriji će biti uzeti u obzir prilikom odlučivanja o konceptu i kako će vrednovanje prema pojedinom kriteriju utjecati na konačnu ocjenu kvalitete koncepta specifična je za ciljano tržište, proizvod, sektor poduzeća, korisnike, potrebe korisnika, i druge specifičnosti projekta i poduzeća kao što su primjerice vizija poduzeća ili marketinška strategija proizvoda, te se ne mogu generalizirati i ukalupiti u metodu.

U provedenom istraživanju nije propitivana kvaliteta koncepata obzirom na funkcionalne zahtjeve i kriterije vrednovanja koncepata kao što su kvaliteta zadovoljenja potreba korisnika, troškovi, rizici, sukladnost s normama i legislativom, proizvodni postupci i dr. Iako je uobičajeno da se pri odlučivanju o konceptu za daljnju razradu i realizaciju u finalan proizvod, koncept vrednuje prema svim, za poduzeće i proizvod relevantnim zahtjevima i

kriterijima, odluka o konceptu je specifična za pojedino poduzeće i razvojni projekt. To znači da koncept koji je ocijenjen maksimalnim ocjenama prema kriterijima ekološke prihvatljivosti ne mora nužno biti odabran za daljnji razvoj i razradu.

Iako relativna važnost kriterija ekološke prihvatljivosti obzirom na ostale kriterije vrednovanja koncepta može biti izražena kvantitativno kako bi se realiziralo odlučivanje pri više-kriterijskom vrednovanju (npr. metodom *Analitičkog hijerarhijskog procesa – AHP* [109]), zaključak istraživanja je da relativnu važnost kriterija vrednovanja koncepta nije uputno generalizirati. Važnosti pojedinih kriterija vrednovanja pri odlučivanju o konceptu za daljnju razradu specifične su za pojedino poduzeće, proizvod, projekt, tržišni segment i potrebe korisnika.

## 6.4. Smjernice za verifikaciju istraživanja i primjenu predložene metode u praksi

Prilikom vrednovanja koncepcijskih rješenja tehničkih sustava uobičajeno je uzeti u obzir kriterije vrednovanja, te ustanoviti relativnu važnost kriterija vrednovanja, a primjerice na temelju važnosti zahtjeva korisnika. Odlučivanje o konceptu ili konceptima za daljnju razradu temelji se na vrednovanju prema kategorijama kriterija kao što su potrebe korisnika, troškovi, rizici, zakonske regulative i norme, estetika i dizajn, te mnoge druge kategorije. Proces definiranja kategorija kriterija vrednovanja koncepcijskih rješenja specifičan je za određeno poduzeće, sektor, proizvod, tržište ili korisnike.

Vrednovanje kriterijima u cilju odlučivanja tijekom razvoja proizvoda može se također temeljiti na analizama, procjenama i prijašnjem iskustvu konstruktora i dionika u razvojnom procesu. Primjerice, troškovi životnog ciklusa koncepta mogu se procijeniti temeljem analize i procjene troškova životnog ciklusa nekog prijašnjeg proizvoda ili projekta, a vrednovanje obzirom na rizike može se temeljiti na procjeni rizika i usporedbi s primjerice ranije uvaženim normama i standardima praćenja projekata poduzeća. Zahtjevi i informacije iz prošlih projekata poduzeća, te analize proizvoda konkurencije temelj su mnogih metoda koje su po vrsti procjene, bilo da se radi o procjeni rizika, troškova ili utjecaja na okoliš.

U pravilu ne postoje znanstveno utemeljeni razlozi zbog kojih bi određeni kriteriji imali prevagu nad ostalima, te ne postoje metode kojima bi se utvrdio faktor važnosti, a time i funkcija agregiranja kvalitativnih i kvantitativnih parcijalnih ocjena radi dobivanja ukupne vrijednosti ekološke prihvatljivosti koncepta ili proizvoda. Byggeth i Hochschorner [46] smatraju da je dodjeljivanje kvantitativne vrijednosti kako bi se ocijenio proizvod prema nekom od kriterija, nužno učiniti vodeći se smjernicama ili drugim sofisticiranijim metodama za dodjeljivanje kvantitativne ocjene kvalitativnom kriteriju. Metodu za određivanje težinskih faktora važnosti kriterijima ekološke prihvatljivosti u cilju dodjeljivanja jedinstvene ocjene ekološke prihvatljivosti rješenju proizvoda, potrebno je eksplicitno odrediti prije donošenja odluke o konceptu, no osim oslanjanja na prijašnja iskustva i prošle projekte, nema smjernica za njihovo određivanje.

Zbog ograničenja metode, predloženu metodu uputno je kombinirati s metodama kojima je moguće vrednovati koncept obzirom na ostale, za odabir koncepta važne kriterije (npr. *QFD* [47]), s metodama koje propisuju analizu životnog ciklusa koncepta (npr. *ERPA* [20], *MET* [147], *LiDS-Wheel* [147], *MECO* [179]) ili kvantitativno vrednovanje utjecaja na okoliš (npr. *Function Impact Matrix* [52] i metode za aproksimaciju utjecaja na okoliš [18], [59], [62], [198], [201], [203], [214]).

*QFD* metoda [47] je primjer metode koja je vrlo dobro prihvaćena u praksi, te su razvijene brojne inačice metode ([53], [188], [189], [190], [191]). *QFD* metoda propisuje analizu zahtjeva korisnika i kriterija vrednovanja koncepata kroz sve kategorije kriterija vrednovanja (funkcionalne zahtjeve, troškove, rizike, ekološku prihvatljivost, itd.), te određivanje apsolutne i relativne važnost kriterija vrednovanja. *QFD* stoga pruža odgovarajući metodološki okvir za kombiniranje predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti i kriterija vrednovanja koncepata temeljenih na zahtjevima korisnika radi kvalitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Proces uvođenja i integracije metoda u razvojni proces poduzeća uobičajeno se provodi prema metodologiji. Za verifikaciju predložene metode preporuća se pratiti metodologiju Knighta i Jenkinsa [139]. Metodologija je namijenjena implementaciji ekodizajn metoda u poduzećima, a propisuje i vrednovanje predložene metode obzirom na realni razvojni proces i zahtjeve menadžmenta poduzeća.

# 7. ZAKLJUČAK

*U zaključku doktorskog rada dano je objašnjenje rezultata istraživanja te rasprava istraživanja koja uključuje obrazloženje odgovora istraživačkih pitanja. U okviru provedenog istraživanja predloženi su kriteriji ekološke prihvatljivosti i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Objašnjena su ograničenja predložene metode i znanstveni doprinosi provedenog istraživanja. Poglavlje završava smjernicama za buduća istraživanja.*

## 7.1. Rasprava i rezultati istraživanja

U okviru provedenog istraživanja predložena je nova metoda vrednovanja koja se temelji na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti. Kriteriji ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja su: eko-efektivnost pretvorbi energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu, broj sekundarnih efekata prema okolišu i broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu. Vrednovanje predloženom metodom je ne-hijerarhijsko više-kriterijsko vrednovanje i rangiranje koncepata tehnikom sume rangova.

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda namijenjeni su konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Zbog toga što se vrednovanje predloženom metodom temelji na vrednovanju značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu,

predlaže se naziv nove metode – *Eko-transformabilnost*. Prijedlog naziva nove metode inspiriran je kriterijem eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala koji se temelji na razmatranju solarne transformabilnosti oblika energije [243] i vrednovanju transformacija pretvorbi energije i signala prema hijerarhiji oblika energije [70].

Istraživanjem prikazanom u ovom doktorskom radu odgovoreno je na tri istraživačka pitanja:

1.) Koja su ograničenja postojećih metoda i alata vrednovanja ekološke prihvatljivosti i njihove primjene u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti uobičajeno se provodi temeljem analize životnog ciklusa i procjene utjecaja proizvoda na okoliš [1], nakon konstrukcijske razrade [2]. Tek se konstrukcijskom razradom određuju značajke proizvoda potrebne za kvantitativno vrednovanje utjecaja proizvoda na okoliš [3], [7].

Metode i alati koji se koriste za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata u konceptualnoj fazi zahtijevaju informacije o proizvodu koje su dostupne tek u fazi konstrukcijske razrade proizvoda. Te informacije su primjerice tehnološki postupci izrade, specifikacija materijala proizvoda, značajke oblika i dimenzijske značajke proizvoda. Odluku o izboru ekološki neprihvatljivog koncepcijskog rješenja proizvoda i rješenja koje je neprihvatljivo u pogledu troškova nije jednostavno ispraviti u poodmakloj fazi konstrukcijske razrade [14].

Koncepcijska rješenja koja su razmatrana prilikom izbora koncepta koji će biti kandidat za daljnju konstrukcijsku razradu i razvoj uobičajeno su osmišljena temeljem iskustva, intuicije i pretpostavkama konstruktora o kvaliteti, troškovima i utjecajima na okoliš. Analize karakteristika i učinkovitosti koncepcijskih rješenja po tim pitanjima su provedene temeljem jednostavnih metoda procjene, a zbog ograničenja nedostatka podataka o proizvodu, životnom vijeku i potrošnji materijala i energije [378]. Kao rezultat takvog kvalitativnog opisa koncepcijskih rješenja, odluka o konceptu za daljnju razradu je često slabo potkrijepljena i temelji se na pretpostavkama o konceptima, odnosno na subjektivnim doživljajima i percepciji kvalitete razmatranih koncepata. Prilikom razmatranja ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata, pristranost konstruktora može biti odlučujuća zbog ograničenog iskustva i znanja

koji konstruktori imaju o ekodizajnu, metodama konstruiranja za okoliš i metodama projektiranja za životni ciklus proizvoda [378].

Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda (ekodizajn) započinje generiranjem liste zahtjeva, te u fazi planiranja koja prethodi konceptualnoj fazi konstruiranja [120]. Razmatranje ekološke prihvatljivosti proizvoda uputno je provesti tijekom svake faze razvojnog procesa ne postoje eksplicitne upute za provedbu vrednovanja ekološke prihvatljivosti [32].

Klasifikacija alata za konceptualnu fazu kod Gómez Navarro i drugih [274] uključuje: alate za treniranje ekodizajna za konstruktore, alate za razvoj računalnog modela proizvoda u interaktivnom okruženju koji omogućavaju suradnju konstruktora i ekodizajn stručnjaka, *CAD* računalne alate, ISO 14062 smjernice [99], [120], te alate za oblikovanje i konstrukcijsku razradu (smjernice za rastavljanje proizvoda, modularno oblikovanje, recikliranje, ponovnu proizvodnju, oporabu i dr.). Gómez Navarro i drugi [274] niti jedan od alata koje su analizirali nisu kategorizirali kao alat za procjenu utjecaja na okoliš za konceptualnu fazu procesa konstruiranja. Analizirane alate, Gómez Navarro i drugi [274] smatraju veoma pogodnim za provođenje rekonstrukcija proizvoda, no ne i za projekte s ambicioznijim ciljevima smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš putem dematerijalizacije (ostvarivanje željene funkcionalnosti proizvoda putem usluga), novih tehnologija (npr. izum tranzistora) ili korištenjem obnovljivih izvora energije (npr. solarne energije) [130].

Metode kao što je *ERPA* matrica [20] nije primjenjiva za vrednovanje više koncepata proizvoda odjednom [54]. *Ecodesign PILOT* [141] također nije namijenjen za vrednovanje i usporedbu ekološke prihvatljivosti više koncepata. *ERPA* [20] i *MECO* [179] matrice služe kao priprema za opsežniju analizu životnog ciklusa proizvoda [54]. Studija Bernstein i drugih [50] pokazala je da vrednovanje *LiDS-Wheel* metodom [147] pokazuje slične rezultate vrednovanja za različite proizvode, odnosno da je ekološka prihvatljivost proizvoda slična.

Većina metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda namijenjene su primjeni u trenutku procesa konstruiranja i razvoja u kojem su dobro poznate ključne značajke proizvoda kao što su geometrijske značajke, materijali, tehnološki postupci proizvodnje i tolerancije. U trenutku kada su razvijena preliminarna rješenja proizvoda u fazi oblikovanja, upravo je nedostatak detaljnih specifikacija proizvoda uzrok teškoćama prilikom izbora i vrednovanja

rješenja. Iako postoji veliki potencijal za optimizaciju preliminarnih oblikovnih rješenja proizvoda u tom trenutku, nemogućnost da se varijante vrednuju, vodi do porasta troškova razvoja [379].

Odlučivanje o konceptu koji će biti izabran za daljnje unapređivanje i razradu, smatra se jednom od aktivnosti ključnih za uspješno odvijanje procesa razvoja. Uspjeh proizvoda na tržištu, funkcionalnost, kvaliteta i troškovi ovise o odlukama donesenim tijekom konceptualne faze; odlukama o zahtjevima, konceptu, funkcijama i specifikacijama rješenja odabranog za daljnju razradu.

U konceptualnoj fazi poželjno je generirati više koncepata, jer se smatra da se time povećava vjerojatnost pronalaska najboljeg, odnosno odgovarajućeg koncepta proizvoda [110]. Što je manje izmjena u kasnijim fazama razvoja, veća je vjerojatnost uspješnog završetka procesa razvoja [104]. Prilikom vrednovanja koncepata, konstruktori mogu bolje razumjeti koji koncepti su bolji i zašto, čime je i veća vjerojatnost izbora potencijalno najboljih rješenja [110].

U konceptualnoj fazi potrebno je generirati što više rješenja, no odmah izuzeti najnepovoljnija rješenja, kako se resursi ne bi trošili na razvoj rješenja koja se ne mogu unaprijediti i poboljšati [72], [377]. Stoga se nakon definiranja specifikacija i funkcionalnih zahtjeva na temelju kojih se vrši vrednovanje i odabir najboljih rješenja ili generiraju novi koncepti, nastoji smanjiti broj koncepata koji se razmatraju i dalje vrednuju [7]. Specifikacije i ključne značajke proizvoda često nužno moraju biti donesene najkasnije u konceptualnoj fazi, kako bi se proces konstruiranja uspješno primaknuo prema konstrukcijskoj razradi, završnom detaljiranju i pripremi proizvodnje, te zadovoljili rokovi isporuke proizvoda.

Postoji široki spektar metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta proizvoda [60], no one se koriste u slučaju kada su koncepti nastali rekonstrukcijom referentnih proizvoda s već poznatim utjecajima na okoliš zbog čega je utjecaje na okoliš novih koncepata moguće aproksimirati. No, metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koje se koriste u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda pokazale su se nedovoljno efikasne i efektivne za vrednovanje i usporedbu originalnih koncepata proizvoda.

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti valja provoditi u svim fazama razvoja, pa i u konceptualnoj fazi, a razmatranje ekološke prihvatljivosti može biti važno i za razvoj novih i

inovativnih proizvoda, ali i eko-inovacija [15]. Važno je rano u procesu razvoja identificirati ekološki neprihvatljive koncepte kako bi se izuzeli iz daljnjeg razmatranja. Izbor neadekvatnog koncepta rijetko se može nadomjestiti ili ispraviti u kasnijim fazama razvoja [72].

Pregledom literature zaključeno je da postoji potreba za razmatranjem ekološke prihvatljivosti proizvoda u ranim fazama razvoja, kako bi se iskoristio potencijal za ranim definiranjem ekološki prihvatljivih rješenja. Preduvjeti za primjenu metode procjene životnog ciklusa proizvoda su ograničavajuće u pogledu primjene ove metode u svrhu vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. Prema tome, *LCA* se može okarakterizirati kao metoda koja se primjenjuje retroaktivno radi provjere ekološke prihvatljivosti proizvoda u fazi konstrukcijske razrade [372].

Specifično za *LCA* je da je za provedbu ove metode potreban u cijelosti definiran proizvod i njegov životni ciklus. Taj preduvjet za provedbu *LCA* može se smatrati ograničavajućim u pogledu provedbe ove metode u konceptualnoj fazi razvoja [372]. U studiji Collado-Ruiz i Ostad-Ghorabi [37], kada su se konstruktori služili samo rezultatima procjene životnog ciklusa referentnih proizvoda, ideje koje su generirali, odnosile su se na rekonstrukciju referentnog proizvoda. Rješenja koja su ponudili nisu bila inovativna ili novi koncepti, te su Collado-Ruiz i Ostad-Ghorabi zaključili da način na koji su predstavljene informacije i rezultati procjene životnog ciklusa može utjecati na to da li će novo-generirane ideje biti inovativne ili ne.

*LCA* se ne odnosi na usporedbu i vrednovanje sustava proizvod-usluge, interakciju korisnika s proizvodom ili okruženja u kojem proizvod egzistira, nego samo na proizvod u 'izolaciji' [372]. *LCA* je moguće primijeniti za usporedbu proizvoda samo kada se radi o sličnim proizvodima. Tomu vodi posljedica da su proizvodi koji su poboljšani u pogledu njihove ekološke prihvatljivosti rezultat inkrementalnog poboljšavanja i rekonstrukcije, a ne inovativni i novi proizvodi.

Postavlja se pitanje kada točno u procesu konstruiranja primijeniti metodu procjene životnog ciklusa. Izbor materijala za izradu komponenata veoma utječe na ekološku prihvatljivost proizvoda i utjecaje na okoliš, no također se ne smije izostaviti ni izbor tehnoloških postupaka proizvodnje [206]. Geometrijske značajke definiraju se nakon radnih

principa proizvoda [377]. Može se zaključiti da je izbor materijala za izradu komponenata proizvoda uvjetovan zahtjevima za oblikovanje koji su u konačnici određeni tek nakon u što su u potpunosti definirana sva principijelna rješenja i struktura proizvoda (Slika 2-2).

2.) Koji su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se mogu koristiti pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Pregledom literature o ekodizajn metodama i alatima potvrđena je potreba za definiranjem kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi bili specifično namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda). Subjektivna interpretacija ekološki neprihvatljivog koncepta kao prihvatljivog može u konačnici rezultirati izborom ekološki neprihvatljivog koncepta za daljnju razradu i detaljiranje, te time dodatnih troškova i kašnjenja razvojnog procesa.

Moguća negativna posljedica ovakvog ishoda vrednovanja je nemogućnost postizanja konsenzusa oko ekološki prihvatljivih i neprihvatljivih koncepcijskih rješenja. Temeljem rezultata studije slučaja zaključeno je da su odstupanja individualnog vrednovanja (od ispitanika do ispitanika) bila manja kada su se ispitanici pri vrednovanju služili kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti u obliku *Eco-Design Value* smjernica [82].

Zbog nedostatka podataka o potrošnji energije i materijala, te životnom ciklusu proizvoda u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, identificirana su ograničenja primjene ekodizajn metoda i alata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Analizom rezultata studije slučaja ([63], [81]), ustanovljena je potreba za definiranjem kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi bili specifično namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja generiranih u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda).

U ovom istraživanju kriteriji ekološke prihvatljivosti definirani su temeljem smjernica za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda ([71], [72]). Pahl i drugi [72] predložili su smjernice za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda prilikom definiranja funkcija proizvoda. Ustanovili su da je potrebno uzeti u obzir promjene oblika energije i promjene agregatnog stanja materijala, te da ih je potrebno biti što manje za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda. Generiranje varijantnih i inovativnih proizvoda može se

temeljiti na razmatranju različitih fizikalnih efekata i radnih principa kojima se ostvaruju funkcije proizvoda [72].

Obzirom da u literaturi nisu pronađeni formalno definirani kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, smjernice Pahla i drugih [72] o razvoju ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda te razvoju varijantnih i inovativnih rješenja poslužile su kao orijentir za definiranje kriterija ekološke prihvatljivosti.

Istraživanjem je predloženo pet kriterija ekološke prihvatljivosti [71]. Kriterij eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala temelji se na izračunu faktora solarne transformabilnosti oblika energije [69]. Faktori solarne transformabilnosti oblika energije izvedeni su iz tzv. hijerarhije oblika energije [70], [243]. Vrednovanje prema kriteriju eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala provodi se temeljem izračuna faktora transformabilnosti pretvorbi oblika energije iz jednog oblika u drugi (Tablica 4-6). Pozitivno se vrednuju pretvorbe koje su u smjeru maksimiziranja efektivnosti pretvorbi, odnosno pretvorbi oblika energije niže kvalitete u oblike energije više kvalitete.

Drugi po redu kriterij ekološke prihvatljivosti je broj pretvorbi energije i signala [71]. Ovaj kriterij formalno je kriterij kojeg su predložili Pahl i drugi [72]. Naime, iako zbroj teorijskih eko-efektivnosti pretvorbi energije i signala može upućivati na ekološki prihvatljiviji koncept, ekološki prihvatljiv koncept karakteriziraju što viša ukupna eko-efektivnost pretvorbi energije i signala (vrednovanje prema prvom kriteriju) i što manji broj pretvorbi energije i signala (vrednovanje prema drugom kriteriju).

Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu odnosi se na sekundarne (latentne) efekte prema okolišu koji mogu proizlaziti iz internih transformacija tehničkog sustava i omogućavati isporuku željenih efekata koje tehnički sustav ima za cilj ostvarivati ili iz tehničkog procesa i odabrane tehnologije [73]. Vrednovanje prema ovom kriteriju definirano je temeljem smjernica za vrednovanje toksičnosti emisija ili otpada [74], te smjernica za ekološki prihvatljivo gospodarenje otpadom [75], [76], [315]. Definirana je intervalna skala za ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti efekata prema okolišu. Vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu provodi se pomoću smjernica za ocjenjivanje (Tablica 4-8).

Četvrti kriterij ekološke prihvatljivosti je kriterij broj sekundarnih efekata prema okolišu [71]. Ekološki prihvatljiv koncept karakteriziraju visoka ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata prema okolišu (vrednovanje prema trećem kriteriju) i što manji broj sekundarnih efekata prema okolišu (vrednovanje prema četvrtom kriteriju).

Kriterij broja promjena agregatnog stanja materijala odnosi se na pretvorbe kod kojih postoji promjena agregatnog stanja materijala koji sudjeluje u pretvorbi. Promjena agregatnog stanja odvija se u specifičnim termodinamičkim uvjetima. Slijedno tomu, postoje posebni zahtjevi da značajke materijala komponenata proizvoda koje realiziraju s pretvorbom povezane funkcije, podržavaju pretvorbu agregatnog stanja materijala bez promjene svojstava. Prema Pahl i drugima [72], ekološki prihvatljivi koncepti su oni kod kojih ima najmanje takvih funkcija.

3.) Kako vrednovati ekološku prihvatljivost tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Prema Derelövu [292], vrednovanje koncepata dio je aktivnosti odlučivanja o najpovoljnijem konceptu. Samom vrednovanju prethodi prikupljanje informacija i analiza koncepata, a slijedi mu odlučivanje o najpovoljnijim konceptima ili eliminacija neprihvatljivih koncepata iz daljnje razrade (Slika 6-1). Metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava temelji se na vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti. Predložena metoda i kriteriji ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava čine glavne teorijske doprinose istraživanja prikazanog u ovoj doktorskoj disertaciji. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi se temeljem vrednovanja značajki transformacija operanada tehničkog procesa (prema [66]), odnosno uspoređivanjem kriterija ekološke prihvatljivosti sa značajkama svojstvenim konceptu tehničkog sustava. Vrednovanje prema svakom od pet kriterija ekološke prihvatljivosti provodi se temeljem funkcija dobrote (9) i (11), broju pretvorbi energije i signala, broju sekundarnih efekata prema okolišu i broju promjena agregatnog stanja materijala. Rangiranje koncepata provodi se temeljem metode suma rangova [91].

Validacija metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti povedena je temeljem metode *Validacijskog kvadrata* [72] kojom je provjerena unutarnja konzistentnost i vanjska

relevantnost predložene metode. Rezultati vrednovanja predloženom metodom uspoređeni su s rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja (studija slučaja) i rezultatima procjene životnog ciklusa – *LCA* [1]. Provjera empirijske učinkovitosti metode provedena je i temeljem usporedbe s rezultatima vrednovanja tri koncepta stolnog sata-budilice u radu Bernstein i drugih [50]. Rezultati validacije metode ukazuju na potvrdu hipoteze istraživanja da se kriteriji ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja tehničkih sustava mogu odrediti temeljem značajki transformacija operanada tehničkog procesa za određenu funkcijsku strukturu tehničkog sustava.

## 7.2. Obrazloženje znanstvenih doprinosa istraživanja

Zbog nedostatka informacija o značajkama konačnog rješenja proizvoda i njegovog životnog ciklusa, nedovoljno iskustva ili znanja o vrednovanju ekološke prihvatljivosti, kriterijima ekologičnosti, metodama vrednovanja ili manjku praktičnog iskustva u vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda, konstruktori mogu pribjeći subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti koncepata. Moguće negativne posljedice subjektivne interpretacije ekološke prihvatljivosti koncepata su izbor ekološki neprihvatljivog koncepta, te dodatni troškovi i kašnjenje razvojnog procesa.

Prvi razlog tomu je što izmjena koncepta u poodmaklim fazama razvoja zahtijeva dodatne troškove i odgodu planiranih aktivnosti radi implementacije izmjena na proizvodu, konceptu proizvoda, modelu proizvoda i životnom ciklusu proizvoda. Drugi razlog dodatnim troškovima i neželjenom kašnjenju procesa konstrukcijske razrade i time cjelokupnog razvojnog procesa je u tomu što koncepti koji nisu razmatrani obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti ili nisu optimalni izbor prema ovom kriteriju uzrokuju utjecaje na okoliš koje konstruktori nisu ranije predvidjeli.

Smanjivanje rizika neprimjerenih utjecaja na okoliš može zahtijevati dodatne troškove koji mogu biti troškovi procesa razvoja, proizvodni troškovi ili troškovi životnog ciklusa proizvoda. Stoga, izbor ekološki neprihvatljivog koncepta teško se može ispraviti u kasnijim fazama procesa konstruiranja, bez dodatnih troškova i kašnjenja procesa razvoja.

Kriterijima i predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti [85] daje se doprinos aktivnostima vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda) na način da se:

1.) Omogućava vrednovanje i usporedba ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja temeljem njihovih lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata prema okolišu,

2.) Smanjuje mogući neželjeni utjecaj subjektivnog tumačenja ekološke prihvatljivosti prilikom usporedbe više koncepata i odlučivanja o ekološki povoljnim i nepovoljnim karakteristikama koncepcijskih rješenja,

3.) Odgađa procjena utjecaja na okoliš do faze konstrukcijske razrade kada će biti dostupno više informacija o rješenju koje se razvija.

Teorijski doprinos istraživanja prikazanog u ovom doktorskom radu ostvaren je razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode [69] koji su specifično namijenjeni za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Teorija tehničkih sustava [64] poslužila je kao teorijski okvir za analizu vrednovanja utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Za rane faze procesa razvoja proizvoda karakterističan je nedostatak znanja o budućem proizvodu i njegovim karakteristikama ([5], [11]) što onemogućava vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda putem uobičajeno korištenih metoda kvantifikacije utjecaja proizvoda na okoliš. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata isključivo temeljem procjene životnog ciklusa nije u potpunosti primjenjivo u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda. Bez kvalitativnog vrednovanja potrošnje energije, emisija i otpada koji doprinose utjecajima na okoliš, vrednovanje ekološke prihvatljivosti svodi se na subjektivnu prosudbu kritičnosti ili relevantnosti procijenjenih utjecaja na okoliš od strane donositelja odluka. Razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti [69] ostvaren je teorijski doprinos razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda na način da je omogućeno kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi.

Znanstveni doprinos istraživanja opisanog u doktorskoj disertaciji također se očituje doprinosom metodologiji validacije kriterija ekološke prihvatljivosti [85]. Validacija unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti zahtijevala je definiranje adekvatnog primjera (skup koncepata pranja rublja) i razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi (predložena metoda).

Iako se *LCA* metoda smatra jedinom objektivnom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti, generalno nije primjerena za konceptualnu fazu razvoja proizvoda [315]. U preliminarnoj fazi istraživanja razmatrana je mogućnost primjene ekodizajn metoda za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata koji bi potom služili kao primjer na kojem će se propitivati predložena metoda. Ustanovljeno je da ekodizajn metode i alati nisu specifično namijenjeni generiranju ekološki prihvatljivih koncepata [380]. Tek nakon konceptualne faze, konstruktori pristupaju konstrukcijskoj razradi rješenja temeljem specifikacija proizvoda kojima se determiniraju karakteristike proizvoda. Po uzoru na prijedlog Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [37] da se ispitivanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda generiranih u konceptualnoj fazi razvoja provede *LCA* metodom, empirijski dio validacije vrednovanja predloženom metodom provedena je koristeći i *LCA* metodu [85].

Praktični doprinos provedenog istraživanja očituje se razvojem metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava [85]. Vrednovanjem i usporedbom ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja omogućena je analiza i razmatranje ekološke prihvatljivosti koncepcijskih rješenja proizvoda temeljem vrednovanja lanaca efekata i sekundarnih efekata prema okolišu koncepcijskih rješenja.

## 7.3. Smjernice budućih istraživanja

Novija istraživanja u području primjene ekodizajna u konceptualnoj fazi bave se razvojem računalne potpore za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata. U takvim sustavima informacije o proizvodima su pohranjene u bazi (repozitoriju) koju je moguće pretraživati i koristiti za računalom podržano generiranje novih koncepata proizvoda.

Oman i drugi [197] razvili su takav sustav kod kojega se u repozitoriju podataka nalaze funkcije i komponente proizvoda. Funkcijskom dekompozicijom identificirane su funkcije i

komponente postojećih proizvoda koji su okarakterizirani kao inovativni na neki način i pohranjeni u repozitorij. Oman i drugi [197] definiraju inovativne koncepte proizvoda kao realizaciju novih i originalnih ideja u obliku koncepata proizvoda. Inovativnost koncepata može biti inkrementalna ili radikalna, već ovisno o magnitudi poboljšanja kvalitete proizvoda ili inovativnosti tehnologije u odnosu na proizvode prisutne na tržištu. Obzirom da Oman i drugi ne razmatraju fizikalne efekte kojima se ostvaruju funkcije proizvoda pohranjenih u repozitorij, jedna od smjernica budućih istraživanja je generiranje novih koncepata temeljem lanaca efekata proizvoda iz repozitorija. Razmatranjem alternativnih lanaca efekata moguće je generirati nove funkcijske strukture ili načine ostvarivanja funkcija (radne principe).

Collado-Ruiz i Ostadt-Ahmad-Ghorabi [38] uvidjeli su praktičnost sustava za pohranu podataka o proizvodima, te su razvili potporu procjeni utjecaja na okoliš novih proizvoda, a na temelju utjecaja na okoliš sličnih proizvoda pohranjenih u repozitorij. Prednosti repozitorija sustava za automatizirano generiranje koncepata proizvoda su u ponovnom korištenju povoljnih parcijalnih rješenja, bilo da se radi o inovativnim ili ekološki prihvatljivim rješenjima [35]. Apstraktno prikazivanje proizvoda u obliku funkcija i putem funkcijske dekompozicije je važan aspekt razvoja u konceptualnoj fazi [381], no osim njih važni su i radni principi te fizikalni efekti.

Razvoj leksikona funkcija [210], [211] i njegova implementacija za zapisivanje i modeliranje novih modela funkcija proizvoda omogućilo je automatsko generiranje koncepata putem morfološke matrice, analizu kompleksnih tehničkih sustava, i pretpostavlja se potporu generiranju novih koncepata analogijom [197]. Ovaj sustav ima potencijal biti obogaćen leksikonima ili katalozima fizikalnih efekata [298]. Uz implementaciju vrednovanja ekološke prihvatljivosti originalnih proizvoda predloženom metodom omogućilo bi se vrednovanje novo generiranih koncepata proizvoda, odnosno proizvoda koji nisu u repozitoriju analiziranih proizvoda, te o kojima ne postoji dovoljno podataka za analizu životnog ciklusa i procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*).

Prema Bernstein i drugima [330] svi novi koncepti su inačice ili kombinacije postojećih (što i omogućava procjenu utjecaja na okoliš temeljem podataka o prijašnjim proizvodima pohranjenima u repozitorij proizvoda). No, koncepti proizvoda koji su originalni i temelje se

na fizikalnim efektima ili kombinaciji efekata kojim se na inovativan ili neočekivan način ostvaruju funkcije proizvoda, često nisu osnova za pretraživanje u repozitorijima podataka.

Eisenhard [59] je predložio klasifikaciju proizvoda prema karakteristikama proizvoda i aproksimaciju utjecaja na okoliš prema grupama proizvoda. Sousa i Wallace [18], te Sousa i drugi [62] dali su doprinos razvoju klasifikacije proizvoda prema utjecajima na okoliš i karakteristikama životnog ciklusa. Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda koji su razvijeni u istraživanju prikazanom u ovoj doktorskoj disertaciji, dobra su polazna točka za nastavak razvoja klasifikacijskog sustava opisivanja proizvoda (Eisenhard [59], Sousa i Wallace [18], te Sousa i drugi [62]) kojem je nedostajala kvalitativna komponenta vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. Kvalitativni deskriptori dobrote (ekološke prihvatljivosti) koncepcijskih rješenja temeljili bi se na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti razvijenim u okviru ove doktorske disertacije. Time bi se upotpunio zahtjev da tehnički sustavi u konceptualnoj fazi razvoja budu vrednovani kvalitativno, ali i kvantitativno uzimajući u obzir poznate parametre rješenja.

# POPIS LITERATURE

[1] International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, ISO 14040:2006. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.

[2] Kobayashi H. A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. Advanced Engineering Informatics. 2006;20:113-125.

[3] Bhander GS, McAloone TC, Hauschild M. Implementation of Life Cycle Assessment in Product Development. Environmental Progress. 2003;22(4):255-267.

[4] Hauschild M, Jeswiet J, Alting L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2005;54(2):1-21.

[5] Lindahl M. Engineering Designers' Requirements on Design for Environment Methods and Tools [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2005.

[6] Tischner U. Tools for Ecodesign and Sustainable Product Design. In: Charter M, Tischner U, editors. Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future. Sheffield: Greanleaf Publishing Limited; 2001. p. 263-281.

[7] Ulrich KT, Eppinger SD. Product Design and Development. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.

[8] Brezet H. Dynamics in Ecodesign Practice. Industry and Environment. 1997;20(1):21-24.

[9] May G. Integration of Sustainability into New Product Design [dissertation]. Milano: Politechnico di Milano; 2010.

[10] Bhamra T, Hernandez R, Mawle R. Sustainability: Methods and Practices. In: Walker S, Giard J, editors. The Handbook of Design for Sustainability. London: Bloomsbury Academic; 2013. p. 100-120.

[11] Ullman DG. The Mechanical Design Process, 4th edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.; 2010.

[12] Haapala KR, Poppa KR, Stone RB, Tumer IY. Automating Environmental Impact Assessment during the Conceptual Phase of Product Design. AAAI 2011 Spring Symposium: Artificial Intelligence and Sustainable Design; Palo Alto, 21.–23.03.2011.

[13] Kengpol A, Boonkanit P. The decision support framework for developing Ecodesign at conceptual phase based upon ISO/TR 14062. International Journal of Production Economics. 2011;131(1):4-14.

[14] Pugh S. Conceptual Design. In: Pugh S, editor. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Reading: Addison-Wesley; 1991, pp. 67-100.

[15] Carillo-Hermosilla J, Del Rio P, Könnölä T. Diversity of Eco-Innovations: Reflections from Selected Case Studies. Journal of Cleaner Production. 2010;18(10-11):1073-1083.

[16] Dewulf W, Willems B, Duflou JR. Estimating the environmental profile of early design concepts. In: Brissaud D, Tichkiewitch S, Zwolinski P, editors. Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development. Dordrecht: Springer; 2006. p. 321-334.

[17] Voss M, Dewulf W, Willems B, Duflou J, Birkhofer H. A Proposal to Adapt Design for Environment Methods to the level of Abstraction Needed in Early Phases of Product Development. In: Meerkamm H, editor. 16. Symposium on Design for X; Neukirchen; Erlangen, 13.-14.10.2005. Neukirchen; Erlangen: Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg; 2005.

[18] Sousa I, Wallace D. Product Classification to Support Approximate Life-Cycle Assessment of Design Concepts. Technological Forecasting & Social Change. 2006;73(3):228-249.

[19] Bhamra TA, Evans S, McAloone TC, Simon M, Poole S, Sweatman A. Integrating Environmental Decisions into the Product Development Process: Part I. The Early Stages. In: Yoshikawa H, Yamamoto R, Kimura F, Suga T, Umeda Y, editors. First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing - EcoDesign ’99; Tokyo, Japan, 1.-3.2.1999. Tokyo: IEEE; 1999.

[20] Graedel TE, Allenby BR. Industrial ecology. New Jersey: Prentice Hall; 1995.

[21] Wang J. Ranking Engineering Design Concepts Using a Fuzzy Outranking Preference Model. Fuzzy Sets and Systems. 2001;119(1):161-170.

[22] Wang Q, Potter N. Incorporating life cycle costing in early product design. International Journal of Advanced Manufacturing Systems. 2006;10(1):33-40.

[23] Eger T, Eckert C, Clarkson PJ. The Role of Design Freeze in Product Development. In: Samuel A, Lewis W, editors. 15th International Conference on Engineering Design - ICED 05; Melbourne, Australia, 15.-18.8.2005. Barton, A.C.T.: Engineers Australia; 2005.

[24] Tischner U, Charter M. Sustainable Product Design. In: Charter M, Tischner U, editors. Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future. Sheffield: Greanleaf Publishing Limited; 2001. p. 118-138.

[25] Bohm MR, Haapala KR, Poppa K, Stone RB, Tumer IY. Integrating Life Cycle Assessment Into the Conceptual Phase of Design Using a Design Repository. Journal of Mechanical Desing. 2010;132(9):091005–12.

[26] Asiedu Y, Gu P. Product life cycle cost analysis: state of the art review. International Journal of Production Research. 1998;36(4):883-908.

[27] Maxwell D, van der Vorst R. Developing sustainable products and services. Journal of Cleaner Production. 2003;11(8):883-895.

[28] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt W-P, Suh S, Weidema BP, Pennington DW. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment International. 2004;30:701-720.

[29] Schischke K, Hagelüken M. An Introduction to EcoDesign Strategies –Why, what and how? [Internet]. Cardiff: Fraunhofer IZM; 2005 [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.ecodesignarc.info/servlet/is/540/Intro%20to%20EcoDesign%20Cardiff.pdf?command=downloadContent&filename=Intro%20to%20EcoDesign%20Cardiff.pdf

[30] Seo K-K, Park JH, Jang D-S, Wallace DR. Approximate Estimation of the Product Life Cycle Cost Using Artificial Neural Networks in Conceptual Design. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002;19:461-471.

[31] Eddy D. Sustainability-Based Product Design in a Decision Support Semantic Framework [dissertation]. Cambridge (MA): University of Massachusetts; 2014.

[32] Sakao T, Fargnoli M. Creating Strategy with Demand-side Approach in Early Stages of Ecodesign. International Journal of Environmentally Intelligent Design & Manufacturing. 2013;1(2):1-24.

[33] Blanchard BS, Fabrycky WJ. Systems engineering and Analysis. 4th ed. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice Hall; 1990.

[34] Curran MA. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. US EPA; 2006.

[35] Gilchrist B, Van Bossuyt DL, Tumer IY. Functional Impact Comparison of Common and Innovative Products. In: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - ASME 2013, Portland, Oregon, USA, 04.-07.08.2013. Portland: American Society of Engineering Design; 2013.

[36] Bevilacqua M, Ciarapica FE, Giacchetta G. Design for Environment as a Tool for the Development of a Sustainable Supply Chain. London: Springer Verlag London Limited; 2012.

[37] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Influence of Environmental Information on Expert-perceived Creativity of Ideas. In: Taura T, Nagai Y, editors. Design Creativity 2010; London: Springer; 2011, p. 71-78.

[38] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Estimating Environmental Behavior without Performing an LCA. Journal of Industrial Ecology. 2013;17(1):31-42.

[39] Wang X, Chan HK, Li D. A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development. European Journal of Operational Research. 2015;241:212–223.

[40] Eisenbart B, Gericke K, Blessing L. An analysis of functional modeling approaches across disciplines. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2013;27(3):281-289.

[41] Chakrabarti A, Blessing LTM. An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations. In: Chakrabarti A, Blessing LTM, editors. London: Springer-Verlag London; 2014.

[42] Mebolt M, Matthiesen S, Lohmeyer Q. The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In: Heisig P, Clarkson J, editors. 2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP; Cambridge, 29.- 30.11.2012. Cambridge: The Design Society; 2012.

[43] Toniolo S, Mazzi A, Garato VG, Aguiari F, Antonio Scipioni A. Assessing the "design paradox" with life cycle assessment: A case study of a municipal solid waste incineration plant. Resources, Conservation and Recycling. 2014;91:109–116.

[44] Andreasen MM, Hein L. Integrated product development. Berlin: IFS Publications, Springer; 1987.

[45] Keller R, Eckert CM, Clarkson PJ. Through-life Change Prediction and Management. In: Bouras A, Gurumoorthy B, McMahon C, Ramani K, editors. International Conference on Product Lifecycle Management - PLM'08; Seoul, 9.-11.7.2008. Seoul: KAIST; 2008.

[46] Byggeth S, Hochschorner E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. Journal of Cleaner Production. 2006;14:1420-1430.

[47] Akao Y. Quality Function Deployment. Portland: Productivity Press; 1990.

[48] Bârsan L, Bârsan A, Paralika M. Considerations about Reducing the Environmental Impact in the Product Using Stage. Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures. 2009;6(23):194-197.

[49] Puglieri FN, Ometto A, Miguel PAC. Eco-design methods for developing new products based on QFD: a literature analysis. Product: Management & Development. 2011;9(1):23-29.

[50] Bernstein WZ, Ramanujan D, Devanathan S, Zhao F, Sutherland J, Ramani K. Function Impact Matrix for Sustainable Concept Generation: A Designer's Perspective. In: ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 6: 15th Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference; Montreal, Quebec, Canada, 15.-18.8.2010. Montreal: ASME; 2010.

[51] Boks C. The Soft Side of Ecodesign. Journal of Cleaner Production. 2006;14(15-16):1346-1356.

[52] Devanathan S, Ramanujan D, Bernstein WZ, Zhao F, Ramani K. Integration of Sustainability Into Early Design Through the Function Impact Matrix. Journal of Mechanical Design. 2010;132(8):1-8.

[53] Sakao T. A QFD-Centred Design Methodology for Environmentally Conscious Product Design. International Journal of Production Research. 2007;45(18-19):4143-4162.

[54] Bocken NMP, Allwood JM, Willey AR, King JMH. Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations. Technovation. 2012;32:19–31.

[55] Tyl B, Legardeur J, Millet D, Vallet F. A comparative study of ideation mechanisms used in eco-innovation tools. Journal of Engineering Design. 2015;25(10-12):325-345.

[56] Vallet F, Tyl B, Millet D, Eynard B. Chapter 114. A method to select best nuggets from eco-innovation sessions. In: Ferreira T, editor. Green Design, Materials and Manufacturing Processes. CRC Press; 2013, p. 647-653.

[57] Gaha R, Benamara A, Yannou B. Eco-designing with CAD Features: Analysis and Proposals. Advances in Mechanical Engineering. 2013 Jan;5:1-11. doi: 10.1155/2013/531714.

[58] Ye Y, Jankovic M, Kremer G, Yannou B, Leroy Y, Bocquet J-C. Integration of environmental impact estimation in system architecture and supplier identification. Research in Engineering Design. 2015 Dec:1-24. doi: 10.1007/s00163-015-0208-x.

[59] Eisenhard JL. Product Descriptors for Early Product Development: An Interface between Environmental Experts and Designers [master thesis]. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2000.

[60] Fitch P, Cooper JS. Life-cycle modeling for adaptive and variant design. Part 1: Methodology. Research in Engineering Design. 2005;15:216-228.

[61] Fitzgerald DP, Herrmann JW, Schmidt LC. A Conceptual Design Tool for Resolving Conflicts Between Product Functionality and Environmental Impact. Journal of Mechanical Design. 2010;132(9).

[62] Sousa I, Wallace DR, Eisenhard JL. Approximate Life-Cycle Assessment of Product Concepts Using Learning Systems. Journal of Industrial Ecology. 2000;4(4).

[63] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Using ecodesign guidelines for concept evaluation: Findings from an experiment. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 13th International Design Conference - DESIGN 2014; Cavtat - Dubrovnik, 19.-22.5.2014. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2014.

[64] Hubka V, Eder WE. Theory of Technical Systems - A Total Concept Theory for Engineering Design. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 1988.

[65] Hubka V, Eder WE. Engineering Design: General Procedural Model of Engineering Design. Berlin, Heidelberg, Njemačka: Springer-Verlag; 1992.

[66] Hubka V, Eder WE. Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. London: Springer-Verlag London Limited. Available from: http://deseng.ryerson.ca/DesignScience/.

[67] Kroes P. Technical Artefacts: Creations of Mind and Matter: A Philosophy of Engineering Design. Dordrecht: Springer Science & Business Media B.V.; 2012.

[68] Ranjan BSC, Srinivasan V, Chakrabarti A. System-Environment View in Designing. In: Chakrabarti A, editor. CIRP Design 2012. London: Springer; 2013. p. 59-70.

[69] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Eco-evaluation of Technical Systems in the Conceptual Phase. In: Weber C, Husung S, Contamessa M, Cascini G, Marjanović D, Bordegoni M, et al, editors. Proceedigns of 20th International Conference on Engineering Design - ICED15, Vol. 5: Design Methods and Tools – part 1; Milano, Italy, 27.-30.7.2015. Milano: The Design Society; 2015.

[70] Odum HT. Self-organization, transformity, and information. Science. 1988;242:1132-1139.

[71] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Energy quality hierarchy and "transformity" in evaluation of product's working principles. In: Lien TK, editor. Procedia CIRP: 21st ClRP Conference on Life Cycle Engineering, Vol. 15, Trondheim, Norway, 18.-20.6.2014. p. 300-305; Trondheim: Elsevier B.V.; 2014.

[72] Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, Grote KH. Engineering Design: A Systematic Approach. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag, 2007.

[73] Midžić I, Marjanović D. Estimation of environmental effects in early product development. In: Proceedings of the 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research - IASDR13; Tokyo, Japan, 26.-30.08.2013. Tokyo: International Association of Societies of Design Research/Japanese Society for the Science of Design/Japan Society of Kansei Engineering/Science Council of Japan; 2013.

[74] Allione C, De Giorgi C, Lerma B, Petruccelli L. From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. Energy. 2012;39:90-99.

[75] Hill MK. Understanding Environmental Pollution. 2nd edition. New York: Cambridge University Press; 2004.

[76] Zbicinski I, Stavenuiter J, Kozlowska B, van de Coevering HPM. Product Design and Life Cycle Assessment. Uppsala: The Baltic University Press; 2006.

[77] Seepersad CC, Pedersen K, Emblemsvåg J, Bailey R, Allen JK, Mistree F. The Validation Square: How Does One Verify and Validate a Design Method? In: Lewis KE, Chen W, Schmidt LC, editors. Decision Making in Engineering Design, New York: ASME; 2006.

[78] Blessing LTM, Chakrabarti A. DRM - A Design Research Methodology. London: Springer Verlag; 2009.

[79] Tkalac Verčič A, Sinčić Ćorić D, Pološki Vokić N. Priručnik za metodologiju istraživačkog rada: kako osmisliti, provesti i opisati znanstveno i stručno istraživanje. Zagreb: M.E.P. d.o.o.; 2010.

[80] Saunders MNK, Rojon C. On the attributes of a critical literature review. Coaching: An International Journal of Theory, Research and Practice. 2011;4.2:156-162.

[81] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Eco-Evaluation in Conceptual Design Phase – A Case Study. Transactions of FAMENA. 2015;39(3):47-60.

[82] Koh S-Y, Lee S-J, Chang M-K, Liang H-Y, Lee S-H, Boo S-C. Study on the guideline for analyzing ecodesign value system and establishing product design strategy. In: Poggenpohl S, editor. 2007 IASDR Conference: Emerging Trends in Design Research; Hong Kong, 12.-15.11.2007. Hong Kong: International Association of Societies of Design Research; 2007.

[83] Saunders MNK, Tosey P. The Layers of Research Design. Rapport. 2012;30:58-59.

[84] Lindahl M, Ekermann S. Structure for Categorization of EcoDesign Methods and Tools. In: Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering,

Singapore 17.-19.4.2013. Singapore: Springer Science + Business Media Singapore; 2013. pp. 117-122.

[85] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Validation of the Eco-transformity Method. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 14th International Design Conference - DESIGN 2016; Dubrovnik, Hrvatska, 16.-19.05.2016. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2016.

[86] International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, ISO 14044:2006. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.

[87] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R. ReCiPe 2008. Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM); 2009 Jan 06.

[88] PRé Consultants. SimaPro – World's Leading LCA Software [Internet]. Amersfoort: PRé Consultants; 2015 [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.pre-sustainability.com/simapro

[89] Ecoinvent. Ecoinvent – the world's most consistent & transparent life cycle inventory database [Internet]. Zürich: The Ecoinvent Centre; 2015 [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.ecoinvent.org

[90] Weidema BP, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo CO, Wernet G. Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1 (v3), St. Gallen: The Ecoinvent Centre; 2013.

[91] Roozenburg NFM, Eekels J. Product Design: Fundamentals and Methods. Chichester: John Wiley & Sons; 1995.

[92] Midžić, I. Razvoj sustava za sintezu koncepcijskih rješenja pomoću gramatike proizvoda [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009. Available from: http://repozitorij.fsb.hr/636/1/29_06_2009_Ida_Midzic_-_Diplomski_rad.pdf

[93] Eckert C, Keller R, Clarkson J. Complexity in engineerign design. In: Alexiou K, Johnson J, Zamenopoulos T, editors. Embracing Complexity in Design. New York: Routhledge; 2010.

[94] Cooper RG. Stage-gate systems: a new tool for managing new products. Business Horizons. 1990 May-Jun.

[95] Andreasen MM, Hansen CT, Cash P. Conceptual Design: Interpretations, Mindset and Models. Springer International Publishing; 2015. 10.1007/978-3-319-19839-2

[96] Carlson CS. Understanding and Applying the Fundamentals of FMEAs. In: Janasak K, editor. Proceedings of 60th Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2014); Colorado Springs, 27.-30.1.2014. Colorado Springs: IEEE; 2014.

[97] Hansen CT, Andreasen MM. Two approaches to synthesis based on the domain theory. In: Chakrabarti A, editor. Engineering Design Synthesis. London: Springer-Verlag; 2002. p. 93-108.

[98] Zapaniotis A, Dentsoras A. Redundancy eliminations and plausible assumptions of design parameters for evaluating design alternatives. In: Culley SJ, Hicks BJ, McAloone TC, Howard

TJ, Dong A, editors. Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design - ICED 11; Vol. 10, pt. 2, Copenhagen, Denmark, 15.-18.8.2011. Copenhagen: The Design Society; 2011.

[99] International Organization for Standardization. ISO/TR 14062 Technical report: Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development, ISO/TR 14062:2002. Geneva: International Organization for Standardization, Technical Committee ISO/TC 2072002; 2002.

[100] Poulikidou S. Literature review - Methods and tools for environmentally friendly product design and development. Stockholm: KTH, Royal Institute of Technology; 2012.

[101] Tuominen J. Integrating environmental aspects into product development projects [master thesis]. Vaasa: Lappeenranta University of Technology; 2011.

[102] Choi J-K, Ramani K. A Quest for Sustainable Product Design: A Systematic Methodology for Integrated Assessment of Environmentally Benign and Economically Feasible Product Design. Saarbrücken: VDM; 2009.

[103] Ramani K, Ramanujan D, Bernstein WZ, Zhao F, Sutherland J, Handwerker C, Choi J-K i dr. Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. Journal of Mechanical Design. 2010;132(9).

[104] Augustine M, Yadav OP, Jain R, Singh Rathore AP. Concept convergence process: A framework for improving product concepts. Computers & Industrial Engineering. 2010;59:367-377.

[105] Takai S, Ishii K. Modifying Pugh's Design Concept Evaluation Methods. In: Proceedings of Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC'04; Salt Lake City, 28.9.-2.10.2004. Salt Lake City: ASME; 2004.

[106] Huang H-Z, Liu Y, Li Y, Xue L, Wang Z. New evaluation methods for conceptual design selection using computational intelligence techniques. Journal of Mechanical Science and Technology. 2013;27(3):733-746.

[107] Vanegas LV, Labib AW. Application of new fuzzy-weighted average (NFWA) method to engineering design evaluation. International Journal of Production Research. 2001;39(6):1147-1162.

[108] Halog A. Selection of Sustainable Product Improvement Alternatives [dissertation]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology; 2002.

[109] Saaty TL. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research. 1990;48:9-26.

[110] Liu Y-C, Bligh T, Chakrabarti A. Towards an ‘ideal’ approach for concept generation. Design Studies. 2003;24:341-355.

[111] French M. Conceptual design for engineers. 3rd edition. Berlin: Springer-Verlag; 1999.

[112] Wilhelms S. Function- and constraint- based conceptual design support using exchangeable, reusable principle solution elements, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2005;19:201-219.

[113] Malmqvist J. Towards Computational Design Methods for Conceptual and Parametric Design [dissertation]. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 1993.

[114] Motte D. A review of the fundamentals of the systematic engineering design process models. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 10th International Design Conference - DESIGN 2008; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.

[115] Andersson P. A Process Approach to Robust Design in Early Engineering Design Phases [dissertation]. Lund: Lund Institute of Technology; Lund University; 1996.

[116] Borchardt M, Wendt MH, Peirera GM, Sellitto MA. Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements. Journal of Cleaner Production. 2011;19:49-57.

[117] Braungart M, McDonough W, Bollinger AT. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. Journal of Cleaner Production. 2007;15(13-14):1337-1348.

[118] Karlsson R, Luttropp C. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. Journal of Cleaner Production. 2006;14:1291-129.

[119] Plouffe S, Lanoie P, Berneman C, Vernier M-F. Economic benefits tied to ecodesign. Journal of Cleaner Production. 2011;19:573-579.

[120] Frei M. Eco-effective product design: the contribution of environmental management in designing sustainable products. The Journal of Sustainable Product Design. 1998;7:16-25.

[121] Lee K-M, Park P-J. ECODESIGN - Best Practice of ISO/TR 14062. APEC, Eco-product Research Institute, Ajou University, Korea: APEC; 2005.

[122] Vezzoli C, Sciama D. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. Journal of Cleaner Production. 2006;14:1319-1325.

[123] Luttropp C, Lagerstedt J. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. Journal of Cleaner Production. 2006;14:1396-1408.

[124] Vicente J, Frazão R, Moreira da Silva F. The Evolution of Design with Concerns on Sustainability. Revista Convergências. 2010;(10).

[125] Spangenberg JC, Fuad-Luke A, Blincoe K. Design for Sustainability (DfS): the interface of sustainable production and consumption. Journal of Cleaner Production. 2010;18:1485-1493.

[126] Ehrenfeld JR. Eco-efficiency: Philosophy, theory, and tools. Journal of Industrial Ecology. 2005;9(4).

[127] European Commission. Doing More with Less: Green Paper on Energy Efficiency. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2005.

[128] Aoe T. Eco-Efficiency (Factor X) for Electrical and Electronic Products and a Case Study on Home Appliances in a Household. Materials Transactions. 2006;47(3):913- 922.

[129] Aoe T. Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. Journal of Cleaner Production. 2007;15:1406-1414.

[130] Charter M, Tischner U. Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future. Tischner M, Charter U, editors. Sheffield: Greenleaf Publishing Limited; 2001.

[131] Fargnoli M, Costantino F, Tronci M, Bisillo S. Ecological profile of industrial products over the environmental compliance. International Journal of Sustainable Engineering. 2012;6(2):117-130.

[132] Tukker A, Emmert S, Charter M, Vezzoli C, Sto E, Andersen MM, Geerken T, Tischner U, Lahlou S. Fostering change to sustainable consumption and production: an evidence based view, Journal of Cleaner Production. 2008;16:1218-1225.

[133] Koho M, Tapaninaho M, Heilala J, Torvinen S. Towards a concept for realizing sustainability in the manufacturing industry. Journal of Industrial and Production Engineering. 2015;32(1):12-22.

[134] Bačun D, Matešić M, Omazić MA. Leksikon održivog razvoja. Hrvatski poslovni savjet za održivi razvoj; Zagreb, Hrvatska: Impressum; 2012.

[135] Vandaele NJ, Decouttere CJ. Sustainable R&D portfolio assessment. Decision Support Systems. 2013;54:1521-1532.

[136] Albino V, Balice A, Dangelico R. Environmental Strategies and Green Product Development: an Overview on Sustainability-Driven Companies. Business Strategy and the Environment. 2009;18:83-96.

[137] Åkermark A-M. The Crucial Role of the Designer in EcoDesign [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2005.

[138] Meinders H, Meuffels M. Product Chain Responsibility – an Industry Perspective. Corporate Environmental Strategy. 2001;8(4).

[139] Knight P, Jenkins JO. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. Journal of Cleaner Production. 2009;17(5):549-558.

[140] Carvalho AP, Barbieri JC. Innovation and sustainability in the supply chain of a cosmetics company, a case study. Journal of technology management and innovation. 2012;7(2):144-156.

[141] Wimmer W, Zust R, Lee K-M. Ecodesign Implementation – A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development. Dordrecht: Springer; 2004.

[142] Lewis H, Gertsakis J, Grant T, Morelli N, Sweatman A. Design + Environment: A Global Guide to Designing Greener Goods. Sheffield: Greenleaf Publishing Limited; 2001.

[143] Chiu M-C, Chu . Review of Sustainable Product Design from Life Cycle Perspectives. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012;13(7):1259-1272.

[144] Roche T. Development of a Design for the Environment Workbench [dissertation]. Galway: Galway-Mayo Institute of Technology; 1999.

[145] Clausson L. Business Innovation by utilizing Engineering Design Theory and Methodology [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH); 2006.

[146] Desimone LD, Popoff F. Eco-efficinecy – The Business Link to Sustainable Development. Cambridge (MA): MIT Press; 1997.

[147] Brezet H, van Hemel C. ECODESIGN: A promising approach to sustainable production and consumption. Pariz/Delft: United Nations Environmental Programme (UNEP)/Rathenau Institute/Delft University of Technology; 1997.

[148] Segarra-Oña M, De-Miguel-Molina M, Payá-Martínez A. A Review Of The Literature On Eco-Design In Manufacturing Industry: Are The Institutions Focusing On The Key Aspects. Review of Business Information Systems – Special Edition. 2011;15(5).

[149] Takahashi T, Ueno K, Ishii K. Evaluation methods and Applications of Factor X Indicator for Realization of a Sustainable Society. IEEE; 2005. p. 770-774.

[150] Reijnders L. The factor X debate - setting targets for eco-efficiency. Journal of Industrial Ecology. 1998;2:13-21.

[151] Bey N, Hauschild MZ, McAloone TC. Drivers and barriers for implementation of environmental strategies in manufacturing companies. CIRP Annals. 2013;62(1):43-46.

[152] Ehrenfeld J. Designing 'Sustainable' Product/Service Systems. In: Proceedings of EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing; Tokyo, Japan; 2001.

[153] Gaziulusoy AI. System Innovation for Sustainability: A Scenario Method and a Workshop Process for Product Development Teams [dissertation]. Auckland: University of Auckland; 2010.

[154] Tchertchian N, Millet D, Yvars P-A. How to Improve Environmental Performance by Negotiating Functional Specifications of Complex System? In: Procedia CIRP - Proceedings of the 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering - CIRP 2014; Vol. 15, Elsevier B.V., 2014, pp. 449-454.

[155] Halila F, Hörte SÅ. Innovations that combine environmental and business aspects, International Journal of Innovation and Sustainable Development. 2006;1(4).

[156] Mathieux F, Rebitzer G, Ferrendier S, Simon M, Froelich D. Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry. An analysis of the current practices based on cases studies. The Journal of Sustainable Product Design. 2001;1:233–245.

[157] Geels FW. Technological transitions and system innovations: a co-evolutionary and socio-technical analysis, Cheltenham, UK, Northampton, Mass.: Edward Elgar Pub, 2005.

[158] Chou C-J, Chen C-W, Conley C. An approach to assessing sustainable product-service systems. Journal of Cleaner Production. 2015;86:277-284.

[159] Dewulf W. A pro-active approach to ecodesign: framework and tools [dissertation]. Leuven, Belgija: Katholieke Universiteit Leuven; 2003.

[160] Kwak M, Kim H. Design for life-cycle profit with simultaneous consideration of initial manufacturing and end-of-life remanufacturing. Engineering Optimization. 2015;47(1):18-35.

[161] Brones F, Monteiro de Carvalho M. From 50 to 1: integrating literature toward a systemic ecodesign model. Journal of Cleaner Production. 2015 Jun;96:44-57.

[162] Pochat SL, Bertoluci G, Froelich D. Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs. Journal of Cleaner Production. 2007;15:671-680.

[163] Bovea MD, Pérez-Belis V. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. Journal of Cleaner Production. 2012;20(1):61-71.

[164] Otto KN, Wood KL. Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development, Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 2001.

[165] Cluzel F, Yannou B, Leroy Y, Millet D. Proposition for an Adapted Management Process to Evolve from an Unsupervised Life Cycle Assessment of Complex Industrial Systems Towards an Eco-Designing Organisation, Concurrent Engineering: Research and Applications. 2012;20:111-126.

[166] Pigosso DCA, Rozenfeld H, Seliger G. Ecodesign Maturity Model: criteria for methods and tools classification. In: Proceedings of the 8th Global Conference on Suistainable Manufacturing; Abu Dabi, 2011. Abu Dabi; 2011.

[167] Hernandez Pardo RJ, Brissaud D, Mathieux F, Zwolinski P. Contribution to the characterisation of eco-design projects. International Journal of Sustainable Engineering. 2011;4(4).

[168] Bras B. Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization. Industry and Environment. 1997;20(1-2).

[169] Tischner U, Schmincke E, Rubik F, Prösler M. How to do Ecodesign? A guide for environmentally and economically sound design. Berlin: German Federal Environmental Agency; 2000.

[170] Telenko C, Seepersad CC, Weber ME. A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. In: Proceedings of ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, New York: ASME; 2008. p. 289-301.

[171] Volvo Group. STD 100-0004 - Substitutes for hazardous chemical substances - Volvo's white list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0004

[172] Volvo Group. STD 100-0003 - Chemical substances which should not be present in processes or products within the Volvo Group - Volvo's grey list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0003

[173] Volvo Group. STD 100-0003 - Chemical substances which must not be present in processes or products within the Volvo Group - Volvo's black list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0002

[174] Jones E, Stanton NA, Harrison D. Applying structured methods to Ecoinnovation. An evaluation of the Product Ideas Tree diagram. Design Studies. 2001;22:519-542.

[175] Luttropp C, Karlsson R. The Conflict of Contradictory Environmental Targets. In: Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing; Tokyo, 11.-15.12.2001. Tokyo: IEEE; 2001.

[176] van Gorp AC. Ethical issues in engineering design; Safety and sustainability. In: Kroes P, Meijers A., editors. Delft University of Technology/Eindhoven University of Technology: Simon Stevin Series in the Philosophy of Technology; 2005.

[177] Meinders H. Point of no return - Philips EcoDesign guidelines. Eindhoven: Philips Electronics; 1997.

[178] Namikawa O. Development of the evaluation tool that integrate "Design for Environment" and "Eco-efficiency" at Hitachi". In: Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, International Symposium on EcoDesign 2005, 2005, pp. 240-241.

[179] Wenzel H, Hauschild M, Alting L. Methodology, tools and case studies in product development. In: Environmental assessment of products, vol. 1. London: Chapman Hall; 1997.

[180] Van Hemel C, Cramer J. Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs, Journal of Cleaner Production. 2002;10:439-453.

[181] Tyl B, Legardeur J, Millet D, Vallet F. Adaptation of the creativity tool ASIT to support eco-ideation phases. In: Bártolo HM, editor. Green Design, Materials and Manufacturing Processes. Lisbon: CRC Press; 2013. p. 437-442.

[182] Pigosso DCA, Sousa SR. Life Cycle Assessment (LCA): Discussion on Full-Scale and Simplified Assessments to Support the Product Development Process. In: 3rd International Workshop. Advances in Cleaner Production; São Paulo, Brazil, 18.-20.5.2011. São Paulo: Cleaner Producton Initiative and Challeges for a Sustainable World; 2011.

[183] Hochschorner E, Finnveden, G. Evaluation of Two Simplified Life Cycle Assessment Methods. International Journal of Life Cycle Assessment. 2003;8(3):119-128.

[184] Lagerstedt J, Luttropp C, Lindfors L-G. Functional Priorities in LCA and Design for Environment. International Journal of LCA. 2003;8(3):160-166.

[185] Lagerstedt J. Functional And Evironmental Factors In Early Phases Of Product Development - Eco Functional Matrix [dissertation]. Stokholm: KTH; 2003.

[186] Short TD, Lynch CA. Beyond the Eco-Functional Matrix – design for sustainability and the Durham methodology. In: Bhamra T, Hon B, editors. Design and Manufacture for Sustainable Development; Loughborough, 1.-2.9.2004. Suffolk: Professional Engineering Publishing Limited; 2004.

[187] Fussler C, James P. Driving Eco Innovation: A Breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability. London: Pitman Publishing; 1996.

[188] Bovea M, Wang B. Green Quality Function Deployment: A Methodology for Integrating Customer, Cost and Environmental Requirements in Product Design. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 2005;12:9-19

[189] Cristofari M, Deshmukh A, Wang B. Green Quality Function Deployment. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 1996;5(2):13-18.

[190] Masui K, Sakao T, Kobayashi M, Inaba A. Applying Quality Function Deployment to Environmentally Conscious Design. International Journal of Quality and Reliability Management. 2003;20(1):90-106.

[191] Zhang Y, Wang P, Zhang C. Product Concept Evaluation Using GQFD-II and AHP. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 1998;7(3):1-15.

[192] Chen ZY, Yao S, Lin QJ, Zeng Y, Eberlein A. Formalisation of product requirements: from natural language escriptions to formal specifications. International Journal of Manufacturing Research. 2007;2(3):362–387.

[193] Diev S. Requirements development as a modeling activity. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. 2007;32(2):1–3.

[194] Joshi S, Morkos B, Shankar P, Summers DJ, Mocko GM. Requirements in engineering design: What are we teaching? In: Proceedings of the 9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2012; Karlsruhe, 7.-11.5.2012. Karlsruhe: Delft University of Technology; 2012.

[195] Vindoh S, Rathod G. Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. Journal of Cleaner Production. 2010;18(8):833-842.

[196] Savransky SD: Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving. Boca Raton: CRC Press; 2000.

[197] Oman S, Gilchrist B, Tumer IY, Stone R. The development of a repository of innovative products (RIP) for inspiration in engineering design. International Journal of Design Creativity and Innovation. 2014;2(4):186-202.

[198] Devanathan S, Koushik P, Zhao F, Ramani K. Integration of sustainability into early design through working knowledge model and visual tools, 2009.

[199] Gilchrist B. Modeling Innovativeness in Consumer Products With the Influence of Environmental Sustainability [dissertation]. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2013.

[200] Hur T, Lee J, Ryu J, Kwon E. Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. Journal of Environmental Management. 2005;75:229–237.

[201] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Comparing LCA results out of competing products: developing reference ranges from a product family approach. Journal of Cleaner Production. 2009;18(4):355–364.

[202] Park JH, Seo K-K. Approximate life cycle assessment of product concepts using multiple regression analysis and artificial neural networks. Journal of Mechanical Science and Technology. 2003;17(12):1969-1976.

[203] Sousa I. Approximate life-cycle assessment of product concepts using learning systems [dissertation], Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2002.

[204] Kota S, Chakrabarti A. A method for Estimating the Degree of Uncertainty With Respect to Life Cycle Assessment During Design, Journal of Mechanical Design. 2010;132.

[205] Zhou CC, Yin GF, Hu XB. Multi-Objective Optimization of Material Selection for Sustainable Products: Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm Approach. Materials and Design. 2009;30(4):1209-1215.

[206] Eddy D, Krishnamurty S, Grosse I, Wileden J, Lewis K. A Robust Surrogate Modeling Approach for Material Selection in Sustainable Design of Products. In: Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference - IDETC/CIE 2014; Buffalo, New York, 17.-20.8.2014. Buffalo: ASME; 2014.

[207] Chatterjee P, Athawale VM, Chakraborty S. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. Materials and Design. 2009;30:4043–4053.

[208] Design Engineering Lab. Design Repository [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: repository.designengineeringlab.org

[209] Bohm MR, Stone RB, Szykman S. Enhancing virtual product representations for advanced design repository systems. J. Comput. Inf. Sci. Eng. 2005;5(4):360-372.

[210] Stone R, Wood K. Development of a functional basis for Design, Journal of Mechanical Design. 2000;122(4):359–370.

[211] Hirtz J, Stone R, Mcadams D, Szykman S, Wood K. A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. Reserach in Engineering Design. 2002;13:65-82.

[212] Bohm MR. Information archival and reuse: drawing conclusions from the past [dissertation]. Missouri: Missouri University of Science and Technology; 2009.

[213] Bohm MR, Stone RB, Simpson TW, Steva ED. Introduction of a Data Schema: The Inner Workings of a Design Repository. In: Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences, Philadelphia, 10.-13.9.2006. Philadelphia: ASME; 2006.

[214] Rocco C, Rizzuti S, De Napoli L. A Procedure for Early Environmental Assessment of Industrial Products. In: Proceedings of the IMProVe, Venice, Italy, 2011.

[215] Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Zhao, F., Ramani, K.: Addressing Uncertainties within Product Redesign for Sustainability: A Function Based Framework. In: Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011, Washington, DC, August 28.-31.8.2011. Washington, DC: ASME; 2011.

[216] Lee DE, Melkanoff MA. Issues in product life cycle engineering analysis. Advances in Design Automation. 1993;1:75-86.

[217] Dahmus J, Gonzalez-Zugasti J, Otto K. Modular product architecture. Design Studies. 2001;22(5):409-424.

[218] Alizon F, Shooter S, Simpson T. Improving an existing product family based on commonality/diversity, modularity, and cost. Design Studies. 2007;28(4):387-409.

[219] Thevenot H, Simpson T. Guidelines to minimize variation when estimating product line commonality through product family dissection. Design Studies. 2007;28(2):175–194.

[220] Hammond GP, Jones CI. Embodied energy and carbon in construction materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy. 2008;161(2):87-98.

[221] Carteron E, Zinck S, Lessard L, Vionnet S, Humbert S. Integrating Water Footprinting into Eco-design: Case Study of a Chair. In: Proceedings of the 2nd LCA Conference; Lille France, 6.-7.11.2012. Lille France; 2012.

[222] Lee CK. Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability. Journal of Cleaner Production. 2014.

[223] Miettinen P, Hämäläinen RP. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). European Journal of Operational Research. 1997;102:279–294.

[224] Munoz MI. Life Cycle Assessment as a tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Universitat Autonoma de Barcelona, 2006.

[225] Hendrickson CT, Lave LB, Matthews HS. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resources for the Future Press, 2005.

[226] Azapagic A. Life-cycle Assessment: A Tool for Identification of More Sustainable Products and Processes, 2002.

[227] Ng, CY, Chuah, KB. Evaluation of Design Alternatives' Environmental Performance Using AHP and ER Approaches. IEEE Systems Journal, 2013;8(4):1182–1189.

[228] Hertwich EG, Pease WS, Koshland CP. Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. Science of The Total Environment, 1997;196(1):13-29.

[229] Tchertchian N, Yvars P-A, Millet D. Benefits and limits of a Constraint Satisfaction Problem/Life Cycle Assessment approach for the ecodesign of complex systems: a case applied to a hybrid passenger ferry. Journal of Cleaner Production. 2013;42:1-18.

[230] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Fuon theory: Standardizing functional units for product design. Resources, Conservation and Recycling. 2010;54:683-691.

[231] Cluzel F, Leroy Y, Yannou B. Toward a structured functional unit defnition framework to limit LCA results variability, 6th International Conference on Life Cycle Management (LCM 2013), August 2013, Gothenburg, Sweden, 2013.

[232] Pennington DW, Potting J, Finnveden G, Lindeijer E, Jolliet O, Rydberg T, Rebitzer G. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. Environment International. 2004;30:721-739.

[233] Dewulf W, Duflou J. Simplifying LCA Using Indicator Approaches – A Framework. In: CIRP seminar on life cycle engineering; Copenhagen, 5.2003; Copenhagen: IPL; 2003.

[234] Ostad-Ahmad-Ghorabi H, Collado-Ruiz D, Wimmer W. Towards Integrating LCA into CAD, Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED 09), Vol. 7, Design for X / Design to X, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009, pp. 301-310.

[235] Suh S, Lenzen M, Treloar GJ, Hondo H, Horvath A, Huppes G, Jolliet O, Klann U, Krewitt W, Moriguchi Y, Munksgaard J, Norris G. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. Environmental Science & Technology. 2004;38(3):657-664.

[236] Ness B, Urbel-Piirsalu E, Anderberg S, Olsson L. Categorising tools for sustainability assessment, Ecological Economics. 2007;60:498–508.

[237] Lyytimaki J. Evaluation of sustainable development strategies and policies: The need for more timely indicators. Natural Resources Forum. 2012;36(2):101-108.

[238] Kates RW, Parris TM, Leiserowitz AA. What is Sustainable Development? – Goals, Indicators, Values and Practice. Environment: Science and Policy for Sustainable Development. 2005;47(3):8–21.

[239] OECD. Measuring material flows and resource productivity. Synthesis report, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008.

[240] Hovelius K. Energy, Exergy- and Emergy Analysis of Biomass Production. Report, vol. 222. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 1997.

[241] Wall G. Exergy - a Useful Concept within Resource Accounting. Report no. 77-42, Göteborg: Institute of Theoretical Physics; 1977.

[242] Wall G. On Exergy and Sustainable Development in Environmental Engineering. The Open Environmental Engineering Journal. 2010;3:21–30.

[243] Odum HT. Environmental accounting, emergy and environmental decision making. Toronto: John Wiley and Sons Inc.; 1996.

[244] Rosen MA, Dincer I. A study of industrial steam process heating through exergy analysis. International Journal of Energy Research. 2004;28(10):917-930.

[245] Herendeen RA. Energy analysis and EMERGY analysis - A comparison. Ecological Modelling. 2004;178(1):227-237.

[246] Kanoglu M, Dincer I, Cengel YA. Exergy for better environment and sustainability. Environment, Development and Sustainability. 2009;11(5):971-988.

[247] Dincer I, Rosen MA. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Amsterdam: Elsevier; 2007.

[248] Nilsson D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. Biomass and Bioenergy. 1997;13(1/2):63-73.

[249] Ulgiati S, Brown MT. Quantifying the environmental support for the dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production. Journal of Cleaner Production. 2002;10(4):37–50.

[250] Doherty SJ, Nilsson PO, Odum HT. 2002. Emergy Evaluation of Forest Production and Industries in Sweden. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2002.

[251] Cornelissen RL. Thermodynamics and sustainable development - The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility [dissertation]. Twente: University of Twente; 1997.

[252] Coatanéa E. Conceptual Modelling of Life Cycle Design [dissertation], Espoo: Helsinki University of Technology; 2005.

[253] Medyna G. Environmental Assessment approach for the first stages of product design [dissertation], Chatenay-Malabry, Pariz: Ecole Centrale Paris; 2013.

[254] Almeida CMVB, Rodrigues AJM., Bonilla SH, Giannetti BF. Emergy as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. Journal of Cleaner Production. 2010;18:32-43.

[255] Giffin M, de Weck O, Bounova G, Keller R, Eckert C, Clarkson PJ. Change Propagation Analyiss in Complex Technical Systems. Journal of Mechanical Design. 2009;131.

[256] Lindeman U, Lorenz M. Uncertainty handling in integrated product development. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 10th International Design Conference - DESIGN 2008; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.

[257] Cziulik C. Concept Evaluation Methods Associated with Virtual Prototyping Techniques as Means for Reducing Lead Time in Product Development. Concurrent Engineering in Product Design and Development. 2003.

[258] Van Berkel R. Innovation and technology for a sustainable materials future. Materials Forum, Vol. 30, Institute of Materials Australasia Ltd; 2006.

[259] Favi C. Toward eco-design: an integrated lifecycle engineering system to develop sustainable mechatronic products and services [dissertation]. Ancona: Università Politecnica delle Marche; 2012.

[260] Kishita Y, Low BH, Fukushige S, Umeda Y, Suzuki A, Kawabe T. Checklist-based assessment methodology for sustainable design. Journal of Mechanical Design. 2010;132(9).

[261] Ostad-Ahmad-Ghorabi H, Bey N, Wimmer W. Parametric ecodesign–an integrative approach for implementing ecodesign into decisive early design stages. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 10th International Design Conference - DESIGN 2008; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.

[262] Millet D, Bistagnino L, Lanzavecchia C, Camous R, Poldma T. Does the Potential of the Use of LCA Match the Design Team Needs? Journal of Cleaner Production. 2007;15(4):335-346.

[263] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Influence of environmental information on creativity. Design Studies. 2010;31(5):479–498.

[264] Purcell AT, Gero JS. Design and Other Types of Fixation. Design Studies. 1996;17(4):363-383.

[265] Liikanen L, Perttula M. Inspiring design idea generation: insights from a memory-search perspective. Journal Engineering Design. 2010;21(5):545-560.

[266] Walker S. Experiments in sustainable product design. The Journal of Sustainable Product Design. 1998;7:41–50.

[267] Li B, Zhang J, Xue D, Gu P. Systematic Lifecycle Design for Sustainable Product Development. Concurrent Engineering: Research and Applications. 2011;19(4).

[268] Guinée JB. Handbook on Life Cycle Assessment. New York: Kluwer Academic Publishers; 2004.

[269] Skerlos SJ, Jorrow WR, Michalek JJ. Sustainable Design and Science: Selected Challenges and Case Studies. In: Abraham M, editor. Sustainability Science and Engineering. New York: Elsevier B.V.; 2006. p. 477-525.

[270] DeVierno A, Thorn B, Carrano AL. Combining Life Cycle Assessment and Linear Regression Analysis to Determine Significant Design Characteristics. In: 17th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference - ASME 2012; 2012.

[271] Vallet F, Eynard B, Millet D, Mahut SG, Tyl B, Bertoluci G. Using eco-design tools: An overview of experts' practices. Design Studies. 2013;34(3):345-377.

[272] Yan P, Zhou M, Sebastian D, Caudill R. Integrating Eco-Compass Concept into Integrated Product and Process Development. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 2002;10(3).

[273] Cluzel F. Eco-design implementation for complex industrial system: From scenario-based LCA to the definition of an eco-innovative R&D projects portfolio [dissertation]. Chatenay-Malabry, Pariz: Ecole Centrale Paris; 2012.

[274] Gómez Navarro T, Capuz Rizo S, Bastante Ceca MJ, Collado Ruiz D. Ecodesign Function and Form. Classification of Ecodesign Tools According to their Functional Aspects. In: International Conference on Engineering Design - ICED 05; Melbourne, 15.-18.08.2005.

[275] Heo Y. Methodology for Prioritizing DfE Strategies based on LCA and AHP [master thesis]. Korea: Graduate School of Ajou University; 2001.

[276] Cross N. Expertise in design: an overview. Design Studies. 2004;25(5):427-441.

[277] Graulich K, Blepp M, Brommer E, Gensch C-O, Mudgal S, Cervantes R, Faninger T, Lyons L. Preparatory Studies for Eco-Design Requirements of Energy-using-Products [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Working_Documents/EuP_Lot24_Wash_T1_Report_ENER_clean.pdf

[278] Tukker A, Jensen B. Environmental Impacts of Products A Detailed Review of Studies. Journal of Industrial Ecology. 2006;10(3):159-182.

[279] Rüdenauer I, Gensch C-O, Quack D. Eco-Efficiency Analysis of Washing machines – Life Cycle Assessment and determination of optimal life span, Freiburg: Öko-Institut e.V.; 2005.

[280] Koerner M, Schulz M, Powell S, Ercolani M. The life cycle assessment of clothes washing options for City West Water's residential customers [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.conference.alcas.asn.au/2011/Koerner.pdf

[281] Dunn A, Kohlitz J, Cao K, Yang M. Whirlpool Duet Washing Machine Water Recycling and Reduction Project, Final Report, ME 450 Team 12, April 15, 2008.

[282] Germani M, Mengoni M, Raffaeli R. Multi level Representation for Supporting the Conceptual Design Phase of Modular Products. Krause F-L, editor. In: The future of product development. Berlin/Heidelberg/New York: Springer; 2007. p. 209-224.

[283] Coons D, Dankowski M, Diehl M, Jakobi G, Kuzel P, Sung E, Trabitzsch U. Performance in Detergents, Cleaning Agents and Personal Care Products; 1987.

[284] Samsung. Samsung Home Appliances, Laundry, EcoBubble: Wash Cool, Save Energy [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available form: http://www.samsung.com/uk/ecobubble/

[285] Gallego-Juarez JA, Riera E, Acosta V, Rodríguez G, Blanco A. Ultrasonic system for continuous washing of textiles in liquid layers. Ultrasonics Sonochemistry. 2010;17:234–238.

[286] Electrolux. Electrolux annual report 2011: Perfect technology for stain removal – Ultra Clean [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://annualreports.electrolux.com/2011/en/strategy/productsandservices/innovativeproducts/innovativeproducts.html

[287] Wired magazine. 'Orbit' washing machine concept levitates your clothes [Internet]. 2012; [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.wired.co.uk/news/archive/2012-02/17/dry-ice-washing-machine

[288] Yanko Design. What Laundry Looks Like in 2050 [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.yankodesign.com/2012/06/25/what-laundry-day-looks-like-in-2050/

[289] Tuvie. Orbit Spherical Washing Machine For Future Generations [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.tuvie.com/orbit-spherical-washing-machine-for-future-generations/

[290] Xeros. Xeros Bead Technology [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.xeroscleaning.com/xeros-bead-technology

[291] Franssen M. Arrow's theorem, multi-criteria decision problems and multi-attribute preferences in engineering design. Research in Engineering Design. 2005;16:42-56.

[292] Derelöv M. On Evaluation of Design Concepts-Modelling Approaches for Enhancing the Understanding of Design Solutions [dissertation]. Department of Management and Engineering, Linköping, Švedska, 2009.

[293] Hansen CT. A Proposal for a Mindset for Decision-Making in Engineering Design. In: Proceedings of NordDesign 2000, Copenhagen, pp. 45-54.

[294] Finger S, Dixon JR. A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part II: Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle. Research in Engineering Design. 1989;1:121-137.

[295] Straton A. A complex systems approach to the value of ecological resources. Ecological Economics. 2006;56:402 -411.

[296] Erden MS, Komoto H, Beek TJV, D'Amelio V, Echavarria E, Tomiyama T. A review of function modeling: approaches and applications. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2008;22(2):147–169.

[297] Poel Van de I, Kroes P. Can technology embody values? In: The moral status of technical artefacts, Kroes P., Verbeek P.-P. (eds.), Dordrecht: Springer, 2014, pp. 103-124.

[298] Roth K. Design catalogues and their usage. Engineering Design Synthesis: Understanding, Approaches and Tools. Chakrabarti A. (ur.), Springer-Verlag London Limited; 2002, pp. 121-129.

[299] Brunetti G, Golob B. A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information. Computer-Aided Design. 2000;32:877-887.

[300] Zadnik Ž, Čok V, Karakašić M, Kljajin M, Duhovnik J. Modularity Solutions Within A Matrix of Function and Functionality (MFF).Technical Gazette. 2011;18):471-478.

[301] Kljajin M, Ivandić Ž, Kozak D. Multiple attribute decision making towards most acceptable variant solution. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. International Design Conference - DESIGN 2004; Dubrovnik, Hrvatska, 17.-20.05.2004. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2004.

[302] Vuković M. Teorija skupova. Predavanja. Sveučilište u Zagrebu, PMF-Matematički odsjek, Zagreb, 2013.

[303] Fülöp J. Introduction to Decision Making Methods. In: BDEI-Workshop, 2005, pp. 1-15.

[304] Mullur AA, Mattson CA, Messac A. Pitfalls of the Typical Construction of Decision Matrices for Concept Selection, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Paper No. AIAA 2003-0466, Reno, NV, January 06-09, 2003.

[305] De Boer SJ. Systematic Decisions in Methodical Engineering Design. In: Proceedings of Scriftenreihe WDK 17, Roozenburg N. F. M., Eekels J. (ur.); Scriftenreihe WDK 17, Zürich: Heurista, 1990.

[306] McKinney M, Shock R, Yonavjak L. Environmental Science - Systems and Solutions. Sudbury: Jones and Bartlett; 2007.

[307] Finnveden G, Östlund P. Exergies of natural resources in lifecycle assessment and other applications. Energy/ Science. 1997;22(9):923-931.

[308] Brown MT, Ulgiati S. Emergy and environmental accounting. In: Cleveland C. (ur.), Encyclopedia of energy, Oxford, UK: Academic Press, Elsevier, 2004.

[309] Voora V, Thrift C. Using Emergy to Value Ecosystem Goods and Services. February, 2010.

[310] Cai TT, Olsen TW, Campbell DE. Maximum (em)power: a foundational principle linking man and nature. Ecological Modeling. 2004;178:115-119.

[311] Ohta T. Energy Technology: Sources, Systems and Frontier Conversion. Great Britain: Pergamon; 1994.

[312] Thiede S. Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

[313] Greco S, Mousseau V, Slowinski R. Robust multiple criteria ranking using a set of additive value functions. In: B. Roy, M. Aloulou, and R. Kalai, editors, Robustness in OR-DA, pp. 95-128. Lamsade, 2007.

[314] Žavbi R, Fain N, Rihtaršič J. Evaluation of a method and a computer tool for generating concept designs. Journal of Engineering Design. 2013;24(4):257-271.

[315] European Commission. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union L 312. 2008;51:3-30.

[316] Rihtaršič J, Žavbi R, Duhovnik J. Application of wirk elements for the synthesis of alternative conceptual solutions. Research in Engineering Design. 2012;23(3):219–234. doi:10.1007/s00163-012-0127-z.

[317] Chakrabarti A, Johnson A. Detecting side effects in solution principles. Proceedings of ICED99, Germany, 1999, pp. 661-666.

[318] American Cleaning Institute. High Effeciency Washers and Detergents [Internet]. [cited Nov 1 2017]. Available from: http://www.cleaninginstitute.org/assets/1/Page/HE.pdf

[319] Webb A. Project Management for Successful Product Innovation – 2nd edition. Hampshire, UK: Gower Publishing Limited; 2000.

[320] Marjanović D, Štorga M. Podloge za vježbe V1 iz kolegija "Teorija konstruiranja" [nastavni materijali]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2011. Available from: http://e-ucenje.fsb.hr/

[321] Sethi S. Ultrasonic cleaning of highly soiled apparel [dissertation]. University of Delhi, Delhi, 2012.

[322] Suslick KS. Sonochemistry, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, vol. 26: John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1998, pp. 516-541.

[323] Gallego-Juárez JA, Riera E, Acosta VM, Rodríguez G, Pinto A, Blanco A. Ultrasonic system for continuous washing of textiles in liquid layers: semi-industrial development, International Congress on Ultrasonics, 2007, Paper 1406.

[324] Sutanto S. Textile Dry Cleaning Using Carbon Dioxide: Process, Apparatus and Mechanical Action [dissertation]. Delft, Nizozemska: Technische Universiteit Delft; 2014.

[325] Ice Tech. Product Catalogue [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.icetechworld.com/dmdocuments/evolution_line/en/evolution_line/evolution_line_product_catalogue.pdf

[326] Kärcher UK. Dry ice cleaning [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.easyfairs.com/uploads/tx_ef/K-rcher-IB740-IB15120_low_res.pdf

[327] Triantaphyllou E, Mann SH. An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision-making methods: a decision-making paradox. International Journal of Decision Support Systems. 1989;5:303-312.

[328] Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-Indicator'99. A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. 3rd Edition. PRé Consultants, Amersfoort, 2001.

[329] Heta. Leksikon: Mehanički mehanizam [Internet]. [cited 2016 Jul 1]. Available from:. http://www.heta.hr/leksikon/mehanicki-mehanizam/

[330] Bernstein WZ, Ramanujan D, Devanathan S, Zhao F, Ramani K, Sutherland JW. Development of a Framework for Sustainable Conceptual Design. Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.

[331] Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S. Recent Developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management. 2009;91(1):1-21.

[332] Abele E, Anderl R, Birkhofer H. Environmentally-Friendly Product Development. Springer-Verlag London Limited; 2005.

[333] Hillary R. Life Cycle Assessment. Centre for Environmental Technology, Imperial College of Science and Technology, Great Britain; 1995.

[334] LinkCycle. Comparison Of Best Life Cycle Assessment Software [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.linkcycle.com/comparison-of-best-life-cycle-assessment-software/

[335] Goedkoop M, Oele M, Leijting J, Ponsioen T, Meijer E. Introduction to LCA with SimaPro. Report version 5.1, PRé Consultants, Nizozemska, 2013.

[336] ILCD. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. International Reference Life Cycle Data System (ILCD), European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.

[337] Goedkoop M, Oele M, de Schryver A, Vieira M, Hegger S. SimaPro Database Manual. Methods Library, PRé Consultants, 2010.

[338] Pizzol M, Christensen P, Schmidt J, Thomsen M. Impacts of "metals" on human health: a comparison between nine different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). Journal of Cleaner Production. 2011;19(6-7):646–656.

[339] Hauschild M, Potting J. Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004.

[340] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of LCA. 2003;8(6):324-330.

[341] Bare JC. TRACI 2.0 - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts. Clean technologies and Environmental Policy. 2011;13(5):687-696.

[342] Hauschild MZ, Huijbregts M, Jolliet O, MacLeod M, Margni M, van de Meent D, Rosenbaum RK, McKone TE. Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals: the search for harmony and parsimony. Environmental Science and Technology. 2008;42(19):7032-7037.

[343] Sonneman G, Castells F, Schumacher M. Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes, Lewis Publishers, Florida, USA, 2004.

[344] WRAP. Environmental life cycle assessment (LCA) study of replacement and refurbishment options for domestic washing machines. Waste & Resources Action Programme, Banbury, England; 2010.

[345] Kemna R. Methodology for Ecodesign of Energy-related Products. MEErP 2011 Methodology Report - Part 1: Methods. Brussels/Delft: COWI Belgium sprl, Van Holsteijn en Kemna B.V., 2011.

[346] Samsung. Samsung Eco Bubble WF80F5E5U4W [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: www.samsung.com/hr/consumer/home-appliances/washing-machines/washer/WF60F4E2W2W/LE

[347] A.I.S.E. The Case fo the "A.I.S.E. Low Temperature Washing" Initiative. International Association for Soaps, Detergents and Maintenance Products, June 2013.

[348] Pertl A, Obersteiner G, Scherhaufer S, Den Boer J. Ecological and economic assessment of formal versus informal waste management strategies – A case study. In: Gidarakos E., Cossu R., Stegmann R. (Eds.), Crete 2010 - 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management; 2010.

[349] McNamara D. Life Cycle Assessment of Washing Machine [Internet]. [cited 2017 Nov 1]. Available from: https://mcnamaradavid.files.wordpress.com/2013/12/et4407_lca_washingmachine1.pdf

[350] Saouter E, van Hoof G. A Database for the Life-Cycle Assessment of Procter & Gamble Laundry Detergents. International Journal of Life Cycle Assessment. 2001;7(2).

[351] Schrödter K, Bettermann G, Staffel T, Wahl F, Klein T, Hofmann T. Phosphoric Acid and Phosphates. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim; 2008.

[352] Lasic E. Sustainable use of washing machine: modeling the consumer behavior related resources consumption in use of washing machines [dissertation]. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftlichen Fakultät, Njemačka, 2014.

[353] Smulders E, Rähse W, von Rybinski W, Steber J, Sung E, Wiebel F. Laundry detergents. In: Smulders, E. (ur.). Weinheim, Njemačka: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2002.

[354] Stamminger R, Barth A, Dörr S. Comparison Between Old and New Washing Maschines. Hauswirtschaft und Wissenschaft. 2005;3:124-131.

[355] Bourrier C, Corsini F, Danthurebandara M, Fuchs K, Olloz S, Poulikidou S, Rufener S, Singh R.Washing Machine. ETH Sustainability Summer School report; Swiss Federal Institute of Technology Zürich; 2001.

[356] Grandjean A, Bineta G, Biereta J, Adnot J, Duplessis B. A functional analysis of electrical load curve modelling for some households specific electricity end-uses. In: 6th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting – EEDAL'11, May 2011, Copenhagen, pp. 271-294.

[357] Vouters M, Rumeau P, Tierce P, Costes S. Ultrasounds: an industrial solution to optimise costs, environmental requests and quality for textile finishing. Ultrasound Sonochemistry. 2004;11:33-38.

[358] Gallego-Juárez JA, Nájera Vázquez de Parga G, Rodriguez Corral G, Vazquez Martinez F, Van der Vlist P. Process and device for continuous ultrasonic washing of textiles. U.S. Patent, nº US 6,266,836 B1, Jul. 31, 2001.

[359] Hladni val. Oprema za pjeskarenje suhim ledom [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.hladnival.hr/i2.php?d=1Lindqvist K, Marcusson A, Karthaeuser J, Hamrefors J. Carbon Dioxide Cleaning Method. US2008/0223406; 2008.

[360] Enviro Blast. How it works [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.enviro-blast.com/itworks.htm#1

[361] Wells SP, Sawford M, Szymczyk WR, Abercrombie EJ, Jenkins SD. Cleaning method and apparatus. US 2015/0128358 A1, United States Xeros Limited, 14 May 2015.

[362] The Florida News Journal. New Washing Machine Tech By Xeros Uses Almost No Water [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.thefloridanewsjournal.com/2014/02/13/new-washing-machine-tech-xeros-uses-almost-no-water

[363] Ladylux. Xeros waterless laundry technology arrives in North America [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.ladylux.com/articles/xeros-waterless-laundry-technology-arrives-in-north-america/

[364] Electronic Products. Washing machine uses plastic beads instead of water, reduces electricity by 47% [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Power_Management/Washing_machine_uses_plastic_beads_instead_of_water_reduces_electricity_by_47.aspx?id=154

[365] Europska komisija. Uredba (EU) br. 259/2012 Europskog parlamenta i Vijeća od 14. ožujka 2012. Službeni list Europske unije; 2012.

[366] Showell MS. Powdered Detergents. Surfactant science series vol. 71, New York: Marcel Dekker, Inc.; 1998.

[367] Yu S, Wang J, Tao J. Generation and Evaluation of Product Life Cycle Scenarios in Conceptual Design, International Conference on Software Knowledge Information Management and Application (SKIMA 2006), December 12-15, ChiangMai, Thailand, 2006.

[368] Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1: goal and scope and inventory analysis. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2008;13(4):290-300.

[369] Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2: impact assessment and interpretation. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2008;13(5):374-388.

[370] Gericke K, Eckert C, Stacey M. What do we need to say about a design method? In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 7: Design Theory and Research Methodology, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.

[371] Cullen JM, Allwood JM. Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. Energy. 2010;35:2059-2069.

[372] Sherwin C, Bhamra T. Beyond Engineering: Ecodesign as a Proactive Approach to Product Innovation. In: Proceedings of EcoDesign '99: First International Symposium on

Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 01.-03.02.1999., Tokyo, Japan; 1999.

[373] Nikander JB, Liikkanen LA, Laakso M. Naturally emerging decision criteria in product concept evaluation. In: International Conference on Engineering Design - ICED 2013; 2013.

[374] Vermaas P, Eckert C. Special issue on "Functional descriptions in engineering". AI-EDAM, 2013;27(3).

[375] Rodriguez Moreno P, Rohmer S, Ma H-W. Analysis between potential relationships between functional analysis and life cycle assessment. Procedia CIRP. 2015;29:390–395.

[376] Srinivasan V, Chakrabarti A. Development of a Catalogue of Physical Laws and Effects Using SAPPhIRE Model. Design Creativity 2010, pp. 123-130. doi: 10.1007/978-0-85729-224-7_17.

[377] Ponn J, Lindemann U, Diehl H, Müller F. Sketching in early conceptual phases of product design: guidelines and tools. In: Hughes JF, Jorge JA. (eds.). EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling; 2004.

[378] Iqbal L, Crossley W, Weisshaar T, Sullivan J. Higher Level Design Methods Applied to the Conceptual Design of an MALE UAV. In:, 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference - AIAA-2008-5908, Victoria, BC, Sep. 10-12.09.2008.

[379] Giachetti RE. A Decision Support System for Material and Manufacturing Process Selection. Journal of Intelligent Manufacturing. 1998;9:265-276.

[380] Midžić I, Marjanović D. Eco design and creativity issues. In: Proceedings of 4th World Conference on Design Research - IASDR2011; Delft, Nizozemska, 31.10.-04.11.2011. Delft: International Association of Societies of Design Research; 2011.

[381] Voland G. Engineering by Design. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice-Hall, 2004.

# PRILOZI

Prilog 1. Anketa studije vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja

| Br. | Anketno pitanje i odgovori sudionika studije |
|---|---|
| 1. | Da li je neki od koncepata dobio mnogo više bodova za odgovor 'Ne mogu procijeniti' od ostala dva odgovora? Ako da, koji? Na kojem mjestu je rangiran?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Da, pranje polimernim kuglicama. 4. mjestu.<br>b. Koncept D, na mjestu 4.<br>c. Koncept E ima najviše neodlučnih odgovora i rangiran je na trećem (#3) mjestu<br>d. Pranje polimernim kuglicama, rangiran je na 4. mjestu.<br>e. Koncept E, razlog - nedovoljno poznavanje koncepta - premalo podataka u opisu, nepoznavanje specifičnosti tehnologije - rangiran na 3. mjestu.<br>f. Da, koncept E, 4. mjesto.<br>g. Koncept D, rangiran je na 2. mjestu.<br>h. Koncept E ima najviše odgovora Ne mogu procijeniti.<br>i. Da, koncept E. Rangiran je na trećem mjestu.<br>j. Ni jedan od koncepata ih nije dobio.<br>k. Koncept D je dobio dosta bodova (26) jer je nepoznat njegov detaljan rad. |
| 2. | Da li je neki od koncepata dobio mnogo više bodova za odgovor 'Ne, naprotiv'? Ako da, koji? Na kojem mjestu je rangiran?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Da, klasična perilica. 5. mjesto.<br>b. Koncept E, na mjestu 5.<br>c. Koncept D ima najviše negacijskih odgovora i rangiran je na posljednjem (#5) mjestu. Koncept A ima jedan negacijski odgovor manje (#4) no ima znatno više afirmacijskih odgovora.<br>d. Orbit - 5. Mjesto.<br>e. Koncept A. Rangiran na posljednjem mjestu - predstavlja referencu za sve ostale uređaje - svi ostali bi trebali biti unaprijeđeni u odnosu na tradicionalne perilice.<br>f. Koncept D, rangiran na 5. mjestu. Isti broj odgovora kao i ne mogu procijeniti.<br>g. Koncept B, na 5. mjestu.<br>h. Koncept D (22 Ne naprotiv). Rangiran na 5-tom mjestu.<br>j. Ne.<br>j. Koncepti A i B su dobili dosta bodova za odgovor "Ne, naprotiv", no rangiranje nije po meni moguće na predloženi način. Zbog toga, što koncepti A i B imaju prema bodovima najviše "Da, izrazito" bodova, a i zbog toga što imaju najviše odgovora "Ne, naprotiv" ne mogu provesti rangiranje koncepata na ovaj način.<br>k. Koncept A jer je koncept dosta zastario i ne nudi ništa novo naspram ostalih koncepata. |
| 3. | Da li je neki od koncepata dobio mnogo više bodova za odgovor 'Da, izrazito'? Ako da, koji? Na kojem mjestu je rangiran?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Ne. Svi su dobili podjednako "Da, izrazito" bodova (od 12-19).<br>b. Koncept C, na mjestu 1.<br>c. Koncept B se izdvojio sa najviše afirmacijskih odgovora i rangiran je na prvom mjestu (#1), no koncept A ima samo 4 manje pozitivnih odgovora a rangiran je na četvrtom mjestu (zbog velikog broja negacijskih odgovora).<br>d. Eco-Bubble - 1. mjesto.<br>e. Ne.<br>f. Koncept B, prvo mjesto.<br>g. Koncept C, na 1. mjestu.<br>h. Koncept A najviše odgovora Da izrazito. Na prvom mjestu je rangiran.<br>i. Da, koncept B (Eco-Bubble), rangiran je na prvome mjestu. |

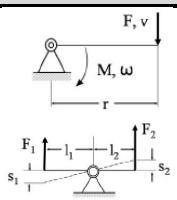
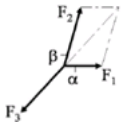
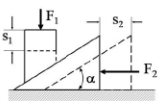
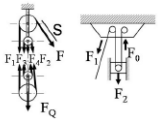
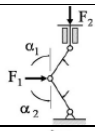
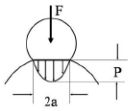
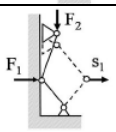
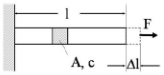
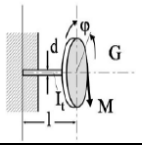
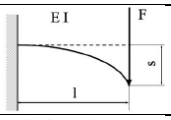
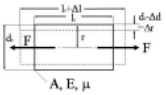
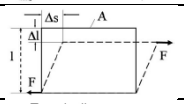
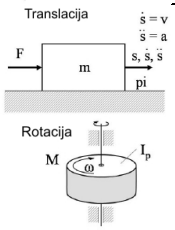
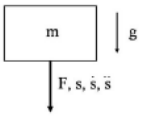
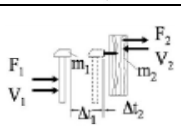
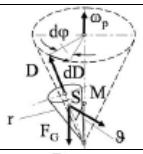
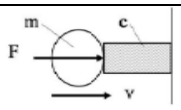
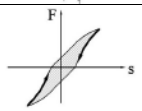
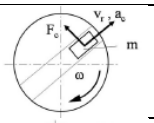
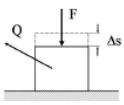
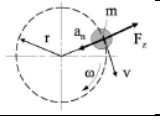
| | |
|---|---|
| | j. Koncepti A, B, C su dobili podosta odgovora "Da, izrazito".<br>k. Koncept A dobio je najviše (25 bodova) iz razloga |
| 4. | Razlikuje li se rezultat rangiranja koncepata od onoga što ste možda očekivali s obzirom na vlastitu procjenu ekologičnosti ovih 5 koncepata (bez koristite ikakvu metodu)? Što procjenjujete kako bi vaša lista rangiranja koncepata izgledala? Koje bi bile razlike i sličnosti s rangiranjem koje ste dobili korištenjem ove metode?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Najbolji se ne razlikuje, najlošiji za jedno mjesto. Sredina se jako razlikuje.<br>b. Prvo i zadnje mjesto odgovaraju mojoj procjeni. 2, 3 i 4 su različita<br>c. Prva dva mjesta su rangirana identično a iznenadio me je rezultat koncepta 4 (kojeg sam ipak očekivao na višem mjestu)<br>d. 1. Mjesto je ispalo identično s početnom vlastitom procjenom. Jedino iznenađenje je rang klasične perilice koja se popela na visoko drugo mjesto ekologičnosti, što možda i nije čudno, s obzirom da se ta tehnologija koristi dugo vremena i vjerojatno je isplativija i okolišu prihvatljivija od razvoja novih tehnologija.<br>e. Koncept D i B su zamijenili mjesta! Korištenjem tablice i kriterija proizašle su brojne nepotpune strane koncepta D što je značajno utjecalo na konačne rezultate.<br>f. Razlikuje, odnosno niti jedan proizvod nije isto rangiran. Osobno bi sad vjerojatno niže rangirao koncept D, a više koncept E.<br>g. Dobiveni rezultat se razlikuje od pretpostavke najviše za koncept E, kojeg sam bez ocjene stavila na 5. mjesto, a nakon ocjenjivanja na 3. mjesto. Mislim da su mi rezultati nakon ocjenjivanja vjerodostojniji i ne bih ih mijenjala.<br>h. Razlikuje se. Očekivao sam da će drugi koncept biti na prvom mjestu. Moja lista je slična prema bodovnoj. Razlika je u mjestu rangiranja koncepta B, koncepta C, koncepta A.<br>i. Razlika rangiranja prema vlastitoj procjeni ekologičnosti i prema metodi je skoro ista; razlika se odnosi da su prema metodi koncept C i koncept E zamijenili mjesta. Prema metodi koncept je na trećem mjestu, a koncept C je na četvrtom mjestu, dok je prema vlastitoj procjeni situacija obrnuta. Ostali koncepti imaju ista mjesta prema metodi i prema vlastitoj procjeni.<br>j. Ima nekih sličnosti, no zbog puno odgovora sa "Ne mogu procijeniti", po ovoj metodi je teško dati konkretne zaključke. Ako bi prvi kriterij bio odgovori "Da, izrazito", koncepti A i B bi došli na prva dva mjesta na rang listi. No to je i zbog toga što su ti proizvodi i podosta korisni i poznati korisnicima. Koncepti C, D i E koriste neke nove tehnologije zbog kojih je teško bilo procijeniti neka pitanja u anketi vrednovanja.<br>k. Teško je opisati riječima, preporučam bolje razgovorom objasniti način odabira. |
| 5. | Mislite li da su odgovori ‘Da, izrazito’, ‘Ne mogu procijeniti’ i ‘Ne, naprotiv’ u redu za ovakav tip ocjenjivanja ekologičnosti koncepata i rangiranje koncepata?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Da, izrazito :)<br>b. ✗<br>c. Vjerujem da bi metodologija sa 4 moguće vrijednosti bila povoljnija kako bi se minimizirala mogućnost neodlučnih odgovora<br>d. ✗<br>e. ✗<br>f. Vjerojatno, ali je potrebno više podataka o proizvodu,<br>g. Ne, zbog nedovoljne gradacije, teško je uvijek biti za totalno da ili totalno ne.<br>h. ✗<br>i. Mislim da su u redu, možda bi bilo bolje da ima među kategorija između "Da, izrazito" i "Ne mogu procijeniti" i između "Ne, naprotiv" i "Ne mogu procijeniti".<br>j. Po meni je možda trebalo uvesti 5 odgovora s tim da bi se između 1 i 2, te 2 i 3 odgovora, dodalo još 2 među odgovora. Time bi gradacija po meni bila finija.<br>k. ✗ |
| 6. | Jeste li imali poteškoća sa ocjenjivanjem koncepata prema izjavama o konceptima? Da li su izjave o konceptima dovoljno detaljne da bi mogli donijeti precizan zaključak odnosno odgovor? Ili su pak te izjave o konceptima previše opisne i nedovoljno konkretne?<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Klasika i Eco-Bubble su OK, Orbit je super, ali UZV i polimerne kuglice možda malo detaljnije bi trebalo opisati |

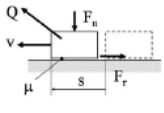
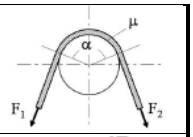
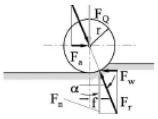
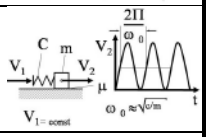
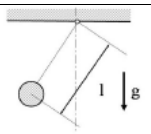
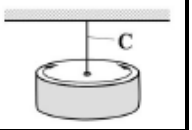
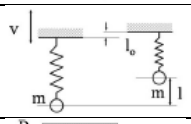
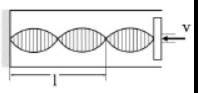
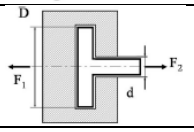
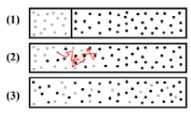
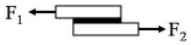
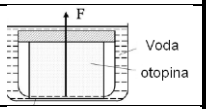
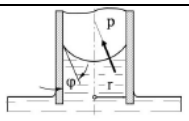
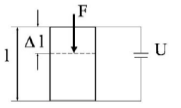
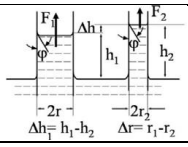
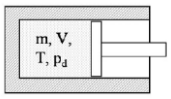
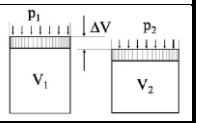
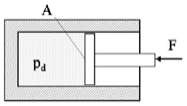
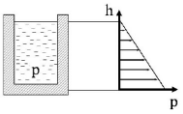
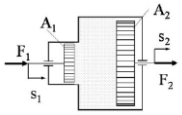
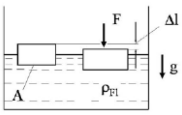
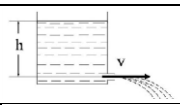
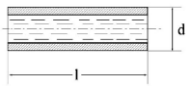
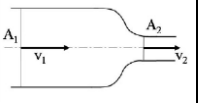
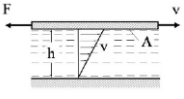
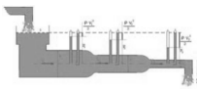
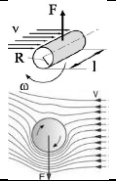
| | |
|---|---|
| | b. ✗<br>c. Smatram da je potrebno više vremena za upoznavanje koncepta kako bi se dali relevantniji odgovori.<br>d. ✗<br>e. ✗<br>f. Izjave su nedovoljno konkretne (fale specifikacije npr.) i nedostaje slika proizvoda.<br>g. Imala sam teškoća zbog nedovoljno dobro opisanih novih koncepata, potreban je bolji opis i slika.<br>h. ✗<br>i. Neke izjave su nejasne i dvosmislene, te je bilo teško odabrati pripadajući odgovor. Ili neke izjave trebaju biti jasnije ili vidi odgovor pod 5.<br>j. Najviše poteškoća predstavljaju koncepti C, D i E kod kojih je zbog novih tehnologija teško bilo procijeniti neke odgovore. Smatram da je kod njih trebalo dati detaljniji opis tehnologije pranja.<br>k. ✗ |
| 7. | Mislite li da biste mogli koristiti ovu ili nekakvu sličnu metodu u poduzeću u kojem radite? Da li koristite neku metodu za potrebe ocjenjivanja ekologičnosti koncepata? Ako da, molim vas opišite ukratko metodu i način ocjenjivanja koncepata.<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. Proizvodi koje proizvodima nisu toliko kompleksni da bi ekologija bila problem pri eksploataciji ali sam proizvodni proces možda (emulzije).<br>b. ✗<br>c. Vjerujem da bi mogli koristiti sličnu metodu u trenutnoj firmi, no ne koristimo nikakve metode.<br>d. ✗<br>e. ✗<br>f. Nažalost ne.<br>g. Nažalost ne koristimo nikakvu ovakvu metodu, iako bi se mogla primijeniti.<br>h. ✗<br>i. Ne koristimo nikakvu metodu.<br>j. Ne koristim nikakvu metodu trenutno na poslu za ocjenjivanje ekologičnosti.<br>k. ✗ |
| 8. | Hvala vam na trudu i vašim odgovorima. Dodatna pitanja u vezi ovih 7 pitanja, metodi, konceptima, njihovim opisima ili pak načinu provođenja ovog istraživanja, možete postaviti u nastavku na ovoj stranici. Svi komentari su dobrodošli i koristit će se za daljnje unapređivanje istraživanja.<br>*Odgovori sudionika studije:*<br>a. ✗<br>b. Koncepti su zanimljivi i nadam se da će metode ocjenjivanja pomoći u odabiru najboljeg! Zanima me konačni rezultat.<br>c. Za vjerodostojnije rezultate potrebno je dulji period za istraživanje i možda rigoroznija metoda ocjenjivanja [-2, -1, 0, 1, 2]<br>d. Trebalo bi dati malo više informacija o metodi pranja polimernim kuglicama, ultrazvukom i ORBIT metodi; npr.: koliko bi koštala takva perilica, vijek trajanja, proces proizvodnje itd.<br>e. ✗<br>f. Drugi puta detaljnije skice i opisi proizvoda bi mi uvelike pomogli, pogotovo za koncepte D i E, s obzirom da trenutni tekst ne otkriva puno toga.<br>g. ✗<br>h. Teško je donijeti realnu procjenu koncepta. Nedovoljno poznavanje tehnologije i stvarnog rezultata pranja kod koncepta C, koncepta , te koncepta E. Koncept D je teško zamisliti, kako bi proizvod stvarno izgledao. Potrebno je stručno znanje za manipulaciju s tekućim dušikom.<br>i. ✗<br>j. Mislim da je metoda dobra uz eventualno neka poboljšanja: 1. trebalo bi uvesti 5 odgovora, kako sam napisao 2. rangiranje provesti sa drugačijim prioritetom odgovora. |

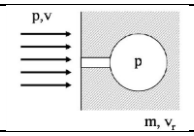
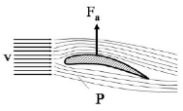
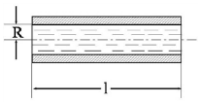
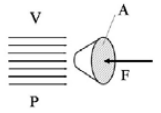
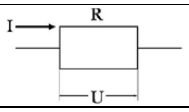
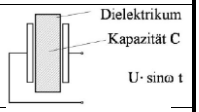
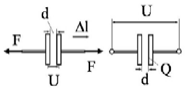
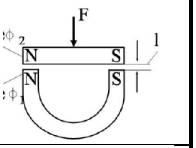
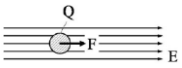
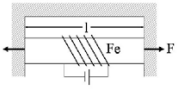
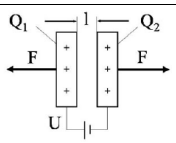
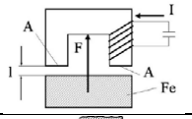
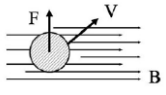
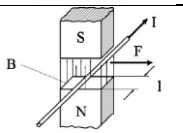
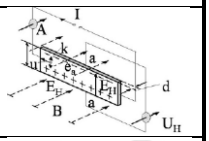
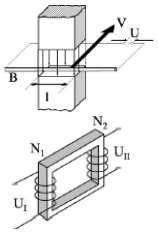
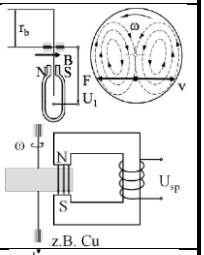
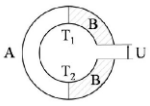
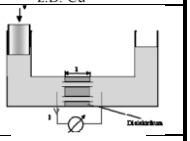
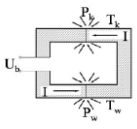
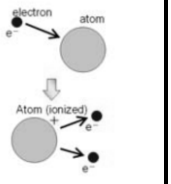
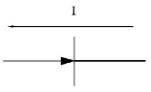
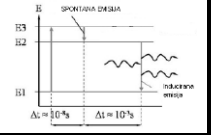
| | |
|---|---|
| | k. Treba prilikom istraživanja dati više detalja, način izrade, liste dijelova, sheme rada, liste materijala. |

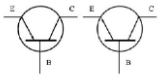
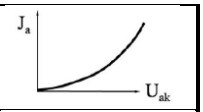
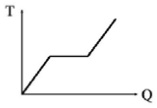
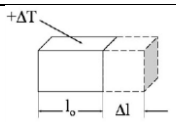
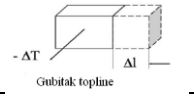
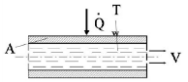
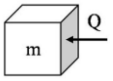
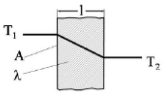
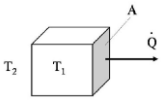
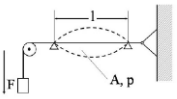
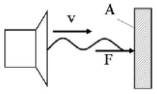
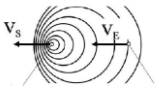
Oznake: 1.-8. – Redni broj anketnog pitanja; a., b., c., d., e., f., g., h., i., j., k. – Oznaka sudionika studije; ✗ - izostanak odgovora sudionika studije.

Prilog 2. Primjer tablice fizikalnih efekata [320]

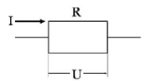
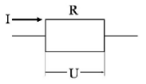
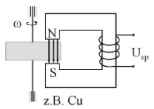
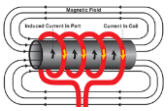
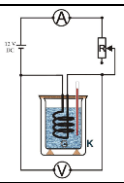
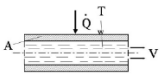
| Grana fizike | Broj | Efekt | Skica | Broj | Efekt | Skica |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Statika krutih tijela | 01 | Poluga |  | 05 | Verižni poligon |  |
| | 02 | Klin |  | 06 | Koloturnik |  |
| | 03 | Kutna poluga |  | 07 | Elastična i tlačna deformacija |  |
| | 04 | Preko mrtve točke |  | | | |
| Elastičnost čvrstih tijela | 08 | Elastično rastezanje |  | 11 | Torzija |  |
| | 09 | Elastično savijanje |  | 12 | Suženje poprečnog presjeka |  |
| | 10 | Smicanje |  | | | |
| Dinamika | 13 | Inercija (tromost) |  | 18 | Gravitacija |  |
| | 14 | Sudar |  | 19 | Moment precesije |  |
| | 15 | Elastični sudar |  | 20 | Histereza (elastične deformacije) |  |
| | 16 | Corriolisova sila |  | 21 | Plastična deformacija |  |
| | 17 | Centrifugalna sila |  | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Trenje | 22 | Coulombovo trenje |  | 24 | Obuhvatno trenje |  |
| | 23 | Trenje kotrljanja |  | 25 | Stick-slip efekt |  |
| Titranje | 26 | Gravitacijsko njihalo |  | 28 | Vlastita frekvencija |  |
| | 27 | Rezonancija |  | 29 | Stojni val |  |
| Molekularne sile | 30 | Kohezija čvrstih tijela |  | 34 | Difuzija |  |
| | 31 | Adhezija |  | 35 | Osmoza |  |
| | 32 | Kapilarni tlak |  | 36 | Piezo efekt |  |
| | 33 | Kapilarno djelovanje (učinak) |  | | | |
| Idealni plinovi | 37 | Gay-Lussacov zakon |  | 38 | Boile-Mariotteov zakon |  |
| Tekućine u mirovanju | 39 | Tlačna sila |  | 41 | Atmosferski tlak |  |
| | 40 | Širenje tlaka |  | 42 | Uzgon |  |
| Strujanje | 43 | Toricelliev zakon |  | 48 | Pad tlaka (u cjevovodu) |  |
| | 44 | Jednadžba kontinuiteta |  | 49 | Viskozno trenje |  |
| | 45 | Bernullieva jednadžba |  | 50 | Magnusov efekt |  |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 46 | Usporni tlak (pretlak) |  | 51 | Uzgon profila |  |
| | 47 | Hagen-Poiseuille |  | 52 | Otpor strujanja |  |
| Elektricitet | 53 | Ohmov zakon |  | 57 | Dielektrični gubitak topline |  |
| | 54 | Električni naboj |  | 58 | Magnetsko privlačenje |  |
| | 55 | Coulombova sila |  | 59 | Magneto_ strikcija |  |
| | 56 | Elektrostatsko privlačenje |  | | | |
| Elektromagnetizam | 60 | Elektro-magnetsko privlačenje |  | 63 | Lorentzova sila |  |
| | 61 | Biot-Savartov zakon |  | 64 | Hallov efekt |  |
| | 62 | Indukcija |  | 65 | Vrtložna struja |  |
| Vođenje električne struje | 66 | Toplinski efekt |  | 70 | Elektrokinetički efekt |  |
| | 67 | Peltierov efekt |  | 71 | Ionizacija sudarom molekula plina |  |
| | 68 | Poluvodič |  | 72 | Laser |  |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 69 | Tranzistor |  | 73 | Izbijanje u vakuumu |  |
| Termodinamika | 74 | Promjena agregatnog stanja |  | 76 | Toplinsko rastezanje |  |
| | 75 | Anomalija toplinskog rastezanja |  | | | |
| Vođenje topline | 77 | Konvekcija |  | 79 | Akumulacija topline |  |
| | 78 | Kondukcija |  | 80 | Toplinsko zračenje (radijacija) |  |
| Akustika | 81 | Struna (žica) |  | 83 | Zvučni tlak |  |
| | 82 | Dopplerov efekt |  | | | |

## Prilog 3. Lanac fizikalnih efekata *L1* koncepta pranja rublja toplom vodom i deterdžentom

| Br. | Fizikalni efekt | Grana fizike | Fizikalni zakon | Jednadžba | Opis | Fizikalne dimenzije | Oznaka | Jedinica | Ulazne fizikalne veličine | Izlazne fizikalne veličine | Slika |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Prolaz struje vodičem | Elektricitet | Ohmov zakon | $I=U/R$ | Pad napona U na električnom vodiču proporcionalan je jakosti električne struje koja njime protječe. | | | | $U$ | $I$ |  |
| | | | | | $U$ - napon električne struje (V) | Napon električne struje | $U$ | V | $R$ | | |
| | | | | | $I$ - jakost električne struje (A) | Jakost električne struje | $I$ | A | | | |
| | | | | | $R$ - otpor | Otpor | $R$ | Ω | | | |
| 2. | Pobuda napona | Elektricitet | Ohmov zakon | $U=I*R$ | Pad napona U na električnom vodiču proporcionalan je jakosti električne struje koja njime protječe. | | | | $I$ | $U$ |  |
| | | | | | $U$ - napon električne struje (V) | Napon električne struje | $U$ | V | $R$ | | |
| | | | | | $I$ - jakost električne struje (A) | Jakost električne struje | $I$ | A | | | |
| | | | | | $R$ - otpor | Otpor | $R$ | Ω | | | |
| 3. | Vrtložna struja | Elektromagnetizam | Vrtložna struja | $U = kB*(d\omega/dt)$ | Inducirana struja u vodiču koji je izložen promjenjivom magnetskom polju. Pri tome se javlja magnetsko polje koje radi protiv glavnog magnetskog polja. Vrtložna struja uzrokuje zagrijavanje jezgre (grijača). | Napon električne struje | $U$ | V | $U$ | $\omega$ |  |
| | | | | | $U$ - napon električne struje (V) | Kutna brzina | $\omega$ | 1/s, Hz | | $B$ | |
| | | | | | $k$ - konstanta materijala (npr. bakar...) | | | | | | |
| | | | | | $B$ - magnetska indukcija (T) | | | | | | |
| | | | | | $\omega$ - kutna brzina (1/s, Hz) | | | | | | |
| | | | | | $t$ - vrijeme (s) | | | | | | |
| 4. | Zagrijavanje indukcijom | Elektromagnetizam | Vrtložna struja | $Q = const\ B^2\kappa\omega^2$<br>$\omega = 2\pi f$ | U električnim vodičima koji se nalaze u promjenjivom magnetskom polju dolazi do zagrijavanja zbog pojave vrtložnih struja. | Vlasitita frekvencija | $f$ | Hz | $B$ | $Q$ |  |
| | | | | | $B$ - magnetska indukcija (T) | Magnetska indukcija | $B$ | T | $\omega$ | | |
| | | | | | $\kappa$ - električna provodljivost (konduktivitet) (S/m) | | | | | | |
| | | | | | $\omega$ - kutna brzina (1/s, Hz) | | | | | | |
| | | | | | $f$ - frekvencija (Hz) | | | | | | |
| 5. | Jouleova toplina | Termodinamika | Jouleova toplina | $Q = I^2*R*t$ | U vodiču s čisto omskim otporom sva energija električne struje pretvori u toplinu. Brzina generiranja topline razmjerna je kvadratu jakosti struje. | Jakost električne struje | $I$ | A | $I$ | $Q$ |  |
| | | | | | $Q$ - Jouleova toplina (J) | Električni otpor | $R$ | Ω | $R$ | | |
| | | | | | $I$ - jakost električne struje (A) | | | | | | |
| | | | | | $R$ - električni otpor (Ω) | | | | | | |
| | | | | | $t$ - vrijeme (s) | | | | | | |
| 6. | Zagrijavanje vode | Vođenje topline | Konvekcija | $Q = \alpha A(T_1-T_2)$ | Opisuje istovremenost makroskopskog i mikroskopskog prijenosa energije (topline) kod fluida. | Toplina | $Q$ | J | $Q$ | $T_2$ |  |
| | | | | | $\alpha$ - koeficijent prijenosa topline (1/K) | Temperatura | $T$ | K | | | |
| | | | | | $A$ - površina grijača (m²) | | | | | | |
| | | | | | $T_1$ - temperatura grijača (K) | | | | | | |
| | | | | | $T_2$ - temperatura vode (K) | | | | | | |
| | | | | | $Q$ - toplina zbog razlika temperature grijača i vode (J) | | | | | | |

## POPIS PROGRAMSKIH ALATA

Pri izradi doktorske disertacije i za potrebe istraživanja korišteni su sljedeći programski paketi i alati:

- Adobe Photoshop, Adobe Systems Software Ireland Ltd. (http://www.adobe.com/hr/products/photoshop/free-trial-download.html)
- CorelDRAW, Corel (www.corel.com)
- EcoInvent, Ecoinvent Association (www.ecoinvent.org)
- FastStone Image Viewer, FastStone Soft (http://www.faststone.org/)
- Gadwin Print Screen, Gadwin Systems (https://www.gadwin.com/printscreen/)
- IHS Goldfire, IHS Markit (www.ihsmarkit.com)
- Microsoft Office, Microsoft (https://www.microsoft.com/en-us/download/office.aspx)
- Production Inspiration, AULIVE (http://www.productioninspiration.com/)
- SimaPro, PRé Sustainability (https://simapro.com/)

# ŽIVOTOPIS

Ida Midžić je rođena u Zadru 1985. godine. Završila je zagrebačku Školu Primijenjene umjetnosti i dizajna, a magistrirala je strojarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu 2009. godine. Završila je smjer računalno inženjerstvo na preddiplomskom, te smjer računalom integriranog razvoja proizvoda na diplomskom studiju strojarstva. Dobitnica je Rektorove nagrade Sveučilišta u Zagrebu u ak. godini 2008./2009. za rad na području primjene formalnih gramatika u razvoju proizvoda. Ida je bila znanstveni novak na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Njezino istraživanje dio je projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske *Modeli i metode upravljanja znanjem u razvoju proizvoda* te projekta *Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development*. U nastavnim aktivnostima Katedre za konstruiranje i razvoj proizvoda Ida je sudjelovala izvođenjem vježbi iz kolegija *Oblikovanje pomoću računala, Programiranje i algoritmi, Razvoj proizvoda* i *European Global Product Realization.* Sudjelovala je u organizaciji konferencije *International Design Conference – DESIGN* od 2009. do 2015. godine. Trenutno završava poslijediplomski studij Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, smjer Teorija konstrukcija. Ida je članica organizacije *The Design Society*. Sudjeluje na projektu *DRAWDOWN* koji se bavi razvojem rješenja za usporavanje klimatskih promjena. Objavila je rad u znanstvenom časopisu s međunarodnom recenzijom, sedam radova na međunarodnim konferencijama te dva tehnička izvještaja. Radila je u tvrtci RASCO d.d., a danas je viši razvojni inženjer u tvrtci GlobalLogic d.d. u Zagrebu. Tečno piše i govori engleski jezik te uči njemački jezik.

## BIOGRAPHY

Ida Midžić is born in Zadar, Croatia in 1985. She finished the Zagreb School of Applied Arts and Design in 2003 and graduated in mechanical engineering from the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb (FAMENA) in 2009. She specialized in Computer Aided Engineering and Computer Integrated Product Development. Her work on application of formal grammars in product development was awarded University of Zagreb Rector's Award in academic year 2008/2009. Ida was promoted to Bachelor degree in 2008, and Master degree in 2009. Ida was a researcher and teaching assistant at Chair of Design and Product Development (FAMENA). Her obligations at the Chair included lecturing and teaching undergraduate and graduate mechanical engineering students, faculty courses *Computer Aided Design, Programming and algorithms, Product Development* and *European Global Product Realization.* She enrolled in postgraduate doctoral study at FAMENA, field of specialisation Theory of Structures. Her research is part of research projects *Models and Methods of Knowledge Management in Product Development* and *Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development* supported by Ministry of Science, Education and Sports, Republic of Croatia and Croatian Science Foundation. She participated in organization of *International Design Conference – DESIGN* between 2009 and 2015. Ida is member of *The Design Society*. She participates in project *DRAWDOWN* devoted to finding solutions to climate change. Ida Midžić published a journal article, seven conference papers, and two technical reports. She worked in RASCO d.d., and today she is senior software developer in GlobalLogic in Zagreb. She is fluent in English, in speech and in writing, and is learning German language.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

*Znanstveni radovi u časopisima:*

1.) Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Eco-Evaluation In Conceptual Design Phase – A Case Study. *Transactions of FAMENA*. 2015;39(3):47-60. (članak, znanstveni)

*Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:*

1.) Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Validation of the Eco-transformity Method. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 14th International Design Conference - DESIGN 2016; Dubrovnik, Hrvatska, 16.-19.05.2016. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2016.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

2.) Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Eco-evaluation of Technical Systems in the Conceptual Phase. In: Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design - ICED15, Vol. 5: Design Methods and Tools – part 1; Milano, Italija, 27.-30.07.2015. Milano: The Design Society; 2015.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

3.) Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Energy Quality Hierarchy and "Transformity" in Evaluation of Product's Working Principles. In: Lien T, editor. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering - CIRP LCE 2014; Procedia CIRP, Vol. 15; Trondheim, Norveška, 18.-20.06.2014. Trondheim: Elsevier B.V.; 2014.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

4.) Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Using ecodesign guidelines for concept evaluation: Findings from an experiment. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 13th International Design Conference - DESIGN 2014; Dubrovnik, Hrvatska, 19.-22.05.2014. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i

brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2014.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

5.) Midžić, Ida; Marjanović, Dorian. Estimation of environmental effects in early product development. In: Proceedings of the 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research - IASDR13; Tokyo, Japan, 26.-30.08.2013. Tokyo: International Association of Societies of Design Research/Japanese Society for the Science of Design/Japan Society of Kansei Engineering/Science Council of Japan; 2013.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

6.) Midžić, Ida; Marjanović, Dorian. Eco design and creativity issues. In: Proceedings of 4th World Conference on Design Research - IASDR2011; Delft, Nizozemska, 31.10.-04.11.2011. Delft: International Association of Societies of Design Research; 2011.
(poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

7.) Midžić, Ida; Stanković, Tino; Marjanović, Dorian. Context-free grammar based rules for component-level product structure modelling. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 11th International Design Conference - DESIGN 2010; Dubrovnik, Hrvatska, 17.-20.05.2010. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2010.
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

*Druge vrste radova:*

1.) Marjanović, Dorian; Štorga, Mario; Bojčetić, Nenad; Pavković, Neven; Stanković, Tino; Midžić, Ida. E4911 TRENIN project report PRO1, 2010.
(izvješće)

2.) Marjanović, Dorian; Štorga, Mario; Bojčetić, Nenad; Pavković, Neven; Stanković, Tino; Midžić, Ida. E4911 TRENIN project report PRO2, 2010.
(izvješće).

*(stranica namjerno ostavljena prazna)*