



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Željko Špiljar

**GENERIČKA METODA ZA MODELIRANJE
USPJEŠNOSTI SUSTAVA MEHANIČKE
VENTILACIJE I ODIMLJAVANJA
PODZEMNIH GARAŽA**

DOKTORSKI RAD

Mentor

Prof.dr. Daniel Rolph Schneider

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Željko Špiljar

**GENERIC METHOD TO ESTIMATE
EFFECTIVENESS OF MECHANICAL
VENTILATION AND SMOKE EXTRACTION
SYSTEMS IN UNDERGROUND CAR PARKS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor

Prof.dr. Daniel Rolph Schneider

Zagreb, 2026.

***Tko studira
a ne umre
taj će diplomirati***

prof. Marko Majcen, listopad 1989.
uvodno predavanje kolegija Turbostrojevi I, FSB Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Danielu Rolphu Schneideru, kolegi još iz studentskih klupa, koji me jedne davne večeri u „Pod starim krovovima” nagovorio na upis doktorskog studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te me strpljivo usmjeravao i poticao tokom studija.

Zahvaljujem i predsjedniku te članovima povjerenstva, prof. dr. sc. Igoru Balenu, prof. dr. sc. Željku Tukoviću i izv. prof. dr. sc. Miodragu Drakuliću, koji su svojim stručnim i dobronamjernim primjedbama, komentarima i naputcima pridonijeli kvaliteti ovoga rada.

Sada, pred kraj svoje profesionalne karijere, kada već dogorijeva žbun života, zahvaljujem svojim starijim kolegama inženjerima Stjepanu Cariću, Branku Šegotiću, Milenku Matutinoviću i Zoranu Bakalaru. Meni, tada mladom inženjeru, svojim su znanjem i ponašanjem pokazali što znači biti inženjer strojarstva. Nažalost, neki od njih više nisu s nama, a ja se skromno nadam da bih ih ovim radom barem malo učinio ponosnima jer bez njih ne bi bilo ni ovoga rada.

Zahvaljujem i svojim profesorima Tonku Ćurku i Srećku Švaiću, koji su nakon obrane mogega diplomskog rada došli k nama doma na proslavu i time moje roditelje učinili još ponosnijima, kao i svojem dragom profesoru i mentoru na diplomskom studiju, prof. dr. sc. Vladimiru Kohariću.

Posebno zahvaljujem mladom kolegi Robertu Keseru na podršci i pomoći.

Zahvaljujem svojim najdražima, Franu i Dori Heleni, što su uljepšali moj život i što me svakoga dana vesele, iako nisam uvijek bio najbolji tata kakav sam mogao i trebao biti. Želim im svu sreću u životu s njihovim Tamarom i Lukom, a možda će im i ovaj rad poslužiti kao putokaz da se jednoga dana i sami odvaže na isti korak.

Za svoju Sančicu nemam dovoljno riječi zahvale za njezinu ljubav, potporu, razumijevanje i sve oproste još od kasnih osamdesetih godina prošloga stoljeća, kada sam tokom predavanja iz Matematike I skupio hrabrost da joj se obratim. Tada nije prošlo baš onako kako sam zamislio, ali su se, na moju sreću, naši putevi ipak trajno spojili.

Na kraju zahvaljujem svojim dedama Lojzeku i Imbriću te bakama Barici i Jagici, koji su me neizmjereno voljeli i razmazili.

I, naravno, mama i tata – ovo je za vas.

Jednoga ćemo dana svi zajedno proslaviti ovaj trenutak

SAŽETAK

Za ventilaciju i mehaničko odimljavanje podzemnih garaža primjenjuju se sustavi s ventilacijskim kanalima, sustavi sa središnjim odsisnim ventilatorima te sustavi s potisnim ventilatorima. Pri ventilaciji njihova je zadaća uklanjanje ugljikova monoksida i drugih štetnih plinova nastalih radom vozila, a u slučaju požara odvođenje dima i produkata izgaranja.

Postojeća ispitivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža pretpostavljaju određivanje snage i položaja požara te definiranje početnih i rubnih uvjeta. Do uključenja sustava mehaničkog odimljavanja analiziraju se razvoj požara te širenje i stratifikacija dima u prostoru garaže, a nakon njegova uključenja vrijeme potrebno za uklanjanje dima. Postojećim metodama analiziraju se i brzina strujanja dima te polja nepokretnog dima, odnosno zone u kojima su brzine njegova strujanja vrlo male ili zanemarive. Međutim, uspješnost sustava može se jednoznačno odrediti samo u područjima zahvaćenima dimom, dok primjena istog pokazatelja u preostalom dijelu garaže nije moguća. Znanstvena istraživanja uspješnosti sustava ventilacije podzemnih garaža malobrojna su jer je većina istraživanja usmjerena na mehaničko odimljavanje u slučaju požara.

U istraživanju se polazi od hipoteze da je razvojem generičke metode moguće odrediti uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža neovisno o odabranom tipu sustava i zadanoj arhitekturi podzemne garaže. Cilj je istraživanja razviti navedenu metodu, utvrditi pokazatelje uspješnosti te analizirati utjecaj uspješnosti sustava na uvjete evakuacije korisnika i intervencije vatrogasnih postrojbi.

Istraživanje je provedeno pregledom znanstvene i stručne literature, terenskim istraživanjem, numeričkim modeliranjem, ispitivanjima hladnim dimom i analizom studija slučaja. Razvijena metoda obuhvaća zasebno određivanje uspješnosti ventilacije i mehaničkog odimljavanja, pri čemu se u oba slučaja podzemna garaža analizira kao cjelina. Pri određivanju uspješnosti ventilacije pretpostavlja se da je cijeli volumen garaže onečišćen štetnim i toksičnim plinovima. Uspješnost se određuje na temelju vremena potrebnog za uklanjanje onečišćenog zraka, promjene koncentracije ugljikova monoksida te površine i rasporeda polja nepokretnog zraka. Pri određivanju uspješnosti mehaničkog odimljavanja pretpostavlja se da je cijeli volumen garaže ispunjen dimom, čime se uklanja ovisnost rezultata o karakteristikama i položaju požara. Uspješnost se određuje na temelju vremena potrebnog za uklanjanje dima, njegove raspodjele, vidljivosti te površine i rasporeda polja nepokretnog dima. Metoda se primjenjuje numeričkim modeliranjem, dok se pri određivanju uspješnosti mehaničkog odimljavanja može primijeniti i u ispitivanjima vrućim ili hladnim dimom.

Rezultati istraživanja pokazali su da kapacitet ventilatora sam po sebi nije dovoljan pokazatelj uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja. Za uspješno djelovanje sustava potrebno je osigurati uklanjanje onečišćenog zraka i dima iz podzemne garaže. Utvrđeno je i da nepovoljan oblik prostora i arhitektonske prepreke mogu uzrokovati nastanak povezanih polja nepokretnog zraka pri ventilaciji te polja nepokretnog dima pri mehaničkom odimljavanju. Usporedba rezultata numeričkog modeliranja, ispitivanja hladnim dimom i studija slučaja potvrdila je primjenjivost razvijene metode, dok su rezultati istraživanja potvrdili postavljenu hipotezu.

Razvijena metoda omogućuje jednoznačno određivanje uspješnosti različitih sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja te njihovu međusobnu usporedbu, pri čemu se podzemna garaža promatra kao cjelina. Dobiveni rezultati mogu se koristiti i za analizu vidljivosti evakuacijskih znakova te uvjeta za evakuaciju korisnika i intervenciju vatrogasnih postrojbi.

Ključne riječi: podzemna garaža, ventilacija, mehaničko odimljavanje, požar, evakuacija

EXTENDED SUMMARY

Ducted ventilation systems, systems with central extract fans, and jet fan systems are used for ventilation and mechanical smoke extraction in underground car parks. These systems remove carbon monoxide and other harmful gases generated by vehicle operation and, in the event of fire, extract smoke from the underground car park. Each system concept has specific advantages and limitations. System effectiveness is important for maintaining acceptable air quality and, under fire conditions, for providing suitable conditions for user evacuation and firefighting intervention.

Existing methods for determining the effectiveness of mechanical smoke extraction systems require the heat release rate and location of the fire, together with the initial and boundary conditions, to be defined in advance. Before the mechanical smoke extraction system is activated, fire development, smoke spread, and smoke stratification are analysed. After activation, system effectiveness is assessed based on the time required to remove smoke from the underground car park. Smoke flow velocity and stagnant smoke zones, defined as areas in which smoke flow velocity is very low or negligible, may also be analysed. However, system effectiveness can be assessed only in areas reached by smoke, since the same indicator cannot be applied to areas that remain unaffected by smoke during the analysis. The results therefore depend on the selected fire scenario. Scientific research into the effectiveness of ventilation systems in underground car parks is limited, as most studies focus on mechanical smoke extraction under fire conditions.

The research tests the hypothesis that a generic method can be developed for determining the effectiveness of ventilation and mechanical smoke extraction systems regardless of the selected system type and the architectural layout of the underground car park. The objectives are to develop such a method, identify the relevant effectiveness indicators, and analyse the influence of system effectiveness on the conditions for user evacuation and firefighting intervention.

The research combined a review of scientific and technical literature, field investigations, numerical modelling, cold smoke testing, and case study analysis. Field investigations covering 71 underground car parks provided data on installed ventilation and mechanical smoke extraction systems, associated active fire protection measures, evacuation signage, and warning systems. Numerical modelling results, cold smoke test results, and case study data were used to develop and validate the method and to compare its results with those obtained using existing approaches. The developed method evaluates ventilation and mechanical smoke extraction separately but applies the same general principle in both cases: the analysis covers the entire underground car park under standardised initial conditions.

To evaluate ventilation effectiveness, the entire volume of the underground car park is assumed to be contaminated with harmful and toxic gases. The relevant indicators are the time required to remove contaminated air, changes in carbon monoxide concentration, and the proportion of the floor area occupied by stagnant air zones, together with their distribution within the underground car park. Stagnant air zones are defined as areas with very low or negligible air velocities, in which pollutants may remain despite system operation.

For mechanical smoke extraction, the initial condition assumes that the entire volume of the underground car park is filled with smoke. The heat release rate and location of the fire are not included in the assessment, thereby removing the dependence of the results on the selected fire scenario. The relevant indicators are the time required to remove smoke, smoke distribution, visibility, and the proportion of the floor area occupied by stagnant smoke zones, together with their distribution within the underground car park. The method can be applied using numerical modelling and, when determining mechanical smoke extraction effectiveness, by hot or cold smoke testing.

The results showed that fan performance ratings alone are not sufficient indicators of the effectiveness of ventilation and mechanical smoke extraction systems. Successful system operation requires the actual removal of contaminated air and smoke from the underground car park. Their movement within the space does not necessarily demonstrate effective removal, since it may result only from mixing or recirculation. Under such conditions, harmful gas concentrations may remain elevated in certain parts of the underground car park.

The analysis of ventilation systems demonstrated clear differences between the investigated system concepts. In the same underground car park, a system combining jet fans with extract fans limited stagnant air zones to approximately 2% of the total floor area. When only central extract fans were used, more than half of the floor area remained without effective air exchange after several minutes of system operation. A separate case study showed that jet fans operating without extract fans did not reduce the carbon monoxide concentration even after prolonged operation. These results confirm that air movement alone cannot be considered effective ventilation unless contaminated air is removed from the underground car park.

The analysis of mechanical smoke extraction systems showed that the presence of fans and sufficient nominal extract capacity do not necessarily ensure effective smoke removal. In underground car parks with a favourable spatial configuration, smoke retention was limited to smaller, separate areas, allowing smoke to be removed effectively. In contrast, an unfavourable spatial configuration, partition walls, structural elements, and other obstacles caused the formation of large connected stagnant smoke zones, even where the installed fan capacity was sufficient.

Mechanical smoke extraction effectiveness therefore depends on the interaction between the system, fan arrangement, architectural layout, and the provision of replacement air. Consequently, system effectiveness cannot be evaluated independently of the spatial characteristics of the underground car park.

A comparison of numerical modelling results, cold smoke test results, and case study data confirmed the applicability of the developed method. Although cold smoke cannot fully reproduce the thermal stratification and buoyancy of hot smoke generated by a real fire, the main smoke movement patterns and the locations of areas with weak smoke flow showed good agreement with the numerical results. Case study data provided additional validation under actual spatial and operating conditions.

The results also showed that smoke distribution and reduced visibility can obscure evacuation signs, impede movement along evacuation routes, and make orientation within the underground car park more difficult. Evacuation signs positioned close to the ceiling may become obscured when they are located within the smoke layer. The results obtained using the developed method can therefore be used to analyse the position and visibility of evacuation signs, the conditions for user evacuation, and the conditions for firefighting intervention.

The developed method has certain limitations. Cold smoke testing does not fully represent the thermal behaviour of hot smoke, while numerical modelling results depend on the appropriate definition of the computational model and its initial and boundary conditions. The influence of additional fire protection systems, including sprinkler systems, may require separate analysis. The standardised initial conditions are not intended to reproduce every possible fire scenario but to provide a common basis for determining and comparing system effectiveness.

The research results confirmed the proposed hypothesis. The developed method enables different ventilation and mechanical smoke extraction systems to be evaluated and compared using common initial conditions and effectiveness indicators. It can be applied to different system types and architectural layouts while still identifying the influence of spatial configuration on system effectiveness. Its principal scientific contribution is the development of a generic method that does not depend on predefined fire characteristics or fire location and that enables system effectiveness to be determined throughout the underground car park. The results can also be used to identify stagnant air and stagnant smoke zones and to analyse the conditions for user evacuation and firefighting intervention.

Key words riječi: underground car park, day-to-day ventilation system, smoke exhaust system, fire, evacuati

SADRŽAJ

Popis slika	4
Popis tablica	8
1.UVOD	10
1.1. Ciljevi i hipoteza istraživanja	10
1.2. Očekivani znanstveni doprinosi istraživanja	12
1.3. Pregled znanstvenih radova iz područja istraživanja.....	13
1.4. Prijenos topline kod požara u građevini	17
1.4.1. Osnove prijenosa topline provođenjem (kondukcija).....	17
1.4.2. Osnove prijenosa topline konvekcijom	17
1.4.3. Osnove prijenosa topline zračenjem.....	18
1.5. Karakteristične faze razvoja požara u zatvorenom prostoru.....	18
1.5.1. Zapaljenje	18
1.5.2. Početna faza požara	19
1.5.3. Rasplamsavanje	20
1.5.4. Razvoj požara nakon rasplamsavanja	20
1.5.5. Gašenje požara.....	21
1.6. Zaštita od požara	22
1.7. Požari u podzemnim garažama	26
1.6. Uzroci požara vozila.....	31
1.7. Električna vozila u podzemnim garažama.....	32
2.SUSTAVI VENTILACIJE I MEHANIČKOG ODIMLJAVANJA PODZEMNIH GARAŽA.....	35
2.1. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja s ventilacijskim kanalima.....	36
2.2. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima	37
2.3. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja odsisnim ventilatorima.....	40
2.4. Otpornost ventilatora na povišene temperature	41

3. POŽARNA ISPITIVANJA DIMOM I NUMERIČKO MODELIRANJE	44
3.1. Proračun količine dima	44
3.1.1. Proračun masenog protoka dima prema aksijalno simetričnom modelu dima	44
3.1.2. Proračun masenog protoka kod uzgonskog dizanja zraka iznad velikih požara kada je naznačena visina bezdimne zone	45
3.1.3. Proračun masenog protoka kod uzgonskog dizanja zraka iznad malih požara uz zadanu visinu bezdimne zone	46
3.1.4. Brzina kretanja dima	46
3.2. Požarna ispitivanja vrućim dimom	47
3.3. Požarna ispitivanja hladnim dimom	47
3.4. Numeričko modeliranje	47
4. METODA ZA ODREĐIVANJE USPIJEŠNOSTI SUSTAVA VENTILACIJE I MEHANIČKOG ODIMLJAVANJA PODZEMNIH GARAŽA	56
4.1. Opis generičke metode	58
4.2. Primjena generičke metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja kod evakuacije i pomoći vatrogasnim postrojbama	66
5. VALIDACIJA METODE NA STUDIJAMA SLUČAJA	70
5.1. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Stožice, Ljubljana, Slovenija	70
5.1.1. Numeričko modeliranje	71
5.1.2. Ispitivanje hladnim dimom	75
5.2. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo, Bosna i Hercegovina	80
5.3. Ispitivanje sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreba, Hrvatska	86
5.4. Ispitivanje sustava ventilacije odsisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb, Hrvatska	91
5.5. Ispitivanje sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža Colchester, Velika Britanija	95

5.6. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka, Bosna i Hercegovina	101
5.7. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza, Beograd, Srbija	109
5.8. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta, Sarajevo, Bosna i Hercegovina	114
5.9. Usporedba sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima i ventilacijskim kanalima.....	118
5.10. Primjena generičke metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja kod evakuacije	125
5.11. Trošak životnog ciklusa sustava	126
6. ANALIZA I RASPRAVA REZULTATA	128
ZAKLJUČAK	131
LITERATURA	133
ŽIVOTOPIS	148

Popis slika

Slika 1. Utjecaj mehanizma prijenosa topline na vatrogasce	18
Slika 2. Karakteristične faze razvoja požara u zatvorenom prostoru	21
Slika 3. Prikaz najnepovoljnijeg scenarija požara.....	22
Slika 4. Primjeri izvora požara u podzemnim garažama.....	34
Slika 5. Princip djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja ventilacijskim kanalima.....	36
Slika 6. Sustav mehaničkog odimljavanja s kanalima za odvođenje dima	37
Slika 7. Princip djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima.....	37
Slika 8. Potisni ventilator u podzemnoj garaži.....	38
Slika 9. Domet i širina mlaza potisnog ventilatora	40
Slika 10. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja pomoću odsisnih ventilatora	40
Slika 11. Prikaz opsega požara i visine bezdimne zone.	45
Slika 12. Prikaz mreže matematičkog modela	53
Slika 13. Prikaz prethodnih istraživanja određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja	56
Slika 14. Pojednostavljena krivulja rasta požara.....	57
Slika 15. Prikaz metode za određivanje uspješnosti sustava.....	59
Slika 16. SWOT analiza - ispitivanje dimom.....	60
Slika 17. SWOT analiza - numeričko modeliranje.....	61
Slika 18. SWOT analiza - odabir parametra koncentracija ugljikova monoksida	63
Slika 19. SWOT analiza - odabir parametra polja nepokretnog zraka	63
Slika 20. SWOT analiza - odabir parametra vidljivost	65
Slika 21. SWOT analiza - odabir parametra polja nepokretnog zraka (dima)	66
Slika 22. SWOT analiza - ocjena uspješnosti.....	66
Slika 23. Prikaz metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja pri evakuaciji i pomoći vatrogasnim postrojbama.....	68
Slika 24. Prikaz debljine sloja dima	68
Slika 25. Položaj znakova evakuacije u podzemnim garažama	69
Slika 26. Prikaz položaja ventilatora u dimnom odjeljku - podzemna garaža Stožice Ljubljana	71
Slika 27. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	72
Slika 28. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Stožice, Ljubljana	73
Slika 29. Prikaz polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	74

Slika 30. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	75
Slika 31. Prikaz metode – ispitivanje dimom - podzemna garaža Stožice, Ljubljana	76
Slika 32. Tlocrt odjeljka - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	76
Slika 33. Prikaz mjernih mjesta za ispitivanje vidljivosti - podzemna garaža Stožice, Ljubljana	77
Slika 34. Ispitivanje dimom generatorom dima i magle - podzemna garaža Stožice, Ljubljana	77
Slika 35. Kretanje hladnog dima tokom ispitivanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana....	78
Slika 36. Određivanje vidljivosti deset minuta nakon uključivanja sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	78
Slika 37. Prikaz vidljivosti u različitim smjerovima iz ispitivanih točaka A, B i C.....	79
Slika 38. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja – podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	80
Slika 39. Tlocrt - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo	81
Slika 40. Prikaz metode - ispitivanje dimom - podzemna garaža Stari Grad.....	82
Slika 41. Ispitivanje hladnim dimom - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo.....	82
Slika 42. Prikaz smanjenja vidljivosti uslijed turbulentnog kretanja dima – podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo	84
Slika 43. Vidljivosti od ispitivane točke - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo	85
Slika 44. Prikaz uspješnosti mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo	86
Slika 45. Presjek i tlocrt - podzemna garaža VIP, Zagreb	87
Slika 46. Položaji ulaza vanjskog zraka, odsisnih i potisnih ventilatora - podzemna garaža VIP, Zagreb.....	87
Slika 47. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža VIP, Zagreb.....	88
Slika 48. Polje nepokretnog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb	89
Slika 49. Polje nepokretnog zraka u funkciji vremena - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb.....	89
Slika 50. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP	90
Slika 51. Položaj odsisnih ventilatora i ulaza vanjskog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb	91
Slika 52. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža VIP, Zagreb.....	92

Slika 53. Polja nepokretnog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb	92
Slika 54. Polja nepokretnog zraka u ovisnosti o vremenu - sustav odsisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb	93
Slika 55. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije - podzemna garaža VIP.....	94
Slika 56. Primjer analize uspješnosti sustava dosadašnjim metodama	95
Slika 57. Položaj otvora za ubacivanje i izbacivanje zraka - podzemna garaža Colchester	95
Slika 58. Prikaz metode–numeričko modeliranje - podzemna garaža Colchester	97
Slika 59. Prikaz analiziranih točaka - podzemna garaža Colchester.....	97
Slika 60. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke A1, A2, A3 i A4	98
Slika 61. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke B1, B2 i B3	98
Slika 62. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke C1, C2, C3 i C4	99
Slika 63. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke D1, D2 i D3	99
Slika 64. Polja nepokretnog zraka i koncentracija CO - podzemna garaža Colchester	100
Slika 65. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije - podzemna garaža Colchester	101
Slika 66. Tlocrt podzemne garaže s položajima odsisnih i potisnih ventilatora - podzemna garaža Nova Otoka	102
Slika 67. Prikaz metode - numeričko ispitivanje - podzemna garaža Nova Otoka.....	103
Slika 68. Površine nepokretnog dima - podzemna garaža Nova Otoka	104
Slika 69. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka.....	104
Slika 70. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Nova Otoka	105
Slika 71. Preinake građevinskih elemenata - podzemna garaža Nova Otoka	105
Slika 72. Prikaz metode s građevinskim preinakama –numeričko modeliranje - podzemna garaža Nova otoka	106
Slika 73. Povlja nepokretnog dima s građevinskim preinakama - podzemna garaža Nova Otoka	107
Slika 74. Polja nepokretnog dima s građevinskim preinakama ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka	108
Slika 75. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja s građevinskim preinakama - podzemna garaža Nova Otoka.....	108
Slika 76. Tlocrt - podzemna garaža Beograd Plaza.....	109
Slika 77. Položaj odsisnih ventilatora i ventilatora za dobavu vanjskog zraka - podzemna garaža Beograd Plaza.....	110

Slika 78. Položaj potisnih ventilatora i otvora za dobavu vanjskog zraka - podzemna garaža Beograd Plaza.....	110
Slika 79. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža Beograd Plaza.....	111
Slika 80. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Beograd Plaza	112
Slika 81. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza.....	113
Slika 82. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Beograd Plaza	114
Slika 83. Prikaz položaja potisnih ventilatora - podzemna garaža Moja Malta.....	115
Slika 84. Prikaz metode –numeričko modeliranje - podzemna garaža Moja Malta.....	116
Slika 85. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Moja Malta.....	116
Slika 86. Polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - sustav potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta	117
Slika 87. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Moja Malta	118
Slika 88. Prikaz smjera djelovanja potisnih ventilatora i položaja odsisnih ventilatora	119
Slika 89. Prikaz metode - numeričko modeliranje sustav potisnim ventilatorima.....	120
Slika 90. Položaj ventilacijskih kanala u podzemnoj garaži	120
Slika 91. Prikaz metode - numeričko modeliranje sustav ventilacijskim kanalima.....	121
Slika 92. Polja nepokretnog dima	122
Slika 93. Polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu usporedba sustava mehaničkog odimljavanja	123
Slika 94. Prikaz usporedbe uspješnosti mehaničkog odimljavanja - potisni ventilatori	124
Slika 95. Prikaz usporedbe uspješnosti mehaničkog odimljavanja - ventilacijski kanali	125
Slika 96. Prikaz vidljivosti znakova za evakuaciju analizom rezultata ispitivanja.....	126

Popis tablica

Tablica 1. Statistički podaci većih požara u podzemnim i nadzemnim garažama	30
Tablica 2. Zahtijevana temperaturna otpornost ventilatora i broj izmjena zraka sustava mehaničkog odimljavanja.....	41
Tablica 3. Vrijednosti brzina oslobađanja topline za različite scenarije požara	44
Tablica 4. Usporedba RANS i LES pristupa u modeliranju turbulentnog strujanja.....	49
Tablica 5. Koeficijenti rasta požara α	57
Tablica 6. Dimenzije četvrte razine - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	71
Tablica 7. Postavke numeričkog modeliranja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana	72
Tablica 8. Prikaz polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	74
Tablica 9. Vidljivost iz ispitivanih točaka u četiri različita smjera - podzemna garaža Stožice, Ljubljana.....	79
Tablica 10. Koraci ispitivanja ovisno o vremenskom trenutku - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo	84
Tablica 11. Vidljivost od ispitivane točke - podzemna garaža Stari Grad.....	84
Tablica 12. Geometrijske dimenzije razine - podzemna garaža VIP, Zagreb.....	87
Tablica 13. Polja nepokretnog zraka u funkciji vremena - sustav s potisnim ventilatorima, podzemna garaža VIP.....	89
Tablica 14. Polja nepokretnog zraka u ovisnosti o vremenu - sustav odsisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb	93
Tablica 15. Postavke numeričkog modeliranja - podzemna garaža Colchester	96
Tablica 16. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke A1, A2, A3 i A4..	98
Tablica 17. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke B1, B2 i B3	98
Tablica 18. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke C1, C2, C3 i C4..	99
Tablica 19. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke D1, D2 i D3.....	99
Tablica 20. Dimenzije razine - podzemna garaža Nova Otoka	102
Tablica 21. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka.....	104
Tablica 22. Polja nepokretnog dima s građevinskim preinakama ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka	107
Tablica 23. Dimenzije razine - podzemna garaža Beograd Plaza	109
Tablica 24. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza.....	112

Tablica 25. Dimenzije razine - podzemna garaža Moja Malta.....	115
Tablica 26. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta	117
Tablica 27. Dimenzije podzemne garaže.....	119
Tablica 28. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - usporedba sustava mehaničkog odimljavanja.....	122
Tablica 29. Prikaz troškova sustava	127

1.UVOD

1.1. Ciljevi i hipoteza istraživanja

Za ventilaciju i mehaničko odimljavanje podzemnih garaža primjenjuju se sustav s ventilacijskim kanalima, sustav sa središnjim odsisnim ventilatorima te sustav s mlaznim potisnim ventilatorima (u daljnjem tekstu potisni ventilatori). Svaki od navedenih sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja ima prednosti, ali i ograničenja. Odabirom odgovarajućeg sustava ventilacije smanjuje se negativan utjecaj na zdravlje korisnika podzemnih garaža izbacivanjem štetnih i toksičnih plinova nastalih radom vozila. Sustav mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža u slučaju požara omogućuje odvođenje produkata izgaranja, odnosno dimnih plinova. Nadalje, rad sustava mehaničkog odimljavanja povećava vidljivost vatrogasnim postrojbama tokom intervencije te može smanjiti materijalnu štetu uzrokovanu djelovanjem požara i visokih temperatura. Posredno, sustav mehaničkog odimljavanja može utjecati i na evakuaciju eventualno zaostalih korisnika podzemnih garaža. Hipoteza istraživanja jest da je razvojem generičke metode moguće odrediti uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža, neovisno o odabranom tipu sustava i zadanoj arhitekturi podzemne garaže. Uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemne garaže određuje se njegovom sposobnošću da unutar zadanog vremena ukloni štetne plinove, dim i produkte izgaranja te osigura prihvatljive uvjete za korištenje garaže pri redovitom radu, odnosno uvjete za evakuaciju korisnika i intervenciju vatrogasnih postrojbi u slučaju požara.

Ciljevi istraživanja su sljedeći:

1. razviti metodu za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža u slučaju požara, neovisno o odabranom sustavu i zadanoj arhitekturi podzemne garaže
2. utvrditi utjecaj uspješnosti mehaničkog odimljavanja na evakuaciju ljudi i uspješnost intervencije vatrogasnih postrojbi

Radi ostvarenja ciljeva istraživanja definiran je plan istraživanja i metoda koja se primjenjuje u radu. Sukladno planu, u istraživanju se koriste numeričke metode, ispitivanja hladnim dimom te terenska istraživanja uz analizu studija slučaja, kako bi se dobiveni rezultati usporedili sa stvarnim slučajevima.

Faze istraživanja uključuju:

1. Pregled literature

Početak istraživanja teoretskog je karaktera i odnosi se na proučavanje znanstvene i stručne literature iz područja požarnog inženjerstva, numeričkog modeliranja razvoja požara i širenja dima, termodinamike požara, probabilističkih modela evakuacije te literature o sustavima ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža. Posebna pažnja posvećena je literaturi koja se izravno odnosi na podzemne garaže. Pregled literature obuhvaća i postojeće metode određivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža.

2. Terensko istraživanje

Terenskim istraživanjem prikupljeni su podaci o izvedenim sustavima ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama. Uz to su evidentirani i podaci o ostalim sustavima aktivne zaštite od požara koji doprinose sigurnoj evakuaciji korisnika, kao i o evakuacijskoj signalizaciji i sustavima dojave opasnosti. Istraživanjem je obuhvaćena ukupno 71 podzemna garaža. Najveći broj nalazi se u Zagrebu, gdje su terenskim istraživanjem obuhvaćene 43 garaže. Preostale se nalaze u Argentini (1), Austriji (2), Bosni i Hercegovini (4), Kini (2), Njemačkoj (2), Indiji (1), Italiji (1), Crnoj Gori (5), Slovačkoj (2), Sloveniji (3) i Ujedinjenom Kraljevstvu (5).

3. Proučavanje studija slučaja

Proučavanjem studija slučaja prikupljeni su podaci koji su korišteni za validaciju razvijene metode za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža.

4. Razvoj modela

Razvijena metoda omogućuje određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama. Metoda ne ovisi o načinu ispitivanja uspješnosti, bilo da se provodi numeričkim modeliranjem ili ispitivanjima vrućim, odnosno hladnim dimom.

5. Validacija pomoću studija slučaja

Podaci iz studija slučaja korišteni su za dodatnu validaciju rezultata razvijene metode. Dodatna validacija provedena je i usporedbom s drugim metodama koje se u pojedinim slučajevima koriste za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža.

6. Analiza utjecaja sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja na evakuaciju korisnika

Razmatranjem sigurnosnih mjera, položaja znakova za evakuaciju u podzemnim garažama i načina evakuacije analizirana je uspješnost evakuacije te utjecaj odabira sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja na zdravlje, odnosno evakuaciju korisnika podzemne garaže. Osim toga, rezultati istraživanja daju doprinos povećanju sigurnosti vatrogasaca tokom intervencije gašenja požara u podzemnim garažama.

1.2. Očekivani znanstveni doprinosi istraživanja

Očekivani znanstveni doprinosi ovog istraživanja su:

1. razvoj metode za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama, bez obzira na odabrani sustav i arhitekturu podzemne garaže
2. validacija rada sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama
3. analiza scenarija evakuacije korisnika podzemnih garaža u uvjetima požara

Ispitivanjem navedenih sustava unaprjeđuje se postupak određivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža. Dobiveni rezultati mogu se koristiti za analizu i poboljšanje evakuacije korisnika podzemnih garaža, primjerice za određivanje položaja znakova za evakuaciju. Multidisciplinarnim pristupom moguće je učinkovito analizirati sustave ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža. Numeričkim modeliranjem uspješnosti sustava moguće je analizirati rad pojedinih elemenata sustava, kao i utjecaj ostvarenog potiska ventilatora i njihova razmještaja u prostoru na brzinu izbacivanja toksičnih plinova i dima iz podzemne garaže. Rezultati dobiveni ispitivanjima pokazuju prednosti i ograničenja pojedinih sustava te omogućuju optimizaciju sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja promjenom položaja pojedinih ventilatora ili promjenom njihova broja. Tako dobiveni podaci mogu se koristiti u računalnim programima za evakuaciju te, usporedbom ponašanja različitih dobnih skupina, spolova i razine pokretljivosti, uz uvažavanje ograničenja korisnika, odrediti uspješnost evakuacije u slučaju požara za različite scenarije. Eksperimentalnim ispitivanjima uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja (vrućim ili hladnim dimom) također se može odrediti uspješnost sustava te validirati rezultate dobivene numeričkim modeliranjem. Ispitivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža povezuje strojarstvo, termodinamiku, mehaniku fluida, požarno inženjerstvo i biheviorističke znanosti te daje dodatni doprinos povećanju sigurnosti vatrogasnih postrojbi tokom intervencije, kao i evakuaciji korisnika podzemnih garaža.

1.3. Pregled znanstvenih radova iz područja istraživanja

Porast gradskog prometa i broja vozila na gradskim ulicama, kao i izgradnja trgovačkih centara, stambenih zgrada te sportskih i drugih građevina, doveli su do potrebe za sve većim brojem parkirališnih mjesta. Nedostatak raspoloživog prostora rezultirao je naglim porastom izgradnje podzemnih garaža. U cilju zaštite ljudi i imovine u takvim se garažama ugrađuju različiti sigurnosni sustavi, poput sprinkler instalacija [1], vatrodojavnih sustava [2], te sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja.

Osnovna zadaća ventilacije podzemnih garaža jest uklanjanje štetnih i toksičnih ispušnih plinova. Ti plinovi, ponajprije ugljikov monoksid (CO), ugljikovodici (HC), dušikovi oksidi (NO_x), sumporovi oksidi (SO_x) i olovo (Pb), uzrokuju lošu kvalitetu zraka u prostoru podzemne garaže. CO se ubraja među najznačajnije štetne plinove zbog svoje toksičnosti i štetnog utjecaja na ljudsko zdravlje. Riječ je o plinu bez boje, mirisa i okusa, vrlo toksičnom, koji predstavlja čest uzrok smrtonosnih trovanja plinovima. Osobe koje su izravno uključene u vožnju, održavanje i parkiranje vozila najviše su izložene ugljikovu monoksidu. Ako mehanička ili prirodna ventilacija nije dostatna u zatvorenim prostorima, koncentracije ispušnih plinova mogu uzrokovati zdravstvene probleme, pa čak i dovesti do smrti [3]. Ako koncentracija CO u podzemnoj garaži poraste na opasnu razinu, potrebno je evakuirati ljude. Sustav ventilacije podzemnih garaža ograničava porast koncentracije ugljikova monoksida u prostoru podzemne garaže. Stoga se raznim metodama, posebice računalnim metodama, nastoji odrediti optimalan sustav ventilacije u različitim scenarijima [4]. Uz CO, na kvalitetu zraka u podzemnim garažama utječu i SO_x i NO_x [5]. Kod požara baterija električnih vozila razvijaju se otrovni plinovi klorovodik (HCl) i fluorovodik (HF). Klorovodik je na sobnoj temperaturi bezbojan, reaktivan i otrovan plin koji reakcijom s vodenom parom stvara klorovodičnu kiselinu. Fluorovodik je iznimno otrovan i opasan spoj fluora i vodika s vrelištem 19,5 °C, pa se može pojaviti kao plin i kao tekućina. U dodiru s vodom ili vodenom parom nastaje izrazito korozivna fluorovodična kiselina koja može uzrokovati teška oštećenja očiju i kože. Stoga fluorovodik predstavlja veliku opasnost vatrogascima pri gašenju požara električnih vozila u podzemnim garažama nakon aktivacije sprinkler instalacije, zbog prisutnosti vode i vodene pare. Dvije neovisne metode mjerenja potvrdile su da požar velikih litij-ionskih baterija može predstavljati veliku prijetnju zbog nastanka fluorovodika [6]. Eksperimentalnim putem dokazano je da će se, što je baterija manje napunjena, razviti veća količina fluorovodika, odnosno da napunjenost baterije utječe na količinu razvijenog fluorovodika [7]. Mjerenja koncentracije dušikovih oksida pokazala su da u podzemnim garažama može doći do povećanja iznad dozvoljenih vrijednosti, zbog čega je potrebno osigurati učinkovitost sustava ventilacije. Osobama s

respiratornim problemima preporučuje se parkirati vozilo izvan prostora podzemne garaže [8]. Osim navedenih plinova, u ispušnim plinovima osobnih vozila javlja se relativno visoka koncentracija benzena (C_6H_6), ksilena ($C_6H_4(CH_3)_2$) i toluena ($C_6H_5CH_3$), pri čemu su izmjerene veće koncentracije tih spojeva kod starijih vozila nego kod novih [9]. Istraživanja pokazuju da je koncentracija benzena u zraku kuća s pripadajućom garažom viša nego u kućama bez takve garaže te da se može smanjiti primjenom mehaničke ventilacije [10]. Prirodna ventilacija također ima značajan utjecaj na kvalitetu zraka u podzemnoj garaži. Mehanička ventilacija obično se aktivira kada koncentracija CO poraste do određene razine, dok prirodna ventilacija kontinuirano doprinosi smanjenju koncentracije štetnih plinova u prostoru garaže. Međutim, pri maloj razlici između unutarnje i vanjske temperature intenzitet prirodne ventilacije je najniži [11]. Zimi je prirodna ventilacija intenzivnija nego ljeti [12]. Kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta zraka u podzemnoj garaži, potrebno je ostvariti odgovarajući protok zraka. Taj protok, na primjer kod sustava ventilacije potisnim ventilatorima, ovisi o međudjelovanju strujanja uz strop (*engl. ceiling jet*) i strujanja koje generiraju potisni ventilatori [13]. Parametre kao što su položaj potisnih ventilatora, brzina strujanja zraka, orijentacija ventilatora te položaji ulaznih i izlaznih otvora potrebno je stoga pažljivo odrediti [14]. Strujanja koja stvaraju potisni ventilatori smanjuju koncentracije štetnih plinova, pri čemu učinkovitost njihova smanjenja ovisi o međusobnoj udaljenosti potisnih ventilatora [15]. Položaj odsisnih ventilatora također ima velik utjecaj na uklanjanje štetnih plinova iz podzemnih garaža [16] te na koncentraciju CO u zoni disanja [16].

Pri razmatranju kvalitete zraka u podzemnoj garaži, (*engl. local mean age - LMA*) jedan je od najvažnijih parametara [17]. LMA se definira kao prosječno vrijeme potrebno da zrak od trenutka ulaska u garažu dosegne proizvoljnu točku u podzemnoj garaži. Manje vrijednosti LMA upućuju na bržu izmjenu zraka, dok veće vrijednosti upućuju na dulje zadržavanje zraka te mogućnost pojave zona slabe izmjene (stagnacije). Koncept LMA može se primijeniti pri odabiru položaja i određivanju optimalnog broja potisnih ventilatora. Međutim, povećanje broja potisnih ventilatora ne mora nužno dovesti do poboljšanja uspješnosti ventilacijskog sustava. Primjena koncepta LMA omogućuje procjenu trajanja stagnacije, odnosno zadržavanja zraka, u različitim dijelovima podzemne garaže [18]. Za poboljšanje kvalitete zraka u podzemnim garažama razvijene su različite strategije ventilacije. Periodično reverzibilna dobavno-odsisna ventilacija (*engl. PRESEV – Periodically Reversible Supply/Extract Ventilation*) može imati potencijalnu prednost u odnosu na konvencionalnu mehaničku ventilaciju [19], no primjenjivost te strategije ovisi o specifičnim uvjetima sustava i prostora [20]. PRESEV je strategija mehaničke ventilacije u kojoj se u pravilnim vremenskim intervalima mijenja smjer

rada sustava, pri čemu se periodično izmjenjuje funkcija sustava tako da odsisni način rada prelazi u dobavni i obratno. Na kvalitetu zraka utječu i izvanredni događaji, primjerice slučajna ispuštanja rashladnih plinova iz klimatizacijskih sustava vozila [21] ili ispuštanja ukapljenog naftnog plina [22]. Podzemne garaže namijenjene teškim teretnim vozilima s dizelskim motorima imaju lošiju kvalitetu zraka i više razine onečišćujućih tvari u odnosu na javne ili stambene podzemne garaže [23]. Stoga je, radi poboljšanja mehaničkog ventilacijskog sustava, potrebno analizirati čimbenike koji utječu na njegov rad [24].

Požar je svako nekontrolirano gorenje pri kojem su ugroženi ljudski životi i nastaje materijalna šteta. Osnovni uvjeti za nastanak požara su prisutnost dovoljnih količina gorive tvari i oksidansa, prisutnost izvora energije, postizanje temperature paljenja te slobodno odvijanje reakcija u plamenu [25]. Rast stanovništva, kao i tehnološki i industrijski razvoj, povećali su rizik nastanka požara. Unatoč razvoju znanstvenog pristupa i spoznaja o požarima te unaprjeđenju zakonodavstva, normi i standarda u zaštiti od požara, broj požara, ljudskih žrtava i materijalnih šteta i dalje je velik. Požari se u podzemnim garažama pojavljuju rijetko, a ljudi se u pravilu u njima ne zadržavaju dugo. Međutim, ako do požara dođe, on može imati značajan utjecaj na konstrukciju građevine te na živote ljudi i vatrogasaca. Udisanje vrućeg dima primarni je uzrok smrti u požarima, pri čemu trovanje cijanidom pridonosi smrtnom ishodu žrtava požara [26]. Cijanidi su soli cijanovodične kiseline, a brojni cijanidni spojevi zbog visoke se toksičnosti ubrajaju među izrazito otrovne tvari. Cijanovodik (HCN) može biti prisutan u ispušnim plinovima motora s unutarnjim izgaranjem [27]. S obzirom na to da u požarima pri izgaranju nastaju i ugljikov monoksid i cijanid, žrtve su izložene istodobnom djelovanju ta dva vrlo toksična i smrtonosna spoja [28], pri čemu su u žrtava požara zabilježene visoke ili smrtonosne razine cijanida [29]. Zbog visokih koncentracija ugljikova dioksida i ugljikova monoksida u zatvorenom prostoru koje nastaju u požaru, evakuaciju je potrebno u potpunosti završiti što prije, a najdulje, prema literaturi, unutar 20 minuta od izbijanja požara [30]. Razvijene su različite metode za određivanje energije oslobođene požarom, osnovnog parametra koji karakterizira vremenski razvoj požara. Ona se iskazuje kao brzina oslobađanja topline u jedinici vremena (*engl. Heat Release Rate – HRR*), u kW ili MW. Iznos HRR ima izravan utjecaj na temperaturu i količinu dima u promatranom prostoru, međutim na širenje dima značajno utječe odabrani sustav mehaničkog odimljavanja [31]. U slučaju podzemnih garaža, karakteristike različitih goriva te zapaljenog vozila također imaju bitan utjecaj na HRR. Brojnim eksperimentima analizirano je ponašanje zapaljenih vozila [32]. Između ostalog, provedeni su eksperimenti određivanja i usporedbe vrijednosti HRR pri zapaljenju vozila pogonjenih različitim gorivima, primjerice ukapljenim naftnim plinom (*engl. Liquefied*

Petroleum Gas – LPG) [33], stlačenim prirodnim plinom (*engl. Compressed Natural Gas – CNG*) i benzinom [34].

Numeričko modeliranje koristan je alat za određivanje gibanja i stratifikacije dima, debljine sloja dima, temperaturnih polja i vidljivosti. Također se može koristiti za simuliranje područja zastoja zraka, rasta požara te učinkovitosti ugrađenih sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja. Navedeni se parametri mogu zasebno analizirati za bilo koji vremenski interval i u bilo kojem dijelu podzemne garaže [35], neovisno o složenosti arhitekture podzemne garaže. Za potrebe ove analize koristi se računalna dinamika fluida (*engl. Computational Fluid Dynamics - CFD*). Iako je riječ o korisnom alatu, CFD simulacije zahtijevaju validaciju usporedbom rezultata s eksperimentalnim podacima [36]. Rezultati CFD analize pokazuju osjetljivost na veličinu primijenjene numeričke mreže [37] te na rubne uvjete.

Osim toga mogu se analizirati ponašanje konstrukcije podzemne garaže pri izloženosti požaru [38] i utjecaj požara na betonsku konstrukciju [39], kao i, primjerice, eksplozija uzrokovana istjecanjem LPG-a tokom servisiranja vozila [40]. Također se može analizirati utjecaj vertikalnih prepreka, stupova, greda i pregradnih zidova [41]. Za analizu sustava mehaničke ventilacije [42], strujanja zraka koje stvaraju ugrađeni ventilatori ili optimizaciju sustava mehaničke ventilacije u podzemnoj garaži [43] mogu se koristiti različiti softverski paketi za CFD modeliranje. Računalni kod Fire Dynamics Simulator (FDS) korišten je za istraživanje stratifikacije dima, gibanja dima i širenja požara u podzemnim garažama. Uspoređeni su eksperimentalni rezultati HRR-a za požar jednog vozila [44]. Osim toga, FDS je korišten za paralelne računalne simulacije stratifikacije dima [45], a u simulacije u FDS-u uključeni su različiti eksperimentalni parametri [46]. U CFD-u se koriste različiti matematički modeli turbulencije. Njihov je osnovni cilj analiza područja zastoja zraka, utjecaja položaja ventilatora u podzemnim garažama na smanjenje i uklanjanje tih područja te, naposljetku, optimizacija sustava mehaničke ventilacije. Numeričko modeliranje u CFD-u zasniva se na algoritmima aproksimacije rješenja vremenski osrednjenih Navier–Stokesovih jednadžbi (*engl. Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations - RANS*) na diskretnim kontrolnim volumenima. Usporedbom rezultata dobivenih standardnim $k-\epsilon$ modelom turbulentnog strujanja s rezultatima simulacija dobivenih primjenom LES pristupa (*engl. Large Eddy Simulation – LES*), uz odgovarajući model izgaranja, uočava se ovisnost rezultata o gustoći numeričke mreže [47]. Radi pojednostavljenja postave CFD modela često se pretpostavlja prazna podzemna garaža, premda su vozila prepreke gibanju dima i utječu na stratifikaciju [48]. Sustav ventilacije potisnim ventilatorima u podzemnim garažama pokazuje određene sličnosti s longitudinalnom ventilacijom tunela, no zbog razlika u omjeru stranica (*engl. aspect ratio*) i sustavima

mehaničke ventilacije provedena je opsežna analiza numeričkih simulacija primjenom CFD-a [49]. Studije slučaja pridonose boljem razumijevanju mehaničke ventilacije podzemnih garaža [50]. Primjerice, omogućuju usporedbu različitih fizikalnih modela, modela požara i disperzije dima, modeliranja izvora topline i mase te različitih požarnih scenarija [51]. Pravodobno otkrivanje požara jedan je od ključnih elemenata zaštite od požara [52], pri čemu se, uz uređaje za dojavu dima i plamena te druge osjetnike, mogu primijeniti i kombinirani osjetnici koji istodobno registriraju dim i plamen [53].

1.4. Prijenos topline kod požara u građevini

Osnovna karakteristika termodinamike požara jest ovisnost razvoja požara o vremenu. Za razliku od tehničke termodinamike, u kojoj se prijenos topline često razmatra kao stacionaran, a veličine su prostorno raspodijeljene, prijenos topline u termodinamici požara je nestacionaran, a veličine su prostorno i vremenski raspodijeljene.

Tri osnovna mehanizma prijenosa topline pri požaru u građevini jesu::

1. provođenje topline - kondukcija (*engl. conduction*)
2. konvekcija (*engl. convection*) - slobodna (prirodna) i prisilna
3. toplinsko zračenje (*engl. radiation*)

1.4.1. Osnove prijenosa topline provođenjem (kondukcija)

Provođenje topline (kondukcija) karakteristično je za krute tvari u kojima nema razlike u makroskopskom gibanju čestica pa se prijenos topline odvija samo na razini molekula. U slučaju požara u građevini, provođenje topline kroz zidove, stropove, vrata i ostale dijelove građevine može se promatrati fizikalnim modelom ravne stijenke. Za taj model karakteristično je da je površina plohe kroz koju prolazi toplina konstantna, a stacionarno stanje opisuje se izrazom za konstantni toplinski tok. Prijenos topline kod požara provođenjem kroz građevinske elemente može uzrokovati prijenos požara u susjedne prostorije. Zbog toga građevinski elementi moraju biti otporni na visoke temperature kako ne bi došlo do značajnog provođenja topline kroz njih. Osim utjecaja na građevinske elemente, prijenos topline provođenjem u slučaju požara može imati negativan utjecaj i na korisnike podzemne garaže te vatrogasce tokom intervencije. Primjena kvalitetnih zaštitnih odijela nužna je kako bi se smanjio utjecaj topline i visokih temperatura na tijelo [54].

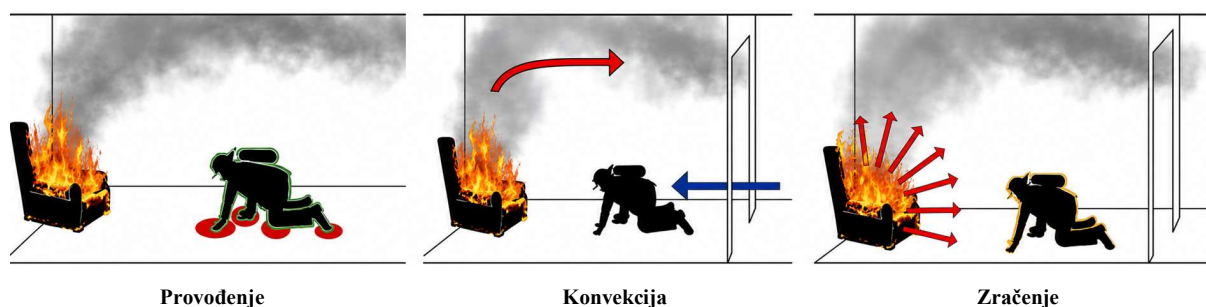
1.4.2. Osnove prijenosa topline konvekcijom

U termodinamici požara, do temperatura od približno 500 °C, prijenos topline konvekcijom je dominantan. Budući da do rasplamsavanja požara dolazi također pri temperaturama oko 500 °C, o konvektivnom prijenosu topline u velikoj mjeri ovisi razvoj požara. Stoga je važno

odrediti kolika će se temperatura razviti konvektivnim prijenosom topline, s obzirom na to da razvoj požara ovisi o vrijednosti razvijene temperature. Problematika određivanja konvektivnog prijenosa topline jest u tome što koeficijent konvektivnog prijenosa topline ovisi o različitim čimbenicima, primjerice o geometriji površine (vodoravna, okomita, nagnuta i sl.), obliku konvekcije (prirodna ili prisilna) te vrsti goriva [55]. Nadalje, koeficijent konvektivnog prijenosa topline mijenja se tokom požara uslijed djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja [56].

1.4.3. Osnove prijenosa topline zračenjem

Prijenos topline zračenjem na sobnoj temperaturi zanemariv je u odnosu na druge načine prijenosa topline. Kod temperatura iznad 500 °C prijenos topline zračenjem postaje prevladavajući u odnosu na druge načine prijenosa topline. Također, prijenos topline zračenjem dominantan je kod srednjih i velikih požara [57]. Prijenos topline zračenjem ima velik utjecaj na ljudski organizam, pogotovo na vatrogasce tokom intervencije. Pretpostavlja se da se od ukupne energije oslobođene požarom između 20 % i 25 % prenosi zračenjem na građevinske elemente (zidove, strop, pod i sl.), čime se smanjuje udio energije koji se konvekcijom predaje okolnom zraku, odnosno dimu. Na slici 1 [58] prikazan je utjecaj prijenosa topline provođenjem, konvekcijom i zračenjem na vatrogasce izložene požaru.



Slika 1. Utjecaj mehanizma prijenosa topline na vatrogasce

1.5. Karakteristične faze razvoja požara u zatvorenom prostoru

1.5.1. Zapaljenje

Zapaljenju uvijek prethodi zagrijavanje potencijalnog goriva. Budući da se većina zapaljenja događa u blizini površine goriva, odnosno predmeta, zapaljenje ovisi o temperaturi na površini. Prije nego što se goriva mogu zapaliti dolazi do uklanjanja vode i drugih tekućih spojeva iz goriva te do zagrijavanja goriva do temperature paljenja [59]. Pritom često dolazi do proizvodnje dima i drugih toksičnih proizvoda izgaranja. Navedene se pojave mogu uočiti prije aktiviranja plinskih ili dimnih alarma, primjerice i na način da ljudi osjete dim. Toplina se još

nije razvila u mjeri da bi se aktivirali sustavi aktivne zaštite od požara ili osjetnici topline. Takvo stanje može trajati od nekoliko milisekundi do nekoliko dana, ovisno o različitim čimbenicima, kao što su vrsta goriva, uvjeti okoline ili izvor topline. Faza zapaljenja uključuje razvoj lančane kemijske reakcije. Uzrok zapaljenju može biti izravan kontakt s plamenom, prijenos topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem ili kombinacija navedenog. Širenje požara ovisi o geometriji, odnosno arhitekturi prostora, svojstvima okolnih površina, vrsti i količini goriva te uvjetima ventilacije. Budući da postoji velik broj zapaljivih tvari (tekuća, plinovita i kruta goriva, aerosoli i dr.), pri procjeni uvjeta zapaljenja potrebno je utvrditi može li određeni izvor paljenja svojom energijom zapaliti gorivu tvar na koju djeluje [60].

1.5.2. Početna faza požara

U ovoj fazi (*engl. pre-flashover*) dolazi do rasta požara, pri čemu se intenzitet povećava kako gorivo u prostoriji izgara, a njezino trajanje ovisi o vrsti i količini goriva te o uvjetima ventilacije u prostoru. Aktivni sustavi za gašenje požara u pravilu su dimenzionirani za ovo razdoblje, odnosno razdoblje prije rasplamsavanja (*engl. flashover*), dok je požar još dovoljno mali i kada ga je moguće kontrolirati ili ugasiti, primjerice umjerenom količinom vode. Površina gorenja raste, kao i oslobađanje topline, sve dok se rast ne ograniči smanjenjem dostupnog goriva ili dovoda zraka, odnosno kisika. Tokom početne faze razvoja požara pretpostavlja se da je u prostoru dostupna dovoljna količina zraka na temperaturi okoline, pa je razvoj požara u toj fazi prvenstveno ograničen količinom raspoloživog goriva koje može sudjelovati u izgaranju (*engl. fuel-controlled fire*). Kada se požar pojavi blizu zidova, opaža se smanjeno uvlačenje zraka u plamen, čime se smanjuje proizvodnja dima u odnosu na slučaj kada je izvor požara u središtu prostorije [61]. Nadalje, kada je izvor požara podignut od tla, sloj vrućeg plina i maksimalne temperature veće su nego kada je izvor požara pri podu, što je potrebno uzeti u obzir tokom analize požara [62]. Cjelokupno izgaranje može biti ograničeno brzinom oslobađanja plinovitog goriva tokom požara. Razvija se vrući gornji sloj, pri čemu se u pojednostavljenim dvoslojnim modelima često pretpostavlja da je temperatura u gornjem sloju približno ujednačena, dok u donjem sloju temperatura plina ostaje približno jednaka temperaturi okoline [63]. Zbog smanjenja koncentracije kisika u prostoru može doći do stvaranja pirolitičkih plinova. Ti plinovi su mješavina različitih plinovitih sastojaka, ponajprije vodika (H_2), ugljikova monoksida (CO), metana (CH_4) i sumporovodika (H_2S), uz prisutnost drugih ugljikovodika [64]. Naglim dovođenjem vanjskog zraka, primjerice otvaranjem vrata, može doći do zapaljenja nastalih pirolitičkih plinova, njihovog eksplozivnog izgaranja i pojave takozvanih povratnih plamenih slojeva (*engl. backdraft*) [65].

1.5.3. Rasplamsavanje

Ovo je faza brzog razvoja do potpuno razvijenog požara, pri čemu se intenzitet povećava potrošnjom goriva. Rasplamsavanje (*engl. flashover*) predstavlja gotovo istovremeno paljenje većine izravno izloženog zapaljivog materijala u zatvorenom prostoru. U stvarnim požarima izgaranje je često nepotpuno, pa dim, uz ostale proizvode izgaranja, može sadržavati i nepotpuno izgorene plinove. Dolazi do zagrijavanja svih površina u prostoriji zahvaćenoj požarom, primjerice namještaja, zidova i ostalih predmeta koji se nalaze u prostoriji. Plamen više nije ograničen na početno zapaljene predmete. Kada gorivi materijali i predmeti u prostoriji dosegnu temperaturu paljenja, dolazi do gotovo istovremenog zapaljenja većeg broja predmeta te do intenzivnog gorenja u prostoru zahvaćenom požarom. Temperatura u prostoru može dosegnuti vrijednosti reda veličine 500 °C do 600 °C, u nekim slučajevima i više [66], ovisno o vrsti goriva, geometriji prostora i uvjetima ventilacije. Dolazi do brzog povećanja brzine oslobađanja topline, a budući da je požar tada velik, dostupnost kisika postaje ograničavajući čimbenik te time ograničava intenzitet gorenja. Plamen se širi kroz dim i neizgorjele plinove te se razvija prema stropu prostorije. Provjetravanje kroz vrata i prozore omogućuje ulazak vanjskog zraka u prostoriju, čime se požar opskrbljuje kisikom i dim potiskuje prema stropu. Kako se koncentracija kisika smanjuje, sloj dima se spušta. Ljudi u prostoru zahvaćenom požarom ne mogu preživjeti nakon rasplamsavanja zbog nedostatka kisika, visokih temperatura i povišene koncentracije ugljikova monoksida. Neki od znakova koji upućuju na mogućnost rasplamsavanja su brz porast temperature u prostoru i toplina nastala izgaranjem plinova pod stropom. Takozvani plameni jezici postaju vidljivi u sloju dima, a dim se brzo spušta prema podu zbog smanjenja koncentracije kisika u prostoru. Rasplamsavanje je jedan od najvećih uzroka smrti i ozljeda vatrogasaca u stambenim zgradama [67].

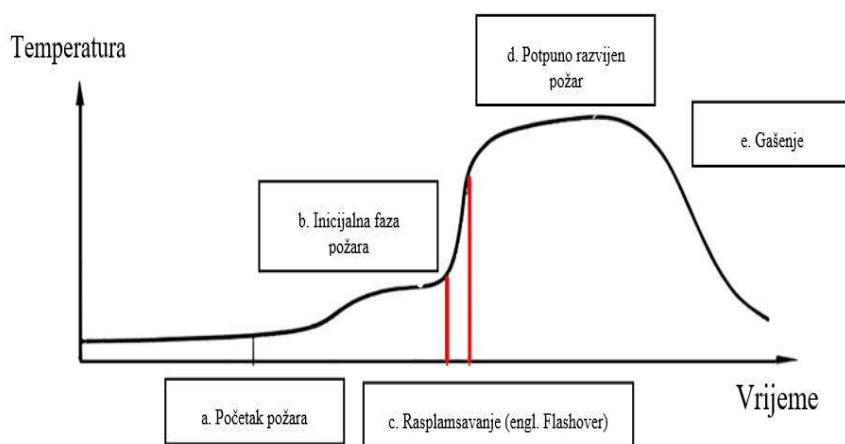
1.5.4. Razvoj požara nakon rasplamsavanja

Ovo je faza potpuno razvijenog požara (*engl. post-flashover*), pri čemu u cijelom prostoru zahvaćenom požarom vladaju relativno jednolični uvjeti. Plamen u pravilu ispunjava cijeli prostor, a sav gorivi materijal uključen je u požar. Toplinska snaga požara je velika, a temperature u prostoru mogu biti između 700 °C i 1200 °C. Temperature od 1000 °C do 1100 °C opažene su kod požara koji traju od jednog do dva sata, dok su temperature od 1200 °C, pa čak i 1300 °C, vrlo rijetko opažene kod požara koji traju između tri i pet sati. Stoga je potrebno posebno obratiti pažnju na sigurnost vatrogasaca, s obzirom na to da je i konstrukcijska sigurnost zgrade dovedena u pitanje [68]. Zbog ograničene količine kisika u prostoru brzina gorenja ovisi o provjetravanju, odnosno o dobavi vanjskog zraka u prostor. U ovoj fazi

ponašanje požara određeno je uvjetima dobave vanjskog zraka u prostoriju (*engl. ventilation controlled fire*).

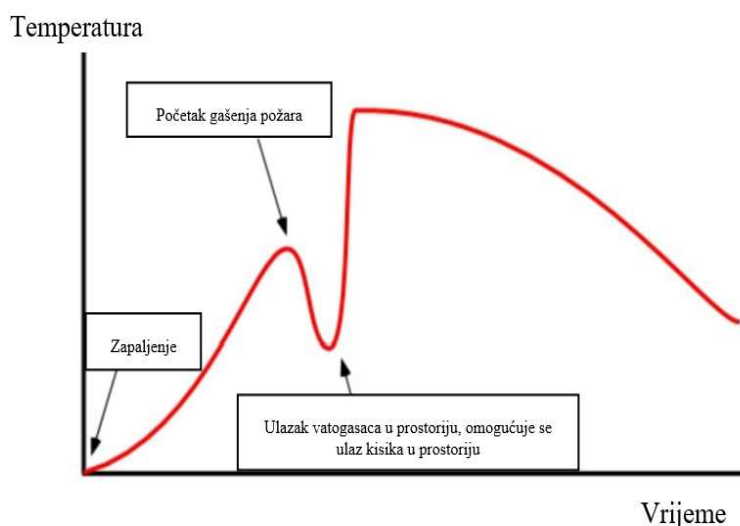
1.5.5. Gašenje požara

Potrošnjom goriva intenzitet požara se smanjuje. Ovo je najduža faza požara te se obično definira trenutkom kada se potroši oko 80 % dostupnog goriva u prostoriji, a temperatura opadne na približno 20 % vrijednosti najviše razvijene temperature. U tom razdoblju prisutne su dvije uobičajene opasnosti: nakupljanje neizgorjelih zapaljivih produkata koji mogu dovesti do ponovne pojave požara te mogućnost nastanka povratnih plamenih slojeva. Na slici 2 [69] prikazane su karakteristične faze razvoja požara u zatvorenom prostoru.



Slika 2. Karakteristične faze razvoja požara u zatvorenom prostoru

Na slici 3 [58] prikazan je nepovoljan scenarij razvoja požara u kojem se požar počinje gasiti zbog nedostatka kisika te prelazi u tinjajuću fazu (*engl. smoldering fire*). Naknadnim otvaranjem otvora (vrata, prozora), primjerice prilikom vatrogasne intervencije, dolazi do naglog dotoka kisika i mogućnosti ponovnog intenziviranja požara. Tada u prostoriju ulazi vanjski zrak, a time i kisik, pri čemu pirolitički plinovi nastali uslijed nedostatka kisika s vanjskim zrakom tvore gorivu smjesu. Posljedično dolazi do eksplozivnog izgaranja i ekspanzije plamenih slojeva kroz otvore prostorije.



Slika 3. Prikaz najnepovoljnijeg scenarija požara

1.6. Zaštita od požara

Zaštita od požara u građevinama ima sljedeće zadaće:

1. zaštititi ljudske živote i ne dovesti ih u opasnost
2. ne dovesti u opasnost interventne i spasilačke službe
3. sačuvati materijalna dobra
4. ograničiti širenje požara i time smanjiti materijalnu štetu

Zaštita od požara u građevinama može se podijeliti na:

1. Pasivna zaštita od požara

Pasivna zaštita od požara ne djeluje izravno na požar, već smanjuje pretpostavke za njegov nastanak te ograničava i sprječava širenje požara [70], a arhitektonsko-građevinske mjere pasivne zaštite od požara su:

Koncepcija građevine - koncepcija građevine pretpostavlja određivanje evakuacijskih puteva i stubišta te pristupnih vatrogasnih puteva, kao i zoniranje građevine na požarne i dimne odjeljke. Dimenzije stuba imaju utjecaj na sigurnost hodanja, odnosno trčanja, te time i na uspješnost evakuacije. S obzirom na to da je rizik od pada, odnosno nezgode, veći tokom spuštanja, dimenzije stuba prvenstveno su prilagođene kretanju prema dolje [71]. Pristup mjestu požara vatrogasnim postrojbama u mnogim je slučajevima ograničen, zbog čega je potrebno pažljivo planirati vatrogasne prilaze i mogućnosti djelovanja vatrogasaca [72].

Odgovarajući izbor građevinskih materijala - beton je jedan od najrasprostranjenijih građevinskih materijala, a ujedno je učinkovit materijal za konstrukcijsku zaštitu od požara [73]. Tri glavna razloga otpornosti betona na požar su to što je nezapaljiv,

netoksičan i ima nisku toplinsku vodljivost. Otpornost betona na požar ovisi o nekoliko čimbenika, ponajprije o vrsti agregata, sadržaju vlage, gustoći i debljini betona. Čelične konstrukcije zaštićene protupožarnim premazima imaju veću otpornost na visoke temperature [74].

Propisana otpornost na povišene temperature i nepropusnost za dim - protupožarna vrata moraju izdržati visoke temperature bez deformiranja, pa se u njih ugrađuju ukrute kako bi se smanjilo deformiranje vrata uslijed izloženosti visokim temperaturama [75]. Protupožarna vrata obično se ispituju u laboratorijskim uvjetima sa standardnim toplinskim opterećenjem kako bi se procijenio njihov stupanj otpornosti. Međutim, nakon ugradnje protupožarnih vrata nije moguće izravno odrediti njihov stupanj otpornosti u stvarnim uvjetima požara [76]. Značajno smanjenje širenja dima i veliko poboljšanje uvjeta vidljivosti može se postići dimnim preprekama [77]. Sprječavanju širenja dima mogu pomoći i zračne zavjese, koje se mogu koristiti kao dimne prepreke ako temperature dimnih plinova nisu visoke [78].

2. Aktivna zaštita od požara

Odnosi se na tehničke sustave, instalacije i opremu koji u uvjetima požara bitno mijenjaju svoj status i pogonsko stanje u odnosu na redovno radno stanje ili se aktiviraju isključivo u slučaju požara te aktivno sudjeluju u gašenju. Zadaća aktivne zaštite od požara je gašenje i ograničavanje širenja požara te stvaranje što povoljnijih i sigurnijih uvjeta za evakuaciju korisnika i djelovanje vatrogasnih i spasilačkih službi.

Sustavi aktivne zaštite od požara važni za ovaj rad dijele se na:

1. Sustav za dojavu požara - ne spada izravno u sustave aktivne zaštite od požara, ali se njegovom aktivacijom pokreće većina sustava aktivne zaštite od požara. Sustav za dojavu požara, odnosno vatrodojavni sustav, sustav je za dojavu opasnosti koji se koristi za izravan poziv u pomoć u slučaju opasnosti od požara, kao i za otkrivanje i dojavljivanje požara u najranijoj fazi. Sustav se sastoji od međusobno povezanih elemenata koji služe za otkrivanje i dojavu požara u unaprijed odabranom prostoru. Vatrodojavni sustav može se kombinirati s ostalim sustavima, odnosno može upravljati ostalim sustavima aktivne zaštite od požara nakon otkrivanja požara. Uključuje signalno-alarmne uređaje koji automatski uočavaju požar i prenose informacije o požaru [79]. Požari su često povezani s velikim štetama, a budući da je vrijeme kritičan čimbenik, otkrivanje požara visoko osjetljivim osjetnicima omogućuje prepoznavanje požara u ranoj fazi. Napajanje električnom energijom sustava za dojavu požara izvodi se iz dva nezavisna izvora. Glavni izvor napajanja je električna mreža ili agregat (primjerice dizelski agregat), a pričuvni izvor napajanja je akumulatorska baterija

koja je u normalnom radu u režimu punjenja. Prijelaz s jednog na drugi izvor napajanja mora se provesti u vremenu kraćem od 30 s, pri čemu ne smije utjecati na rad sustava za dojavu požara.

2. Stabilni sustavi za gašenje požara vodom

Sprinkler sustav - osnovne izvedbe sprinkler sustava su mokri sprinkler sustav, koji se primjenjuje u prostorima gdje ne postoji opasnost od smrzavanja jer se u cjevovodu nalazi voda, te suhi sprinkler sustav, koji se primjenjuje u prostorima gdje postoji opasnost od smrzavanja, pa se u cjevovodu nalazi komprimirani zrak. Mokri sprinkler sustav ima visoku učinkovitost u gašenju požara jer voda dolazi do mlaznice odmah po aktiviranju sprinkler mlaznice. Kod suhog sprinkler sustava postoji kašnjenje dolaska vode do sprinkler mlaznice zato što prije izlaska vode iz cjevovoda mora izaći komprimirani zrak. Pouzdanost sprinkler sustava može se povećati ugradnjom cisterni i spremnika za vodu kako nestanak vode ne bi poremetio rad sustava, pravilnom ugradnjom sprinkler mlaznica, ugradnjom dizelskog agregata za slučaj nestanka električne energije te ugradnjom dodatne crpke [80]. Sprinkler sustav može biti pouzdan i učinkovit način za smanjenje rizika od požara u zgradama ako se pravilno održava. Pri pouzdanom radu sprinkler sustava temperature koje utječu na nosive konstrukcije često su relativno niske te nosive konstrukcije obično nisu ugrožene požarom [81].

Hidrantska mreža za gašenje požara - sustav cjevovoda, uređaja i opreme kojim se voda od izvora dovodi do štice prostora i građevina. Za zaštitu građevina koriste se unutarnje hidrantske mreže. Dovoljna opskrba vodom za gašenje požara ključna je za učinkovito gašenje požara. Stoga je potrebno posebno obratiti pažnju na određivanje operativnog dometa gašenja požara te na raspored protupožarnih hidranata [82].

Vodene zavjese - sprječavaju širenje dima i topline iz prostora zahvaćenog požarom u područje bez požara. Prednost vodenih zavjesa je brz učinak hlađenja, a ekološki su prihvatljive. Međutim, nedostaci su potreba za velikim količinama vode i opasnost od korozije, što zahtijeva povećano održavanje sustava [83].

Vodena magla - tehnologija zaštite od požara vodenom maglom pod visokim pritiskom je pouzdana, može se pokrenuti odmah nakon otkrivanja požara i nije opasna za ljude [84].

3. Stabilni sustavi za gašenje požara plinom

Princip gašenja požara plinskim sustavima temelji se na uvođenju plina u prostor radi smanjenja koncentracije kisika, odnosno prekida procesa izgaranja. Plinski sustavi za gašenje požara učinkoviti su i uzrokuju minimalna oštećenja štice prostora, ali pojedina sredstva za gašenje mogu imati nepovoljan utjecaj na okoliš [85]. Novija plinska sredstva

razvijena su s ciljem smanjenja utjecaja na okoliš i povećanja sigurnosti za ljude. Takva sredstva omogućuju primjenu u prisutnosti osoba uz propisana sigurnosna ograničenja, ali se i dalje ne mogu smatrati potpuno bezopasnim.

Sustav za gašenje požara ugljikovim dioksidom - sustavi za gašenje požara ugljikovim dioksidom su najstariji plinski sustavi gašenja požara koji su još uvijek u ograničenoj primjeni [86]. Princip gašenja požara sustavima s ugljikovim dioksidom temelji se na smanjenju koncentracije kisika u šticeu prostoru istiskivanjem zraka ugljikovim dioksidom. Kod primjene navedenih sustava potrebno je provesti sve mjere zaštite ljudi u šticeu prostoru, s obzirom na to da su koncentracije ugljikova dioksida potrebne za gašenje požara opasne i mogu biti smrtonosne.

Hidrofluorouglik - (HFC-227ea – trgovački naziv FM 200) - plinsko je sredstvo za gašenje požara koje se koristi kao zamjena za halon 1301, čija je uporaba zabranjena zbog štetnog utjecaja na ozonski omotač. Sredstvo je bez boje i mirisa, električno je neprovodljivo te je prikladno za gašenje požara krutih i tekućih goriva. Učinkovito je u zaštiti prostora s elektroničkom opremom, telekomunikacijskih sustava te pri gašenju požara baterijskih sustava [87].

Fluoroketon (trgovački naziv Novec 1230) - plin kemijske formule $C_6F_{12}O$ gasi požar prvenstveno apsorpcijom topline i kemijskom inhibicijom procesa izgaranja. Djeluje uklanjanjem topline i slobodnih radikala iz zone gorenja, pri čemu ne smanjuje koncentraciju kisika u prostoru. Prikladan je za požare krutih i tekućih goriva te za uređaje koji ostaju pod naponom električne energije tokom gašenja. Međutim, tokom gašenja požara fluoroketonom uočeni su fenomeni jačanja požara i velika proizvodnja fluorovodika [88].

4. Sustavi ventilacije i mehaničkog odimljavanja

Ventilacijski sustavi u zaštiti od požara dijele se na sustave prirodnog i sustave mehaničkog odimljavanja. Kod sustava prirodnog odimljavanja, što su veći otvori za prirodnu ventilaciju, to je sustav učinkovitiji. Toksičan dim i dimni plinovi brže se uklanjaju, a vidljivost u prostoru se s vremenom povećava. Nadalje, sustav je učinkovitiji kada su odjeljci mali zato što manji odjeljci bolje zadržavaju dim i povećavaju učinak dimnjaka, osobito kada su otvori za dobavu vanjskog zraka veći i smješteni što je moguće niže u prostoru. No, brzina i smjer vjetra imaju velik utjecaj na učinkovitost sustava prirodnog odimljavanja [89]. Sustavi mehaničkog odimljavanja ne uklanjaju samo dim, već i snižavaju njihovu temperaturu, čime se sprječava pojava rasplamsavanja požara, a detaljno su opisani u Poglavlju 2.

5. Posebni stabilni sustavi za gašenje požara

Specijalni sustavi su, primjerice, sustavi za smanjivanje koncentracije kisika u zraku. Koriste se najčešće u skladišnim objektima kao alternativa zaštiti sprinkler instalacijom. Osnovni princip rada je istiskivanje kisika u zatvorenom prostoru dušikom. Niska koncentracija kisika smanjuje mogućnost paljenja i širenja požara u zaštićenom prostoru. Ključni parametar je granična koncentracija kisika, definirana kao najniža koncentracija kisika koja može podržati izgaranje za određeno gorivo [90].

1.7. Požari u podzemnim garažama

Povećanjem gradskog prometa i broja vozila na ulicama gradova, izgradnjom velikih trgovačkih centara, stambenih zgrada, sportskih i drugih građevina pojavila se potreba za sve većim brojem parkirališnih mjesta. Nedostatak prostora doveo je do naglog povećanja izgradnje podzemnih garaža. Prema podacima Building Research Establishment (BRE) iz Velike Britanije, u razdoblju 1994.–2005. u podzemnim garažama u Velikoj Britaniji dogodila su se 3096 požara, a od toga je 1592 požara nastalo zapaljenjem vozila [91]. U navedenim požarima dvije osobe smrtno su stradale, a 87 osoba bilo je povrijeđeno. U podzemnim garažama stambenih zgrada zabilježeno je samo 5,5 % ukupnog broja požara u podzemnim garažama, ali je u tim požarima stradalo 26 % od ukupnog broja unesrećenih osoba. Općenito se smatra da požari cestovnih vozila čine otprilike 20 % ukupnog broja požara. Stoga je bitno smanjiti uzroke nastanka požara cestovnih vozila. Iako postoji više uzroka zapaljenja vozila, rijetko je riječ o samo jednom uzroku. Najčešće je to kombinacija mehaničkih i kemijskih uzroka, uz utjecaj ljudskog faktora. Američki Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (National Institute of Standards and Technology – NIST) razvio je programski paket FDS (*Fire Dynamic Simulator*) za simulaciju i analizu požara. Programski paket primijenjen je za predviđanje širenja požara i dimnih plinova u podzemnoj garaži. Rezultati istraživanja pokazali su da se u zatvorenom prostoru, kao što je podzemna garaža, dimni plinovi nastali požarom mogu brzo i opasno širiti u prostoru podzemne garaže [92]. Cijeli volumen prostora može se vrlo brzo ispuniti dimom, prije aktivacije sprinkler instalacije i prije završetka evakuacije korisnika podzemne garaže. Osim toga, ovisno o snazi požara, temperature kojima su izloženi konstruktivni elementi mogu doseći i do 1000 °C [38]. Veći kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja, ovisno o požarnom scenariju i uvjetima dovoda zraka, može ubrzati širenje dima prostorom podzemne garaže. U određenim uvjetima to može povećati dovod kisika u zonu izgaranja, čime se povećava intenzitet požara i porast temperatura do vrijednosti koje ugrožavaju ljudske živote. Nakon postizanja najvećih vrijednosti temperatura može postupno opadati zbog nakupljanja dima i smanjenja udjela kisika, što dovodi do smanjenja učinkovitosti izgaranja. Nadalje, veći

kapacitet ventilacije može povećati dovod kisika u zonu izgaranja, čime se povećava intenzitet požara i vjerojatnost rasplamsavanja. Veća količina nastalog dima smanjuje vidljivost i otežava intervenciju vatrogasnih postrojbi te evakuaciju zaostalih korisnika iz podzemne garaže. Analizom sustava mehaničkog odimljavanja manjeg kapaciteta ustanovljeno je kako se nakon određenog vremena intenzitet požara smanjuje. Razlog smanjenja intenziteta požara mogao bi biti da se zbog povećane količine dima smanjuje zapaljivost okolnog zraka u podzemnoj garaži. Ali manji kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja rezultira većom količinom čađe nastale uslijed neučinkovitog izgaranja. Stoga je upitno da li je povećanje, odnosno smanjenje kapaciteta sustava mehaničkog odimljavanja u svim slučajevima djelotvorno. Zbog toga je potrebno analizirati kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja, poboljšati zaštitu od požara u podzemnim garažama, povećati broj evakuacijskih izlaza i skratiti puteve izlaza vozila. Isto tako, potrebno je obratiti pažnju na postavljanje znakova za evakuaciju kako bi isti bili vidljivi i točno označavali puteve evakuacije do najbližeg izlaza. Svaka simulacija mora se temeljiti na realističnom scenariju požara, što zahtijeva poznavanje realnih i pouzdanih ulaznih podataka za izvođenje simulacija [93]. U požarnom inženjerstvu, pri primjeni modela zaštite od požara potrebno je poznavati mogućnosti modela, njegova ograničenja te granice njegove pouzdanosti. Računalni modeli moraju se validirati eksperimentalno na stvarnim slučajevima. Osnovna svrha sustava mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama nije evakuacija korisnika, već pomoć vatrogasnim postrojbama tokom intervencije. Sustav mehaničkog odimljavanja izbacuje dim iz prostora podzemne garaže te povećava vidljivost vatrogasnim postrojbama kako bi lakše uočile izvor požara, odnosno opasnosti tokom intervencije. Nadalje, omogućuje im da priđu bliže izvoru požara i time učinkovitije gase požar. Povratni sloj dima (*engl. backlayering*) je pojava pri kojoj se dim kreće suprotno od predviđenog smjera strujanja prema mjestu izbacivanja. Do te pojave dolazi kada strujanje koje stvara sustav mehaničkog odimljavanja nije dostatno da nadvlada potisak uzrokovan snagom požara, čime se mogu ugroziti vatrogasci. Zbog toga je potrebno odrediti kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja, odnosno brzinu kretanja dima prema mjestu izbacivanja iz prostora podzemne garaže. Ako je kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja nedostatan, odnosno ako je u požarnom režimu na raspolaganju samo sustav predviđen prvenstveno za ventilaciju, brzine kretanja dima mogu biti nedovoljne za sprječavanje povratnog kretanja dima [49]. Na prvi pogled postoji sličnost sustava mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža s uzdužnom ventilacijom cestovnih tunela, za koje su razvijene formule za kritične brzine strujanja dimnih plinova. Kritična brzina jest najmanja brzina strujanja zraka potrebna za usmjeravanje dima od izvora požara prema mjestu odsisavanja i sprječavanje njegova širenja u suprotnom smjeru. U tunelima se kritična brzina u praksi često

definira kao ulazna brzina vanjskog zraka u tunel. Podzemne garaže, međutim, imaju znatno drugačiju geometriju u usporedbi s tunelima, osobito u pogledu omjera širine i visine. Dok su u tunelima širina i visina obično istog reda veličine i znatno manje od duljine tunela, u podzemnim garažama je visina obično znatno manja od širine i duljine. Posljedično, primjena formula razvijenih za izračun kritične brzine u tunelima postaje upitna za podzemne garaže. Usporedba teorijskih i empirijskih modela, eksperimenata te numeričkih analiza kretanja dimnih plinova u cestovnim tunelima i podzemnim garažama, zbog razlika u dimenzijama (širina, visina i duljina) između njih, nije dala jednoznačne rezultate [94]. Većina podzemnih garaža ima više razina. Razine su međusobno povezane uzlazno-silaznim rampama. Takve rampe mogu imati negativan utjecaj na kretanje dima u prostoru podzemne garaže, iako se mogu koristiti i za dobavu vanjskog zraka na razinu na kojoj je nastao požar. Pozitivan ili negativan utjecaj rampe na kretanje dima uvelike ovisi o geometriji, odnosno arhitekturi podzemne garaže [95]. Kod otvorenih i poluotvorenih nadzemnih garaža potrebno je uzeti u obzir položaj i dimenzije otvora u pročeljima, raspored greda i stupova u prostoru garaže te utjecaj vjetra. Svi navedeni čimbenici mogu imati nepovoljan utjecaj na zaštitu od požara i djelovanje vatrogasnih postrojbi tokom intervencije [96]. U požaru u garaži King's Dock u Liverpoolu, Velika Britanija, 31.12.2017. [97], bilo je zahvaćeno oko 1200 vozila na sedam razina. Prema izvještaju vatrogasne postrojbe Merseyside, prvi znakovi požara vozila opaženi su na sigurnosnoj kameri 31. prosinca 2017. u 16.29 sati. Trinaest minuta kasnije, u 16.42, vatrogasna postrojba zaprima dojavu o požaru te tri minute nakon dojave stiže na mjesto događaja, odnosno šesnaest minuta nakon početka požara. Međutim, požar se toliko proširio da su vatrogasne postrojbe zbog sigurnosti povučene s gašenja požara nakon dva sata od početka požara. Snimke sigurnosnih kamera pokazale su da su neki korisnici uočili požar vozila, ali nisu uputili žurni poziv vatrogasnoj postrojbi. Neki korisnici su prilikom izlaza iz garaže obavijestili djelatnike u garaži da su vidjeli požar, a neki nisu poduzeli ništa. Sjeverno od Stockholma, u gradu Märsta u Švedskoj, 26.8.2021. izgorjelo je dvjestotinjak vozila, a više od 300 vozila izgorjelo je u požaru 7.1.2020. u gradu Stavangeru u Norveškoj [98]. U 15.25 sati izbio je požar u vozilu Opel Zafira neposredno nakon pokretanja u prizemlju parkirališta zračne luke Sola u Stavangeru. Osam minuta kasnije hitni operativni centar primio je prvu dojavu o požaru vozila, a gotovo u isto vrijeme hitna medicinska pomoć dobila je identičnu dojavu. Otprilike 20 minuta nakon početka požara vatrogasna postrojba stigla je na požarište te započela pripreme za gašenje. Pet minuta nakon toga dojavljeno je da je požar zahvatio prvi kat. Nakon otprilike dva sata od početka požara urušili su se dijelovi parkirališta. Neke od prvih primljenih poruka navodile su da gori električno vozilo, a policija je o tome obavijestila medije u ranoj fazi

incidenta. Zbog toga su električna vozila bila u središtu medijskih izvještaja o incidentu, posebice tokom prva 24 sata. Međutim, u izvještaju inspekcije od 23. siječnja 2020. naglašeno je da električna vozila nisu utjecala na tok požara drugačije nego što se moglo očekivati u požaru koji uključuje konvencionalna benzinska ili dizelska vozila te da nisu primijećene značajne razlike u intenzitetu ili trajanju požara [99]. U nesreći nije bilo ljudskih žrtava niti ozlijeđenih. Požar je, međutim, prouzročio veliku materijalnu štetu na parkiralištu i na nekoliko stotina vozila koja su bila parkirana u trenutku požara. Nadalje, požar je utjecao na zračni promet jer se zračna luka morala zatvoriti. U Corku, u Republici Irskoj, 2.9.2019. izgorjelo je preko 60 vozila [100], a u gradu Schipholu u Nizozemskoj 90 vozila bilo je zahvaćeno požarom [101]. U požaru vozila u Sydneyju u Australiji više od 80 vozila bilo je zahvaćeno požarom [102]. Početni požar trave na javnom otvorenom parkiralištu u Homebushu, u središtu gradskog područja, rezultirao je oštećenjem ili uništenjem više od 80 vozila. Čimbenici koji su pridonijeli brzom razvoju požara uključivali su visoku temperaturu (33,8 °C), jake vruće zapadne vjetrove brzine oko 40 km/h, puno parkiralište te vrlo male razmake između parkiranih vozila, travnatih biljaka i velikih količina vrtnog komposta. Pjena kao medij za gašenje požara nije korištena jer bi njezina uporaba mogla uzrokovati ekološku štetu okolnim močvarama. Točan uzrok požara nije utvrđen, ali pretpostavlja se da je najvjerojatniji uzrok odbačena cigareta. Odbačene cigarete, čak i kada se bace na tvrde površine ceste, mogu se otkotrljati u travu ili grmlje uz cestu. Najviše osoba stradalo je u požaru garaže u gradu Jecheonu u Južnoj Koreji 21.12.2017. [103]. Požar je izazvala iskra u žicama električnih grijača u 15.53 sati. Električni grijači bili su postavljeni u stropu prvog kata garaže. Stropna konstrukcija se urušila na parkirano vozilo, proširivši vatru na druga parkirana vozila. Vatrogasna postrojba Jecheona stigla je u 16.00 sati na mjesto događaja, ali nisu mogli pristupiti požaru zbog opasnosti od eksplozije vozila i spremnika za ukapljeni plin. Izlaz za slučaj nužde na drugom katu, gdje se nalazila ženska sauna, služio je kao skladište. Nije bilo zaposlenika koji bi pomogli u evakuaciji korisnika, a automatska vrata na glavnom ulazu bila su razbijena, što je otežalo bijeg žrtvama i pridonijelo broju stradalih. U nesreći je poginula 29 osoba, od toga 20 u ženskoj sauni, a ozlijeđeno je 36 osoba. U tablici 1 prikazani su statistički podaci većih požara u podzemnim i nadzemnim garažama, uključujući broj vozila zahvaćenih požarom te podatke o poginulim i ozlijeđenim osobama.

Tablica 1. Statistički podaci većih požara u podzemnim i nadzemnim garažama

Mjesto	Država	Godina	Broj vozila zahvaćenih požarom	Broj poginulih	Broj ozlijeđenih
Schiphol	Nizozemska	2002	90	0	0
Gretzenbach	Švicarska	2004	100	7	3
Sydney	Australija	2013	80	0	0
Jecheon	Južna Koreja	2017	nije poznato	29	36
Liverpool	Velika Britanija	2017	1200	0	0
Cork	Irska	2019	60	0	0
Stavanger	Norveška	2020	300	0	0
Märsta	Švedska	2021	200	0	0

Potrebna je posebna obuka vatrogasaca za gašenje požara električnih vozila, s naglaskom na pristup požaru i tehniku gašenja. U uvjetima aktivirane sprinkler instalacije može nastati vruća vodena para, a u prostoru se mogu pojaviti klorovodična i fluorovodična kiselina. Nastanak tih kiselina predstavlja veliku opasnost vatrogasnim postrojbama, posebice u slučaju rada sustava mehaničkog odimljavanja. Osim električnih vozila i vozila na fosilna goriva, vatrogasci se suočavaju i s požarima vozila pogonjenih alternativnim gorivima. Numeričkim simulacijama pokazano je da ispuštanjem ukapljenog naftnog plina iz spremnika volumena 70 litara može nastati oblak pare volumena do 200 m³, koji može ispuniti cijelu visinu podzemne garaže [33]. Vozila pogonjena na komprimirani prirodni plin također predstavljaju sigurnosni rizik u podzemnim garažama [34], osobito u slučaju punionica komprimiranog prirodnog plina u podzemnim garažama. U takvim je uvjetima potrebno posebno obratiti pažnju na sustav mehaničke ventilacije, s obzirom na to da prirodna ventilacija nije dovoljna, kao i na sustave za otkrivanje ispuštanja plina. Požar vozila pogonjenih na vodik može se brže širiti u prostoru podzemne garaže u usporedbi s požarom vozila na fosilna goriva [104]. Što se tiče protupožarnih sustava, ispitivanja su pokazala da obavijesti putem razglasa pomažu ljudima tokom evakuacije. Ljudi brže reagiraju, smireniji su i pravodobno se kreću prema izlazima [105]. Mehaničko odimljavanje pomaže vatrogasnim postrojbama tokom intervencije, ali investicijska opravdanost takvog sustava može biti upitna. Uvjeti gašenja požara u podzemnim garažama značajno se razlikuju od onih kod požara u tunelu. Međutim, kao i kod tunela, vatrogasne službe moraju biti upoznate s tim građevinama. Podzemne garaže razlikuju se s obzirom na arhitekturu prostora, sigurnosne instalacije i namjenu. Pristupi podzemnim

garažama često nisu uočljivi na prvi pogled, a ulazi, odnosno izlazi, mogu biti međusobno udaljeni. Dodatni prostori u podzemnim garažama, primjerice skladišta trgovina, mogu predstavljati dodatnu požarnu ugrozu. Osim toga, okolina iznad i oko podzemne garaže od velike je važnosti za intervenciju vatrogasnih postrojbi. Požari u podzemnim garažama mogu ugroziti ljude u zgradama iznad podzemnih garaža ili u neposrednoj blizini, pri čemu može doći do ozljeđivanja ili smrtnih stradavanja. U podzemnoj garaži može se nalaziti veći broj vozila, slično kao i u tunelu u trenutku požara. Međutim, značajna je razlika u tome što se u podzemnoj garaži u pravilu nalazi manji broj osoba u određenom trenutku. Postupci zaštite od požara u podzemnoj garaži u određenoj su mjeri usporedivi s postupcima kod požara u podrumu. Stubišta i ulazi se održavaju u nadtlaku kako bi se spriječilo širenje dima u zgradi, a potrebno je provjeriti ugrožava li ljude dim koji izlazi iz podzemne garaže. Primjerice, dim se može uzdizati uz pročelje zgrade i kroz otvore ulaziti u trgovine ili stanove, što je potrebno spriječiti ventilacijom, odnosno mehaničkim odimljavanjem. Ako u podzemnoj garaži nije predviđen sustav mehaničkog odimljavanja, uporaba prijenosnih ventilatora može pomoći tokom intervencije vatrogasnih postrojbi povećanjem vidljivosti. Numeričkim analizama pokazano je da veći kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže poboljšava vidljivost [106].

1.6. Uzroci požara vozila

Najčešći uzroci požara cestovnih vozila su:

1. nedostaci u izradi vozila
2. loše održavanje vozila
3. sudar vozila
4. namjerno zapaljenje vozila
5. zapaljenje električnih i hibridnih baterija te katalizatora vozila
6. pregrijavanje motora
7. zapaljenje gorivih tekućina
8. greška na električnim instalacijama
9. curenje goriva

Statistički gledano, mehanički i električni kvarovi smatraju se najčešćim uzrocima požara vozila [107]. Nedostatke u izradi vozila kao uzrok nastanka požara nije jednostavno utvrditi, s obzirom na to da su vozila nakon požara često teško oštećena. Vozila se sastoje od velikog broja pojedinačnih dijelova, zbog čega je izazovno jednoznačno odrediti koji je neispravno proizveden dio stvarni uzrok nastanka požara. Ipak, detaljnim istraživanjem nakon požara u pojedinim je slučajevima moguće utvrditi nedostatak u izradi koji je doveo do zapaljenja vozila. Tako je, primjerice, istraživanjem utvrđeno da zavarivanje postojeće pukotine na spoju

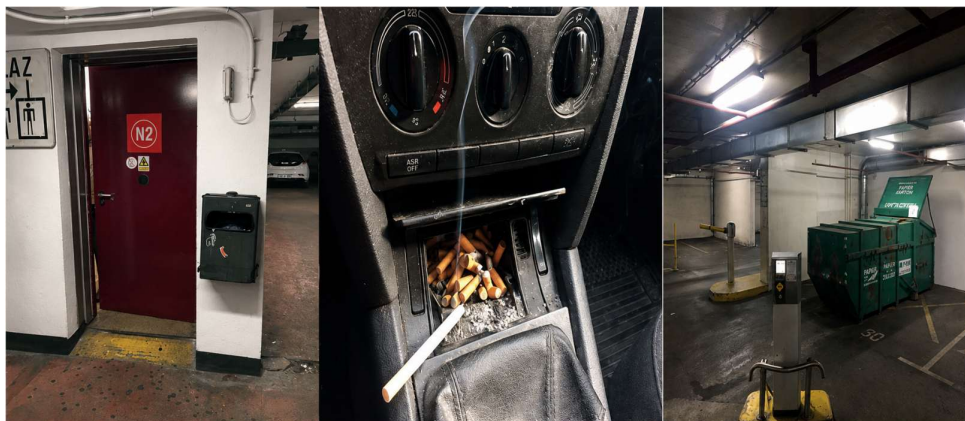
katalizatora i ispušne grane nije spriječilo proboj vrućih plinova, što je dovelo do zapaljenja goriva [108]. Požari se najčešće javljaju u području motora, odnosno u motornom prostoru, jer se radi o najtoplijem dijelu vozila [109]. Utvrđivanje uzroka zapaljenja u motornom prostoru složeno je zbog velike količine zapaljivih materijala i gorivih tekućina koje se ondje nalaze. Najčešći nedostaci u izradi vozila koji dovode do požara odnose se na sustave za gorivo, električne sustave te druge sustave u kojima se nalaze zapaljive tekućine [110]. Još je složenije utvrditi ulogu lošeg održavanja vozila kao uzroka požara. Čak ni detaljnim forenzičkim istraživanjem često se ne može sa sigurnošću potvrditi da je loše održavanje izravni uzrok požara vozila, iako se u pojedinim slučajevima to može pretpostaviti na temelju materijalnih dokaza [111]. Veliki teretni kamioni i tegljači izloženi su većem riziku zapaljenja uslijed sudara u usporedbi s osobnim i lakim dostavnim vozilima [112]. U Sjedinjenim Američkim Državama godišnje se namjerno podmetne više od 200 000 požara, što čini približno 13 % ukupnog broja požara. Od toga je oko 15 %, odnosno približno 30 000 požara, uzrokovano namjernim zapaljenjem vozila [113]. Najčešći motivi namjernog zapaljenja vozila povezani su s kriminalnim aktivnostima, poput utjerivanja dugova [114], ili s pokušajima prijave osiguravajućih društava [115]. Postoji više razloga zbog kojih je danas izraženije širenje požara u podzemnim i nadzemnim garažama te zbog kojih je veći broj vozila zahvaćen požarom u usporedbi sa šezdesetim i sedamdesetim godinama prošlog stoljeća. Suvremena vozila većih su dimenzija, odnosno veće duljine i širine, zbog čega je razmak između parkiranih vozila manji. Iako je širina većine vozila manja od dva metra, ovisno o modelu, uključujući vanjske retrovizore, ukupna širina vozila često prelazi dva metra [116]. Time se dodatno smanjuje slobodan prostor između parkiranih vozila, što otežava evakuaciju korisnika iz podzemnih garaža, primjerice u slučaju požara, jer prolaz između vozila često nije dovoljan. Osim toga, suvremena vozila sadrže znatno veće količine plastičnih materijala nego ranije [117]. Primjerice, 2014. godine vozila su u prosjeku sadržavala oko 200 kg plastike, dok je 2020. godine ta količina porasla na približno 350 kg, što predstavlja povećanje od gotovo 80 %. Danas oko 85 % vozila ima plastične spremnike goriva.

1.7. Električna vozila u podzemnim garažama

Električna vozila za pogon koriste baterijski sustav (*engl. rechargeable energy storage system – RESS*) koji napaja elektromotor putem pripadnih pretvarača i upravljačke elektronike. Razvoj pogonskih baterijskih sustava električnih vozila obuhvaća više generacija punjivih baterijskih tehnologija, uključujući olovne baterije (Pb), nikal-kadmij baterije (NiCd) i nikal-metalhidrid baterije (NiMH), dok suvremena električna vozila gotovo isključivo primjenjuju litij-ionske baterije (Li-ion). Pogonske baterije električnih vozila u pravilu su integrirane u podvozje

(podnu strukturu) vozila, što povoljno utječe na težište, ali istodobno zahtijeva konstrukcijsku zaštitu kućišta baterije od mehaničkih oštećenja podvozja tokom vožnje. U slučaju sumnje na oštećenje baterijskog sustava nužan je pregled od strane ovlaštene stručne osobe. U požarnom smislu, požari koji uključuju litij-ionske baterije specifični su zbog mogućnosti pojave termalnog bijega (*engl. thermal runaway*). Termalni bijeg predstavlja nekontrolirani proces u kojem porast temperature unutar baterije uzrokuje niz egzotermnih reakcija koje dodatno povećavaju temperaturu, što može rezultirati zapaljenjem, eksplozijom ili ponovnim rasplamsavanjem požara. Nakon pokretanja, proces se održava zbog kontinuiranog oslobađanja topline te ga je moguće zaustaviti samo značajnim odvođenjem topline ili prestankom reakcija unutar baterije. Početne faze toplinske nestabilnosti litij-ionskih baterija javljaju se u temperaturnom rasponu približno 100–200 °C [118]. Snaga i razvoj požara u garažnom prostoru ne ovise samo o vrsti goriva, nego o nizu čimbenika: dimenzijama i masi vozila [119], udjelu polimernih materijala [120], stanju napunjenosti baterije [121], ventilacijskim uvjetima [122], zauzetosti garaže (broju vozila), međusobnim razmacima, geometriji prostora (površini i visini stropa) te mogućnosti širenja požara na susjedna vozila [123]. Kod hibridnih vozila istodobno su prisutni baterijski sustav i spremnik goriva, pa u požaru sudjeluju dva različita izvora energije, što može utjecati na dinamiku razvoja požara u odnosu na vozila s jednim izvorom energije. Rizik nastanka požara povezan s električnim vozilima može se smanjiti pridržavanjem preporuka proizvođača vozila i opreme za punjenje te izbjegavanjem uporabe neodgovarajućih utičnica i produžnih kabela. Pritom je važno razlikovati požar električnog vozila tokom punjenja, požar električnih instalacija i opreme za punjenje te požar vozila koji uključuje baterijski sustav, jer se navedeni scenariji razlikuju prema uzroku, razvoju i načinu gašenja. Gašenje požara električnog vozila prije nego što požar zahvati bateriju u pravilu je usporedivo s gašenjem požara vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Ako baterija još nije zahvaćena požarom, rano ograničavanje širenja požara i intenzivno hlađenje mogu smanjiti vjerojatnost razvoja termalnog bijega. Ako dođe do termalnog bijega, pristup gašenju temelji se na hlađenju, najčešće primjenom vode, kako bi se smanjila temperatura baterije i ograničio daljnji razvoj reakcija, što može zahtijevati velike količine vode. U operativnom smislu prioritet je rano započinjanje gašenja, ograničavanje širenja požara na susjedna vozila te prilagodba postupanja arhitekturi garaže, mogućnostima pristupa, raspoloživoj opremi za premještanje vozila i razini osposobljenosti osoblja. Zbog specifičnosti litij-ionskih baterija, intervencije na požarima električnih vozila usmjerene su na intenzivno hlađenje baterijskog sustava. U tu svrhu mogu se primjenjivati velike količine vode, vatrogasni pokrivači ili spremnici za uranjanje vozila, ovisno o dostupnim uvjetima i taktičkoj procjeni. U situacijama kada izravan pristup bateriji nije

moguć, a ne postoji opasnost za okolne objekte, može se primijeniti strategija kontroliranog izgaranja uz istodobno hlađenje okoline i kontinuirano praćenje stanja. I nakon prestanka vidljivog izgaranja postoji mogućnost ponovnog zapaljenja, zbog čega je potrebno naknadno nadzirati vozilo i skladištiti ga na sigurnoj udaljenosti od građevina i drugih vozila, uz nastavak mjera hlađenja prema potrebi. Na slici 4 [124] prikazani su primjeri potencijalnih izvora zapaljenja u podzemnim garažama. Primjeri uključuju posude za otpad s tavicom za gašenje cigareta, pepeljare s nakupljenim opušcima u kabinama vozila te spremnike za papir smještene unutar garažnog prostora. Prikazani primjeri fotografirani su u podzemnim garažama na području Zagreba. Požar u podzemnoj garaži može nastati i uslijed tehničkog kvara, primjerice kratkog spoja na električnoj opremi ugrađenoj u objekt, uključujući elektromotore ventilacijskih sustava.



Slika 4. Primjeri izvora požara u podzemnim garažama

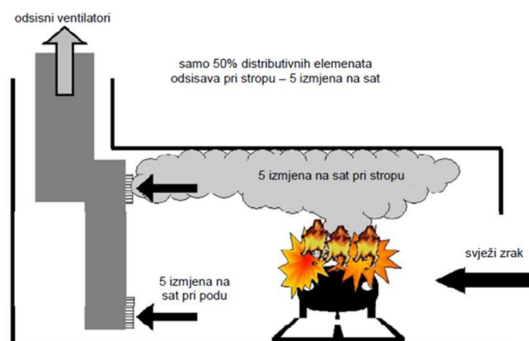
2. SUSTAVI VENTILACIJE I MEHANIČKOG ODIMLJAVANJA PODZEMNIH GARAŽA

Za ventilaciju i mehaničko odimljavanje podzemnih garaža u slučaju požara primjenjuju se različiti sustavi, ovisno o važećim propisima i arhitekturi garažnog prostora. Sustavi ventilacije koriste se za uklanjanje ispušnih i štetnih plinova, prvenstveno ugljikovog monoksida, dok se sustavi mehaničkog odimljavanja koriste za odvođenje dimnih plinova i topline nastalih požarom. Razlikuju se sustavi prirodnog i prisilnog, odnosno mehaničkog odimljavanja. Kod sustava prirodnog odimljavanja gradijent tlaka potreban za odvođenje dima ostvaruje se uzgonom uslijed razlike u gustoći vrućih dimnih plinova i hladnijeg okolnog zraka, dok se kod sustava prisilne ventilacije strujanje ostvaruje pomoću ventilatora. Sustavi prisilnog mehaničkog odimljavanja mogu biti izvedeni kao sustavi s vatrootpornim ventilacijskim kanalima, sustavi s potisnim ventilatorima (*engl. Jet Thrust Fan System*) [125] ili, kod manjih podzemnih garaža, sustavi s odsisnim ventilatorima. Navedeni sustavi koriste se za ventilaciju prostora i uklanjanje štetnih plinova iz garaže, a u slučaju požara postaju dijelovi sustava aktivne zaštite od požara, odnosno sustava mehaničkog odimljavanja. Ako sustav prirodne ili mehaničke ventilacije nije dovoljnog kapaciteta, koncentracije ispušnih plinova mogu uzrokovati ozbiljne zdravstvene posljedice, uključujući smrtni ishod [3]. Kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta zraka i učinkovito odimljavanje u slučaju požara, potrebno je odrediti odgovarajući kapacitet sustava ventilacije, odnosno brzinu strujanja zraka ili dima u prostoru garaže. Kod sustava s potisnim ventilatorima brzina strujanja zraka [126], odnosno dima [13], ovisi o međudjelovanju strujanja pod stropom i strujanja uzrokovanog radom ventilatora. Parametri poput položaja ventilatora, brzine zraka te položaja otvora za dobavu vanjskog zraka i odvod ispušnih plinova ili dima moraju se pažljivo odrediti [14]. Položaj odsisnih ventilatora također utječe na razinu koncentracije ugljikova monoksida u prostoru garaže [16], dok parkirana vozila značajno utječu na smanjenje vidljivosti u slučaju požara [48]. Sustav ventilacije treba imati kapacitet od najmanje 2,7 izmjena zraka na sat kako koncentracija ugljikova monoksida ne bi dosegla 50 ppm (*engl. parts per million, dijelova na milijun*) unutar garaže. Sustavi ventilacije često se dimenzioniraju na najmanje 3 izmjene zraka na sat. Veći utjecaj na koncentraciju ugljikova monoksida ima kretanje vozila na pojedinoj razini nego sam broj parkirališnih mjesta. Broj i površina otvora za dobavu vanjskog zraka utječu na strujanje zraka u prostoru i time na koncentraciju ugljikova monoksida. Kod garaža s više razina međudjelovanje razina, spojne rampe i drugi otvori utječu na koncentracije plinova na pojedinim razinama [127]. Položaj otvora za dobavu vanjskog zraka može utjecati na razvoj požara. Ako su otvori smješteni u blizini mjesta nastanka požara, ulaz vanjskog zraka može

ubrzati širenje požara i dimnih plinova [128]. Tokom zimskog razdoblja prirodna ventilacija može biti izraženija zbog većeg uzgona uzrokovanoj temperaturnom razlikom između unutarnjeg i vanjskog zraka [129]. U garažama za teretna vozila i autobuse zabilježene su veće koncentracije štetnih plinova nego u garažama za osobna vozila, pri čemu su najviše vrijednosti izmjerene u garažama teretnih vozila pogonjenih dizelskim gorivom, a zatim u garažama autobusa na ukapljeni naftni plin [23].

2.1. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja s ventilacijskim kanalima

Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja s vatrootpornim ventilacijskim kanalima bio je najčešće primjenjivano rješenje u podzemnim garažama prije uvođenja sustava s potisnim ventilatorima. Sustav karakteriziraju ventilacijski kanali izrađeni od vatrootpornog materijala ili kanali izrađeni od materijala koji nije vatrootporan, ali su naknadno obloženi vatrootpornom zaštitom. Takvi kanali raspoređeni su po prostoru garaže. Odsisni ventilatori za odimljavanje uklanjaju dimne plinove nastale požarom putem ventilacijskih kanala. Dim se odvodi preko odsisnih rešetki smještenih u gornjoj zoni garažnog prostora, dok se u donjoj zoni nalaze rešetke za odsis plinova težih od zraka. Na slici 5 [130] prikazan je princip rada sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže s ventilacijskim kanalima.



Slika 5. Princip djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja ventilacijskim kanalima

Nakon određivanja prostornog rasporeda ventilacijskih kanala u garaži izračunava se pad tlaka sustava, a na temelju dobivenog pada tlaka i potrebne količine zraka, odnosno dima koji se mora odsisati, odabire se jedan ili više odsisnih ventilatora. Broj ventilacijskih rešetki određuje se dijeljenjem ukupne količine zraka ili dima koji se mora odsisati s efektivnom površinom pojedine rešetke. Zrak se dovodi preko ulazno-izlaznih rampi i ventilacijskih okana. Prednost sustava s vatrootpornim ventilacijskim kanalima je njegova primjenjivost u različitim arhitektonskim izvedbama garaža, uključujući prostore s pregradama, zidovima i odvojenim prostorijama [41]. Nedostatak sustava je taj što su ventilacijski kanali velikih dimenzija, čime

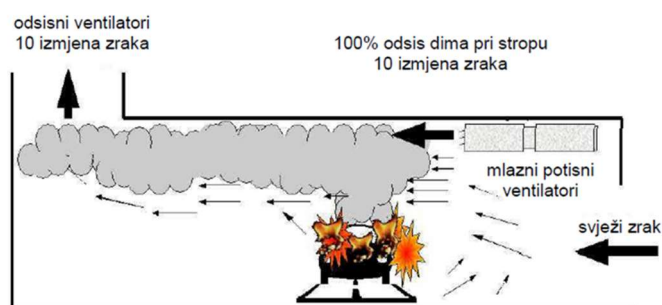
se smanjuje raspoloživa visina garaže, osobito u zonama voznih putova, te je potrebno usklađivanje s drugim instalacijama, poput kanalizacije i sprinkler sustava. Na slici 6 [131] prikazan je primjer sustava mehaničkog odimljavanja s vatrootpornim ventilacijskim kanalima, fotografiran u podzemnoj garaži na području Zagreba.



Slika 6. Sustav mehaničkog odimljavanja s kanalima za odvođenje dima

2.2. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima

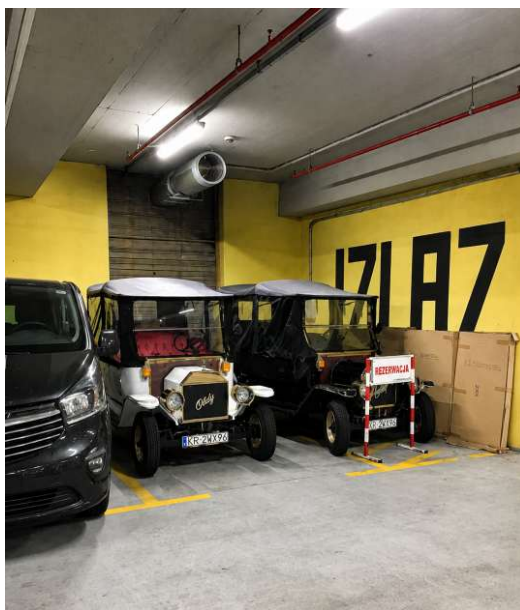
Ovaj sustav koristi potisnu silu koju ostvaruju potisni ventilatori smješteni na stropu podzemne garaže [132]. Zrak ili dimni plinovi nastali požarom usmjeravaju se prema mjestima ugradnje glavnih odsisnih ventilatora koji izbacuju onečišćeni zrak, odnosno dimne plinove izvan prostora garaže. Ventilatori za dobavu vanjskog zraka koriste se rijetko. U tom slučaju dobava zraka kontrolirana je njihovim radom. Na slici 7 [130] prikazan je princip rada sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže potisnim ventilatorima.



Slika 7. Princip djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima

Određivanje potrebnog broja i položaja potisnih ventilatora ovisi o površini podzemne garaže i njezinoj arhitekturi. Poseban utjecaj imaju raspored pregradnih zidova i položaj stubišta. Na odabir utječu i dodatni prostori unutar garaže te položaj okana za dobavu vanjskog zraka i odvod

štetnih plinova, odnosno dimnih plinova u slučaju požara [133]. Optimizacija broja i položaja potisnih ventilatora može se provesti primjenom numeričkog modeliranja [134]. Na slici 8 prikazan je potisni ventilator u podzemnoj garaži (fotografija autora), snimljen u podzemnoj garaži na području Zagreba.



Slika 8. Potisni ventilator u podzemnoj garaži

Zbog svojih dimenzija potisni ventilatori zauzimaju malo prostora, ne narušavaju svjetlu visinu garaže i ne ometaju vozne putove, a usklađivanje s ostalim instalacijama u prostoru je jednostavnije. Njihov raspored mora biti usklađen s položajem sprinkler mlaznica kako ne bi došlo do opstrukcije vodenog mlaza. Usmjeravanjem dima potisnim ventilatorima aktivira se manji broj sprinkler mlaznica, čime se uravnotežuje tlak vode u sprinkler sustavu [135]. Potisni ventilatori smanjuju pojavu povratnog kretanja dima [136], iako njihov rad može uzrokovati porast temperature u smjeru djelovanja ventilatora [137]. Također smanjuju polja takozvanih mrtvih zona, odnosno zona bez kretanja zraka [42]. U slučaju požara sustav s potisnim ventilatorima osigurava vidljivost od približno 5 metara do visine od 1,8 m [138]. Nedostatak sustava je što nije primjenjiv u svim arhitektonskim izvedbama garaža, osobito u garažama s velikim brojem pregrada ili zidova. Za optimalan, odnosno pravilan raspored potisnih ventilatora u prostoru podzemne garaže, potrebno je poznavati potisak ventilatora.

$$T = V v \varrho \quad (1)$$

gdje je:

T – potisak ventilatora [N]

V – kapacitet ventilatora [m^3/s]

v – brzina na izlazu ventilatora [m/s]

ϱ – gustoća zraka pri $20\text{ }^\circ\text{C}$ – $1,2\text{ }[\text{kg}/\text{m}^3]$

Domet struje zraka, odnosno mlaza iza ventilatora, određuje se kao udaljenost od izlaza ventilatora na kojoj se brzina zraka u središtu mlaza smanji na unaprijed određenu graničnu vrijednost. Za ventilaciju se kao granična vrijednost uzima $0,1\text{ m/s}$, dok se za mehaničko odimljavanje uzima vrijednost od $0,7$ do $1,2\text{ m/s}$. Primjerice, za potisni ventilator s potiskom od 20 N , pri brzini od $0,1\text{ m/s}$, domet mlaza iznosi $30\text{--}40\text{ m}$. Za mehaničko odimljavanje, pri potisku od 50 N , domet je također $30\text{--}40\text{ m}$, ali je brzina mlaza na toj udaljenosti $0,7\text{--}1,2\text{ m/s}$. Struja zraka se teoretski širi pod kutem od $15^\circ\text{--}25^\circ$. Domet i širina mlaza mogu se odrediti jednadžbama:

$$x = 4 d \frac{v_0}{v_x} \quad (2)$$

$$y = 2 \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

gdje je:

x – domet mlaza [m]

d – promjer ventilatora [m]

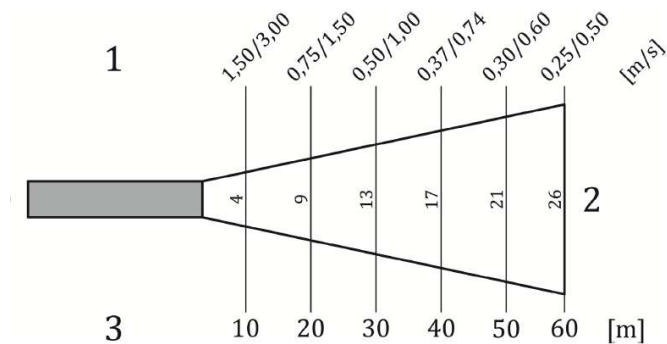
v_0 – brzina zraka na izlazu iz ventilatora [m/s]

v_x – brzina zraka na udaljenosti x od izlaza ventilatora [m/s]

y – horizontalno širenje mlaza [m]

α – kut širenja struje mlaza [$^\circ$]

Na Slici 9 prikazan je teoretski primjer dometa i širine mlaza potisnog ventilatora s potiskom 50 N i izlaznom brzinom zraka 20 m/s .



Slika 9. Domet i širina mlaza potisnog ventilatora

gdje je:

1 – brzina zraka (viša / niža brzina) [m/s]

2 – širina mlaza [m]

3 – domet mlaza [m]

2.3. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja odsisnim ventilatorima

Sustav s odsisnim ventilatorima najjednostavniji je sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja. Primjenjuje se u podzemnim garažama manjih površina, dok se za velike garaže ne preporučuje. Kretanje zraka, odnosno dima u slučaju požara nije kontrolirano te postoji velika vjerojatnost nastanka brojnih zona nepokretnog zraka u prostoru garaže. Na slici 10 prikazan je sustav s odsisnim ventilatorima. Fotografija je snimljena u podzemnoj garaži na području Zagreba (fotografija autora).



Slika 10. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja pomoću odsisnih ventilatora

2.4. Otpornost ventilatora na povišene temperature

Određivanje otpornosti ventilatora na povišene temperature nije istovjetno u svim državama. U tablici 2 prikazani su primjeri zahtijevane otpornosti ventilatora na povišene temperature u pojedinim državama, kao i zahtijevani broj izmjena zraka sustava mehaničkog odimljavanja.

Tablica 2. Zahtijevana temperaturna otpornost ventilatora i broj izmjena zraka sustava mehaničkog odimljavanja

Otpornost na povišene temperature	Broj izmjena zraka	Napomena
Republika Austrija TRVB N-106/90 <i>Technischen Richtlinien Vorbeugender Brandschutz Brandschutz in Mittel-und Großgaragen</i>		
400 °C 90 min	najmanje 12	najviše 4 podzemne razine
Republika Austrija OIB-Richtlinie 2.2 – 2023 <i>Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks</i>		
400 °C / 90 min	12 (min.protok 36.000)	250 – 1600 m ²
400 °C / 90 min	12	1600 – 4800 m ² PPG
400 °C / 90 min	3	1600 – 4800 m ² SPG
400 °C / 90 min	3	4800 - 10000 m ² ADP + SPR
Sjedinjene Američke Države NFPA 88A 2023 <i>Standard for Parking Structures</i>		
	18 m ³ /h po m ² površine podzemne garaže	
Velika Britanija British Standard BS 7346-7:2013 <i>Components for smoke and heat control systems. Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks</i>		
300 °C 60 min	10	
Velika Britanija <i>Approved documents B and F of the building regulations of England and Wales</i>		
300 °C 60 min	12	Izračun kapaciteta odsisnih ventilatora prema izračunu masenog protoka dima $M = 0,19 \times P \times y^{3/2} \text{ [kg/s] (6)}$
Europska unija EN 12101-11:2022 <i>Smoke and heat control systems - Part 11: Horizontal flow powered ventilation systems for enclosed car parks</i>		
300 °C 120 min bez sprinklera 200 °C 120 min sa sprinklerom		Broj izmjena zraka i proračun kapaciteta odsisnih ventilatora u ovisnosti o sustavu mehaničkog odimljavanja i drugim sustavima aktivne zaštite od požara

gdje je:

ADP automatska dojava požara s prosljeđivanjem alarma

PPG proširena pomoć pri gašenju

SPR sprinkler instalacija

Dva ključna sustava aktivne zaštite od požara u podzemnim garažama su sprinkler instalacija i sustav mehaničkog odimljavanja. Mehaničko odimljavanje se ne smije koristiti tokom vremena evakuacije korisnika iz podzemne garaže, već služi za pomoć vatrogasnim postrojbama tokom intervencije. Zbog toga je potrebno posebno obratiti pažnju na uskladbu ova dva sustava aktivne zaštite od požara, kako ne bi rad sustava mehaničke ventilacije doveo do opstrukcije vodenog mlaza iz sprinkler mlaznica. Posebice se to odnosi na sustav mehaničkog odimljavanja sustavom potisnim ventilatorima [139].

Kapacitet odsisnih ventilatora sustava mehaničkog odimljavanja može se primjerice izračunati sukladno europskoj normi EN 12101-5:2008 - Sustavi za upravljanje dimom i toplinom - 5. dio: Upute za funkcionalne preporuke i metode proračuna sustava za odvođenje dima i topline, prema jednadžbi:

$$V = \frac{M \times T}{\rho \times T_{ok}} \quad (7)$$

gdje je:

V	kapacitet ventilatora [m ³ /s]
M	maseni protok dima [kg/s]
T	prosječna temperatura dimnih plinova [K]
ρ	gustoća [kg/m ³]
T _{ok}	temperatura okoline [K]

Zbog izloženosti visokim temperaturama razvijenim požarom ventilatori moraju biti konstruirani za rad u uvjetima povišenih temperatura tokom određenog vremenskog razdoblja. Mast za podmazivanje ležajeva mora biti temperaturno otporna, a motor mora imati izolaciju klase H. Ta klasa podrazumijeva maksimalnu dopuštenu temperaturu od 180 °C pri nazivnom opterećenju, maksimalnu prosječnu nadtemperaturu namota od 135 °C te temperaturu od 200 °C u kratkom spoju. Nadalje, zazor između lopatica impelera i kućišta mora biti veći nego kod ventilatora namijenjenih ventilaciji.

$$l_{nr} = 0,01 \text{ d} \quad (4)$$

$$l_{pt} = 0,025 \text{ d} \quad (5)$$

gdje je:

l_{nr} – zazor između lopatica impelera i kućišta ventilatora kod ventilatora za ventilaciju [mm]

l_{pt} – zazor između lopatica impelera i kućišta ventilatora kod ventilatora za mehaničko odimljavanje [mm]

d – promjer ventilatora [mm]

3. POŽARNA ISPITIVANJA DIMOM I NUMERIČKO MODELIRANJE

3.1. Proračun količine dima

Budući da su u požarima broj i količina mogućih zapaljivih materijala često vrlo veliki, rezultati istraživanja brzina oslobađanja topline za pojedine materijale nisu mjerodavni za sve požarne scenarije. Iz tog razloga potrebno je procijeniti minimalne i maksimalne vrijednosti brzine oslobađanja topline, a ne specifične karakteristike pojedinog materijala, kako bi se utvrdio najnepovoljniji scenarij razvoja požara. U tablici 3 prikazane su najmanje i najveće brzine oslobađanja topline za razne scenarije požara, prema tehničkom izvještaju HRI CEN/TR 12101-5:2008 Sustavi za upravljanje dimom i topline - 5. dio: Upute za funkcionalne preporuke i metode proračuna sustava za odvođenje dima i topline.

Tablica 3. Vrijednosti brzina oslobađanja topline za različite scenarije požara

	Sprinkler instalacija	Bez sprinkler instalacije plamen do 2 m visine
$q_{\min}$ [kW/m ²]	250	250
$q_{\max}$ [kW/m ²]	625	1250

gdje je:

$q_{\min}$ – najmanja brzina oslobađanja toplinske snage [kW/m²]

$q_{\max}$ – najveća brzina oslobađanja toplinske snage [kW/m²]

3.1.1. Proračun masenog protoka dima prema aksijalno simetričnom modelu dima

Aksijalno, odnosno osnosimetrični model dima opisuje stup vrućeg zraka i dimnih plinova koji se uzdiže izravno iznad izvora požara u uvjetima bez značajnijeg bočnog strujanja. Model se odlikuje simetričnom raspodjelom brzine i temperature oko vertikalne osi. Maseni protok dimnih plinova može se izraziti jednadžbom:

$$M = 0,071Q^{1/3}y^{5/3} + 0,018Q \quad (8)$$

gdje je:

M - maseni protok dimnih plinova [kg/s]

Q – konvektivna toplinska snaga dimnih plinova [kW]

y - visina bezdimne zone [m]

3.1.2. Proračun masenog protoka kod uzgonskog dizanja zraka iznad velikih požara kada je naznačena visina bezdimne zone

Uzgonsko dizanje zraka u slučaju požara (*engl. fire plume*) [140] iznad velikih požara opisuje se odnosom:

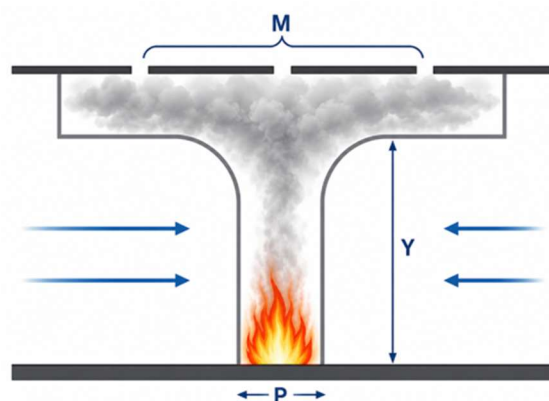
$$y \leq 10 (A)^{0.5} \quad (9)$$

gdje je:

y – visina bezdimne zone [m]

A – površina požara [m^2]

Količina zraka koja se miješa s dimnim plinovima nastalim požarom je velika. U praktičnim slučajevima masa stvarnih produkata izgaranja može se zanemariti, pa se dimni plinovi za potrebe proračuna mogu tretirati kao kontaminirani vrući zrak. Na slici 11 prikazani su opseg požara i visina bezdimne zone.



Slika 11. Prikaz opsega požara i visine bezdimne zone.

Maseni protok dimnih plinova koji se uzdižu iznad požara može se izraziti jednačinom:

$$M = C_e P y^{3/2} \quad (10)$$

gdje je:

M - maseni protok dimnih plinova [kg/s]

C_e – koeficijent

$C_e = 0,19$ za velike prostore

$C_e = 0,337$ za male prostore

P – opseg vatre, mjeren u horizontalnoj ravnini [m]

y - visina bezdimne zone [m]

3.1.3. Proračun masenog protoka kod uzgonskog dizanja zraka iznad malih požara uz zadanu visinu bezdimne zone

Uzgonsko dizanje zraka u slučaju malih požara opisuje se odnosom:

$$y > 10 (A)^{0,5} \quad (11)$$

Visina virtualnog izvora dima (*engl. virtual origin of the plume*) izračunava se jednadžbom:

$$z_0 = -1,02D + 0,083Q^{0,4} \quad (12)$$

gdje je:

z_0 – visina virtualnog izvora dima [m]

D – efektivni promjer požara [m]

Q – konvektivna toplinska snaga dimnih plinova [kW]

Virtualni izvor dima koristi se u studijama požara i modeliranju plamena te predstavlja hipotetsku točku u prostoru izvora dima. Primjenjuje se za pojednostavljenje modela požara i određivanje parametara kao što su predviđanje porasta temperature dima, određivanje brzine protoka te procjena masenog i volumnog protoka dima [141]. Maseni protok dimnih plinova koji se dižu iznad požara može se izraziti jednadžbom:

$$M = 0,071Q^{0,33} (y - z_0)^{1,67} \{ 1 + 0,026 Q^{0,67} (y - z_0)^{-1,67} \} \quad (13)$$

gdje je:

M - maseni protok dimnih plinova [kg/s]

Q – konvektivna toplinska snaga [kW]

y - visina bezdimne zone [m]

z_0 – visina virtualnog izvora dima [m]

3.1.4. Brzina kretanja dima

Brzina kretanja dima ovisi o više čimbenika, primjerice oslobođenoj snazi požara, položaju požara u prostoru (uz zid ili u sredini prostora), mogućnosti širenja u različitim smjerovima i slično. Ispitivanja požara u podzemnim garažama pokazala su da brzina kretanja vrućeg dima iznosi približno 0,75 m/s, a debljina sloja dima doseže do 0,5 m ispod stropa podzemne garaže. Površina podzemne garaže ispunjene dimom povećava se gotovo linearno nakon izbijanja požara [142]. Rezultati pokazuju da se u fazi razvoja požara u stanu dim širi prosječnom brzinom od 0,02 do 0,04 m/s. Stoga se dim širi znatno brže od samog požara i ispunjava sve

prostorije stana u svega nekoliko minuta [143]. U željezničkom tunelu brzina širenja dima iznosi od 0,5 m/s do 1,7 m/s [144], međutim može biti i značajno viša kod većih požarnih snaga i tunela s velikim uzdužnim nagibom. Načelo prema kojem kontrolirana brzina zraka može upravljati kretanjem dima primjenjuje se za kontrolirano širenje dima u tunelima, podzemnim garažama i ostalim sustavima mehaničkog odimljavanja. Dim iz približno istovjetnog požara u podzemnoj garaži širi se od izvora požara u svim smjerovima. Kako se oblak dima povećava, njegova se brzina smanjuje dok se ne zaustavi zbog pomanjkanja uzgona ili dok ne dosegne vanjske zidove garaže. Vjetar se može promatrati kao oblik prisilne ventilacije.

3.2. Požarna ispitivanja vrućim dimom

Ispitivanje vrućim dimom predstavlja ključnu eksperimentalnu metodu u studijama požara. Međutim, većina takvih ispitivanja provodi se samo jednom, pri čemu se zanemaruju nesigurnosti i moguće eksperimentalne pogreške [145]. Ispitivanjima vrućim dimom ispituju se sustavi mehaničkog odimljavanja u cestovnim tunelima [146], kretanje dima u željezničkim tunelima [8], sustavi prirodnog i mehaničkog odimljavanja u visokim zgradama [147], kao i sustava mehaničkog odimljavanja u zgradama [148].

3.3. Požarna ispitivanja hladnim dimom

Ispitivanja hladnim dimom ne daju vjernu sliku strujanja dima u uvjetima realnog požara. Razlog tome je izostanak uzgonskih sila vrućih dimnih plinova prisutnih u stvarnim požarnim uvjetima. Stoga strujanje zraka utvrđeno ispitivanjima hladnim dimom ne može vjerno predstavljati strujanje u stvarnim požarnim uvjetima, pa je usporedivost rezultata tih ispitivanja s rezultatima numeričkog modeliranja ograničena [149]. Požarna ispitivanja hladnim dimom prikladnija su za male prostore, dok se u velikim prostorima rezultati uglavnom mogu koristiti samo za kvalitativnu vizualizaciju širenja dima [150]. Vizualizacija kretanja hladnog dima može poslužiti kao sredstvo za validaciju modela kretanja vrućeg dima, ali postoje značajni izazovi u validaciji uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja [151]. Razlog tome je izostanak uzgonskih sila vrućih dimnih plinova koje su prisutne u stvarnim požarnim uvjetima. Posljedično, strujanje zraka utvrđeno ispitivanjima hladnim dimom ne može vjerno predstavljati strujanje predviđeno numeričkim modelima požara, što otežava izravnu usporedbu eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

3.4. Numeričko modeliranje

Numeričko modeliranje računalnom dinamikom fluida koristi se za analizu uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža [152]. Iako se primarno primjenjuje u analizi odimljavanja velikih volumena, poput atriya i tunela, numeričko modeliranje

omogućuje i analizu različitih rješenja u podzemnim garažama, uključujući sustave prirodne ventilacije [153] te sustave mehaničkog odimljavanja s ventilacijskim kanalima [154]. Rezultati simulacija omogućuju optimizaciju broja [155] i prostornog rasporeda potisnih ventilatora [18] kao i optimizaciju razvoda ventilacijskih kanala. Primjena numeričkog modeliranja strujanja u požarnim situacijama unutar podzemnih garaža smatra se standardnim postupkom, što omogućuje definiranje preciznih zahtjeva i preporuka za njegovu provedbu. Pri analizi kretanja dima nužno je precizno modelirati prostorni raspored podzemne garaže, uključujući sve značajne fizičke prepreke poput zidova, stupova i greda. Završna faza procesa obuhvaća cjelovitu dokumentaciju modela, uključujući specifikaciju korištenog računalnog koda i njegove verzije, rubne uvjete, geometrijski prikaz s pojednostavljujućim pretpostavkama, karakteristike proračunske mreže, analizu osjetljivosti te prikaz i analizu rezultata u odnosu na postavljene ciljeve. Budući da odluke korisnika programskog paketa presudno utječu na ishode simulacije, njegova je odgovornost prisutna u svim fazama modeliranja. Radi smanjenja subjektivnog utjecaja pri modeliranju sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža preporučuje se primjena utvrđenih kriterija i rubnih uvjeta prilagođenih ovoj namjeni. Navedene smjernice nisu konačne niti predstavljaju optimalno rješenje za sva obilježja dinamike požara. U slučaju odstupanja od preporučenih parametara nužno je provesti analizu osjetljivosti (studiju neovisnosti) radi određivanja utjecaja tih varijabli na izlazne rezultate. Dobivene podatke potrebno je validirati usporedbom s rezultatima temeljenima na standardnim preporukama, uz popratnu znanstvenu raspravu usmjerenu na značajne fizikalne varijable, poput brzine strujanja dima ili temperature.

Numerička simulacija obuhvaća nekoliko međusobno povezanih faza:

a. Faza odabira programskog paketa

Faza odabira programskog paketa obuhvaća definiranje numeričkog pristupa, fizikalnih podmodela i kriterija stabilnosti simulacije. U tom kontekstu razmatraju se: opći zahtjevi za rješavač, potrebni fizikalni pod modeli te zahtjevi za vremenski korak i kriteriji konvergencije. Korisnik mora odabrati prikladan model za analizu te pripadajuće podmodele, kao što su modeli turbulentnog strujanja, zračenja i slično. Pogreške unutar programske podrške, odnosno greške u kodu, neovisne su o korisniku, no on mora biti svjestan mogućnosti njihova postojanja. Zbog toga je nužno koristiti dobro dokumentirane, verificirane i validirane programske pakete. Rješavač (*engl. solver*) koji se koristi za numeričko modeliranje treba omogućiti rješavanje nestacionarnih (*engl. unsteady*) trodimenzijskih strujanja s dvostrukom preciznošću (*engl. double-precision*) i omogućiti korištenje shema drugog reda za očuvanje mase, energije, količine gibanja (*engl. momentum*), prijenos tvari (*engl. species transport*), turbulencije i

zračenja. Mora koristiti podmodel za turbulentno strujanje (dopuna Navier-Stokesove jednadžbi podmodelom turbulentnog strujanja), bilo prvog reda (npr. Reynolds-osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe $k-\varepsilon$), drugog reda (Model Reynoldsovih naprezanja - RANS RSM) ili simulaciju velikih vrtloga (engl. Large Eddy Simulation). U numeričkom modeliranju sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama, osobito pri simulaciji požara, potrebno je primijeniti skup fizikalnih podmodela radi preciznog opisa dinamike fluida i prijenosa topline. Temelj numeričkog modela čine jednadžbe očuvanja mase, količine gibanja i energije. Programski paket rješava aproksimativni oblik Navier–Stokesovih jednadžbi prilagođen niskobrzinskom, uzgonom pokretanom strujanju, koje je karakteristično za strujanje dima. Budući da je strujanje dima u pravilu turbulentno, primjenjuju se odgovarajući modeli turbulencije. Simulacija velikih vrtloga široko je prihvaćena u modeliranju požara zbog sposobnosti prikaza nestacionarnih turbulentnih pojava, dok se za proračun polja strujanja i procjenu uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja često primjenjuje standardni $k-\varepsilon$ model. Turbulentno strujanje obilježeno je kaotičnim i vrtložnim gibanjem fluida te predstavlja dominantan režim strujanja u sustavima s visokim Reynoldsonim brojevima, uključujući sustave prisilne ventilacije u podzemnim garažama. U tablici 4 prikazana je usporedba RANS i LES pristupa u modeliranju turbulentnog strujanja.

Tablica 4. Usporedba RANS i LES pristupa u modeliranju turbulentnog strujanja

Značajka	RANS	LES
	(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)	(Large Eddy Simulation)
Pristup	vremenski usrednjuje jednadžbe gibanja fluida i zanemaruje nestacionarne, vremenski ovisne detalje turbulencije	eksplicitno rješava velike i srednje vrtloge
Modeliranje	učinci turbulencije na prijenos topline i mase u potpunosti se aproksimiraju modelom turbulencije	vremenski ovisan i fizikalno vjerniji prikaz gibanja dima, pri čemu se podmodelima aproksimiraju samo najmanji vrtlozi
Prednosti	računalno učinkovit pristup pogodan za analizu ustaljenih stanja i brze procjene, primjerice prosječne uspješnosti ventilacije	omogućuje detaljan uvid u dinamiku vrtloga te višu razinu točnosti za nestacionarna strujanja, poput širenja dima
Nedostaci	ograničena točnost kod brzih nestacionarnih pojava, poput početne faze razvoja požara ili kompleksnog vrtloženja	zahtijeva znatne računalne kapacitete i sporiji je od RANS pristupa
Preporuka za korištenje	primjeren za relativno ustaljene požarne scenarije, jednostavnije geometrije ili analizu velikog broja varijanti u kratkom roku	primjeren kada je potrebna visoka točnost u velikim prostorima s kompleksnim strujanjima ili za praćenje dima u kritičnim minutama požara

Modeliranje turbulencije ključno je jer ona značajno intenzivira prijenos topline i mase, čime se ubrzava miješanje okolnog zraka s produktima izgaranja, poput dima, čađe te plinova CO i CO₂. Ti procesi izravno utječu na koncentraciju toksičnih plinova i vidljivost u prostoru. U turbulentnom strujanju javljaju se veći otpori i sile na površinama u usporedbi s laminarnim strujanjem. Za ostale podmodele potrebna je odgovarajuća studija validacije. Rješavač mora sadržavati podmodel toplinskog zračenja koji rješava smjerno ovisnu jednadžbu prijenosa zračenja, koristeći, primjerice, metodu diskretnih ordinata (*engl. Discrete Ordinates Method, DOM*) ili metodu konačnih volumena (*engl. Finite Volume Method, FVM*). P1 model predstavlja difuzijski model zračenja u kojem se zračenje tretira kao ravnomjerno širenje energije u prostoru. Iako je računalno vrlo učinkovit, nije primjeren za primjene s lokaliziranim, snažnim izvorima topline, poput otvorenog plamena, jer može dovesti do preuveličanog prijenosa topline zračenjem. Nadalje, rješavač može, ali ne mora, koristiti model izgaranja. Opći zahtjevi za rješavač, koji se odnose na metodu i značajke programskog alata, osiguravaju da matematički model predstavlja pouzdan temelj za opis fizikalnih pojava. Ti se zahtjevi odnose na:

Točnost (*engl. accuracy*) - točnost podrazumijeva predviđanje izlaznih varijabli, poput brzine strujanja dima, unutar zadanih granica pogreške ili definirane operativne domene. Ovisi o shemama diskretizacije i razlučivosti proračunske mreže. Rješenje treba biti neovisno o veličini mreže (*engl. grid-independent*), što znači da daljnje usitnjavanje mreže ne mijenja značajno rezultate.

Stabilnost (*engl. stability*) - stabilnost je temeljni zahtjev jer nestabilna numerička metoda ne daje fizikalno utemeljene rezultate. Algoritam mora spriječiti akumulaciju numeričkih pogrešaka, primjerice pogrešaka zaokruživanja, koje mogu dovesti do divergencije rješenja. Konvergencija numeričkog izračuna mora biti dokaziva.

Računalna učinkovitost (*engl. computational efficiency*) - numerički postupak treba omogućiti dobivanje rezultata u prihvatljivom vremenu. Složeniji numerički izračuni zahtijevaju veću količinu radne memorije i veću procesorsku snagu..

Konvergencija (*engl. convergence*) - proces rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi je iterativan. Rješenje mora dostići stanje u kojem se promjene između uzastopnih iteracija smanjuju ispod definiranog praga tolerancije. Kriteriji konvergencije predstavljaju numeričke granice pogreške koje određuju trenutak završetka proračuna. Budući da se rješenje dobiva postupnim približavanjem točnoj vrijednosti, konvergencija osigurava stabilnost izračunatih veličina, poput temperature ili brzine.

Glavni kriteriji koji se prate su:

Reziduali (*engl. residuals*) - predstavljaju mjeru pogreške ili neravnoteže u jednadžbama očuvanja mase, količine gibanja i energije. Kada vrijednosti reziduala padnu ispod zadanog praga (npr. 10^{-4} ili 10^{-5}), smatra se da je rješenje numerički konvergiralo.

Veličine od interesa (*engl. quantities of interest*) - prate se ključne fizikalne veličine, poput protoka mase, tlaka i temperature u karakterističnim točkama sustava. Stabilizacija tih veličina ukazuje na fizikalnu konvergenciju rješenja.

Neravnoteža (*engl. imbalance*) - provjerava se ukupna ravnoteža ulaznih i izlaznih veličina, primjerice mase i energije, za cijelu domenu simulacije. Mala vrijednost globalne neravnoteže potvrđuje očuvanje mase i energije u rješenju.

Termodinamičkim i kemijskim podmodelima opisuje se generiranje i širenje topline i dima. Model izgaranja definira proces izgaranja goriva, primjerice vozila u podzemnoj garaži, pri čemu se brzina oslobađanja topline povezuje s intenzitetom turbulencije i koncentracijom kisika. Prijenos topline odvija se konvekcijom, kondukcijom i toplinskim zračenjem, a svi mehanizmi moraju biti obuhvaćeni odgovarajućim modelima prijenosa topline. Zbog razlike u gustoći između vrućih produkata izgaranja i okolnog zraka javlja se uzgonska sila, koja ima dominantnu ulogu u stratifikaciji dima. Taj se učinak opisuje modelom uzgona (*engl. buoyancy effect*), pri čemu se gustoća fluida određuje primjenom jednadžbe stanja idealnog plina. Rubni uvjeti i ulazne veličine nužni su za ispravan rad numeričkog modela. U tu svrhu izrađuje se trodimenzionalni geometrijski model podzemne garaže s jasno definiranom proračunskom mrežom. Izvor požara definira se položajem i snagom požara te svojstvima gorivog materijala. Sustavi ventilacije modeliraju se kao izvori količine gibanja i volumenskog protoka, dok se ostali otvori i rampe opisuju odgovarajućim rubnim uvjetima. U numeričkom modelu dim se prikazuje koncentracijom čestica, optičkom gustoćom ili vidljivošću. Pravilno definiranje vremenskog koraka Δt ključno je za točnost i numeričku stabilnost simulacije. Vremenski korak određuje vremenski pomak u kojem se izračunava rješenje sustava jednadžbi.

Glavni zahtjevi i kriteriji za vremenski korak su:

Točnost - vremenski korak mora biti dovoljno malen da omogući točan opis prolaznih pojava. Kod brzih događaja, primjerice naglog razvoja požara, potreban je manji vremenski korak.

Stabilnost - prevelik vremenski korak može uzrokovati numeričku nestabilnost i divergenciju rješenja.

Karakteristično vrijeme - vremenski korak mora biti usklađen s vremenskim skalama problema kako bi se točno opisale promjene u sustavu.

Računalni trošak - manji vremenski koraci povećavaju točnost, ali produžuju trajanje simulacije. Optimalna vrijednost postiže ravnotežu između točnosti i učinkovitosti.

Konvergencija - manji vremenski koraci obično olakšavaju konvergenciju. Simulacija se smatra konvergiranjem kada se vrijednosti stabiliziraju i dodatne iteracije ne uzrokuju značajne promjene.

b. Faza pripreme

U ovoj je fazi nužno odabrati odgovarajuće fizikalne podmodele, numeričke sheme i iterativni postupak, odnosno pripremiti geometrijsku domenu koja predstavlja modeliranu podzemnu garažu te generirati numeričku mrežu za analizirani slučaj. U tom kontekstu definiraju se potrebna razina detalja modela, osnovni zahtjevi za izradu i kvalitetu numeričke mreže te fizički prikaz projektiranog požara. Model treba prikazati kretanje dima djelovanjem sustava mehaničkog odimljavanja. Prilikom analize kretanja dima unutar podzemne garaže geometrija mora biti modelirana što točnije, uključujući sve značajne prepreke, kao što su zidovi, stupovi i grede. Modeliranje vozila kao prepreka može značajno utjecati na rezultate jer mijenja polje strujanja unutar podzemne garaže. Zbog toga se analiza mora temeljiti na scenarijima najnepovoljnijeg slučaja. Simulacijama je potrebno obuhvatiti kretanje dima u praznoj garaži te u garaži u kojoj su vozila raspoređena tako da popunjavaju najmanje 50 % parkirnih mjesta. Prema europskoj tehničkoj specifikaciji CEN/TS 12101-11:2022, (*Smoke and heat control systems - Part 11: Horizontal flow powered ventilation systems for enclosed car parks*), domena modela mora obuhvaćati cijelu garažu sa svim fizički povezanim zonama dima i topline. Model mora biti trodimenzionalan, a svaki objekt ili izvor dimenzija većih od 20 cm treba biti eksplicitno modeliran. Manji elementi mogu se izostaviti ako se procijeni da nemaju značajan utjecaj na strujanje dima, no takvo izostavljanje mora biti naznačeno i obrazloženo. Ako se modeliraju potisni ventilatori, moraju se obuhvatiti svi elementi koji mogu utjecati na njihovo polje strujanja, kao što su prigušivači i deflektori. Veličina elemenata mreže unutar 2 m od izvora požara ili u zonama gdje je potrebna veća razina detalja treba biti najviše 0,1 m, a u ostalim dijelovima najviše 0,2 m. Odvodni i dovodni otvori zraka trebaju biti podijeljeni mrežom s najmanje pet ćelija duž svakog ruba elementa. Ovaj zahtjev vrijedi i za elemente sustava za kontrolu dima i topline (SKDT) s velikim omjerom stranica, poput indukcijskih ventilatora i širokih ulaza, osim ako se konvergencija može dokazati s manjim brojem ćelija. Za nestrukturiranu mrežu omjer između različitih veličina ćelija u bilo kojem smjeru ne smije biti veći od 1,30. Za strukturiranu mrežu omjer između susjednih veličina ćelija ne smije biti

veći od 2,00. Korištenje mreža koje prisilno prilagođavaju geometriju prethodno definiranoj računalnoj mreži može dovesti do deformacije elemenata sustava za kontrolu dima i topline. Geometrijska površina bilo kojeg dijela modela ne smije odstupati od zadanih vrijednosti za više od 5 %. Prosječni volumenski protok i brzina zraka na ulazima ili kroz ventilatore ne smiju odstupati od zadanih vrijednosti za više od 5 %. Fizički prikaz požara definira se ovisno o prisutnosti sprinkler sustava.

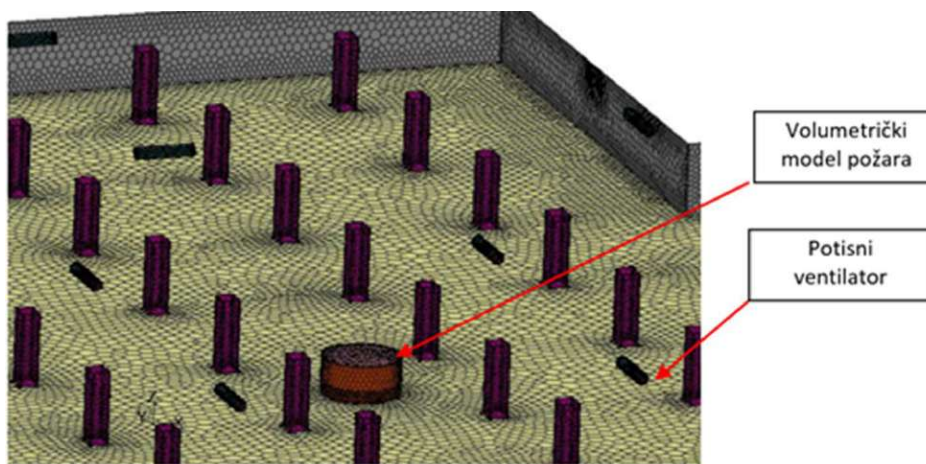
Požar bez sprinkler sustava:

- a. čvrsta prepreka ispod izvora požara dimenzija $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1\text{ m}$ koja ne emitira toplinu ni dim
- b. izvor požara može biti:
 - površinski izvor dimenzija $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ koji emitira toplinu i dim na gornjoj površini
 - volumenski izvor dimenzija $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0,7\text{ m}$ koji emitira toplinu i dim unutar cijelog volumena

Požar sa sprinkler sustavom:

- a. čvrsta prepreka ispod izvora požara dimenzija $2,5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1\text{ m}$ koja ne emitira toplinu ni dim
- b. izvor požara može biti:
 - površinski izvor dimenzija $2,5\text{ m} \times 5\text{ m}$
 - volumetrički izvor dimenzija $2,5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0,7\text{ m}$

Na slici 12 prikazan je primjer plošne numeričke mreže matematičkog modela podzemne garaže s volumetričkim izvorom požara i potisnim ventilatorima [156].



Slika 12. Prikaz mreže matematičkog modela

Kod volumetričkog izvora brzina oslobađanja topline po jedinici volumena jednaka je unutar cijelog volumena u svakom vremenskom koraku. Površinski izvor emitira energiju samo prema gore, dok volumetrički izvor ravnomjerno emitira energiju unutar cijelog svojeg trodimenzionalnog volumena, što realističnije prikazuje razvoj požara vozila u podzemnoj garaži.

c. Faza odabira rubnih uvjeta

Potrebno je odabrati odgovarajuće početne i rubne uvjete koji opisuju fizikalna stanja unutar simulacijske domene i na njezinim granicama. Početni uvjeti (*engl. initial conditions*) definiraju stanje domene u početnom trenutku simulacije ($t = 0$), neposredno prije početka razvoja strujanja i požara. Njima se određuje početna raspodjela temperature, brzine strujanja i koncentracije plinova u cijelom volumenu domene. U početnom stanju pretpostavlja se jednolična raspodjela temperature zraka u cijeloj podzemnoj garaži, primjerice 15 °C. Početni uvjeti također uključuju nepokretnu zračnu masu (brzina jednaka nuli u cijeloj domeni) te koncentracije plinova jednake standardnom atmosferskom sastavu. Takvi uvjeti predstavljaju referentno stanje iz kojeg započinje numerički proračun razvoja strujanja, prijenosa topline i širenja dima tokom vremena. Rubni uvjeti (*engl. boundary conditions*) predstavljaju ključne ulazne podatke kojima se definira ponašanje fluida na granicama domene, što je nužno za rješavanje jednadžbi strujanja, prijenosa topline i prijenosa tvari. Oni obuhvaćaju opis fizike požara kroz vremenski razvoj brzine oslobađanja topline $HRR = f(t)$, opis rada ventilacijskih uređaja te definiranje ulaza i izlaza zraka. Na ulazima se zadaju brzine, temperature i smjerovi strujanja zraka, dok se na izlazima najčešće definira statički tlak, obično jednak atmosferskom tlaku. Na zidovima, podu i stropu definiraju se uvjeti strujanja i prijenosa topline, uključujući hrapavost površina i toplinska svojstva materijala. Požar predstavlja interni izvor energije unutar domene, ali se njegovo ponašanje također definira ulaznim parametrima. Nakon definiranja početnih i rubnih uvjeta polja tlaka, brzine strujanja i prijenosa tvari određuju se iterativnim postupkom. Bez pravilno definiranih početnih i rubnih uvjeta numerički model nema dovoljno informacija za izračun fizikalno prihvatljivog rješenja, a pogreška u njihovom definiranju može poništiti dio ili cijelu simulaciju. Uvjet bez klizanja (*engl. no-slip condition*) temeljni je rubni uvjet za viskozne fluide na čvrstim, nepokretnim površinama. Njime se propisuje da je brzina fluida na granici zida jednaka brzini površine, što za nepokretne zidove znači da je brzina fluida jednaka nuli. Izlazni rubni uvjet konstantnog tlaka (*engl. constant pressure outlet condition*) definira statički tlak fluida na izlazu iz domene kao zadanu vrijednost, najčešće atmosferski tlak. Takav uvjet primjenjuje se na izlazima otvorenima prema okolini ili prema velikom volumenu u kojem se tlak može smatrati konstantnim. On omogućuje slobodan

izlazak ili povratni ulazak fluida ovisno o tlakovnom polju unutar domene, uz održavanje zadanog tlaka na granici.

d. Faza naknadne obrade

U fazi naknadne obrade rezultati simulacije vrednuju se primjenom kriterija prihvatljivosti i podnošljivosti te se kritički analiziraju. Sigurnosni kriteriji za validaciju simulacija požara, koji se nazivaju i kriteriji podnošljivosti (engl. *tenability criteria*), predstavljaju skup fizikalnih parametara koji opisuju uvjete u prostoru tokom požara.

Glavni kriteriji prihvatljivosti koji se prate u simulacijama uključuju:

Visina sloja dima (engl. *Smoke Layer Height*)

Ovo je najvažniji kriterij jer određuje minimalnu visinu sloja zraka bez dima potrebnu za disanje i vizualnu orijentaciju tokom evakuacije. Visina sloja čistog zraka mora iznositi približno 1,80–2,50 m iznad poda, ovisno o geometriji prostora.

Vidljivost (engl. *Visibility*)

Koncentracija čestica dima u zraku izravno utječe na vidljivost i sposobnost prepoznavanja putova evakuacije. Vidljivost duž putova evakuacije mora iznositi najmanje 10 m.

Temperatura zraka (engl. *Air Temperature*)

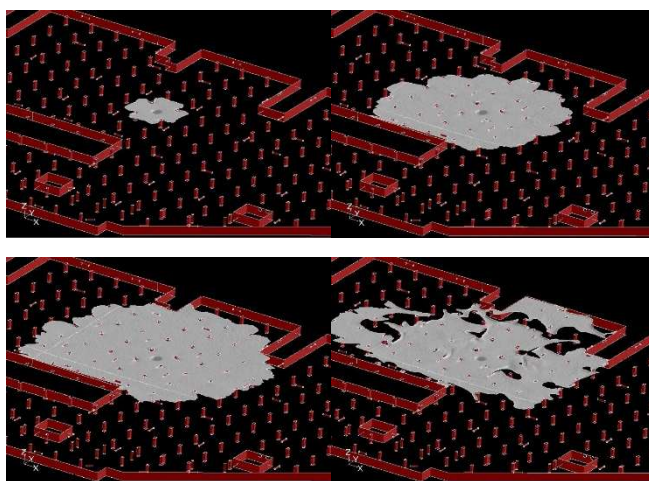
Povišena temperatura može uzrokovati toplinska oštećenja dišnih puteva i utjecati na funkcionalnost opreme. Temperatura u sloju čistog zraka mora ostati bliska početnoj temperaturi zraka, dok temperatura u sloju dima mora ostati unutar granica koje ne uzrokuju oštećenje opreme ili konstrukcije.

Koncentracija toksičnih plinova (engl. *Toxic Gas Concentration*)

Požar generira plinove s onesposobljavajućim ili smrtonosnim učinkom, poput CO i CO₂. Koncentracije toksičnih plinova moraju ostati ispod razina koje onemogućuju boravak u prostoru tokom evakuacije.

4. METODA ZA ODREĐIVANJE USPJEŠNOSTI SUSTAVA VENTILACIJE I MEHANIČKOG ODIMLJAVANJA PODZEMNIH GARAŽA

U prethodnim istraživanjima uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža određivala se pretpostavljanjem snage i položaja požara, odnosno njegova smještaja u prostoru garaže [157]. Takav pristup omogućavao je analizu sustava samo za točno definirani požarni scenarij. Dim se tokom razvoja požara stratificira pod stropom garaže, širi prostorom i s vremenom zauzima sve veći volumen [158]. Uključivanjem sustava mehaničkog odimljavanja dim se ventilatorima ili ventilacijskim kanalima usmjerava prema oknima za izbacivanje iz prostora garaže. Nakon uključivanja sustava analizirala se uspješnost odabranog sustava mehaničkog odimljavanja [159]. Budući da dim do uključivanja sustava ne ispunjava cijeli volumen garaže, kako je prikazano na slici 13, uspješnost sustava može se odrediti samo za dio prostora ispunjen dimom, dok za preostali dio ostaje neodređena.



Slika 13. Prikaz prethodnih istraživanja određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja

Uz istu pretpostavku požarnog scenarija određivale su se i brzine oslobađanja topline te temperaturna polja u podzemnoj garaži [160]. I za analizu i određivanje položaja okana koji služe za dobavu vanjskog zraka, odnosno izbacivanje dima iz podzemne garaže, pretpostavlja se položaj i snaga požara u prostoru podzemne garaže [161]. Uspješnost reverzibilnih sustava mehaničkog odimljavanja analizirala se na istovjetan način [162]. Kako bi rezultati bili što objektivniji, provodila su se višestruka ispitivanja s različitim položajima požara [163]. Pri analizi utjecaja drugih sustava aktivne zaštite od požara, primjerice sprinkler instalacije, također su se pretpostavljali snaga i položaj požara [164]. Budući da mlaz vode sprinkler instalacije značajno utječe na stratifikaciju i kretanje dima, zanemarivanje tog utjecaja moglo je rezultirati

netočnim zaključcima. Krivulja požara modelirala se prema jednadžbi kao požar s kvadratnom ovisnošću o vremenu:

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^2 \text{ [kW]} \quad (14)$$

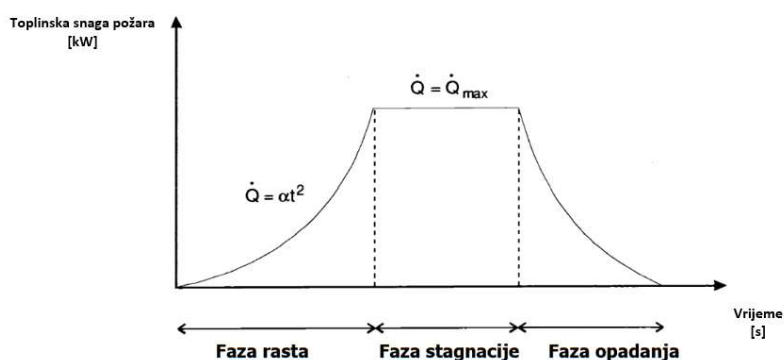
gdje je:

$\dot{Q}$ - toplinska snaga požara [kW]

α - koeficijent rasta požara [kW/s²]

t - vrijeme [s]

Pojednostavljena krivulja rasta požara s prikazom triju karakterističnih faza požara prikazana je na slici 14. Požar je od zapaljenja do gašenja podijeljen u tri karakteristične faze: fazu rasta, fazu razvijenog požara i fazu opadanja. Kvadratna funkcija opisuje fazu rasta, kako je prikazano jednadžbom 14.



Slika 14. Pojednostavljena krivulja rasta požara

U tablici 5 prikazani su koeficijenti rasta požara α za požare s kvadratnom ovisnošću o vremenu [165].

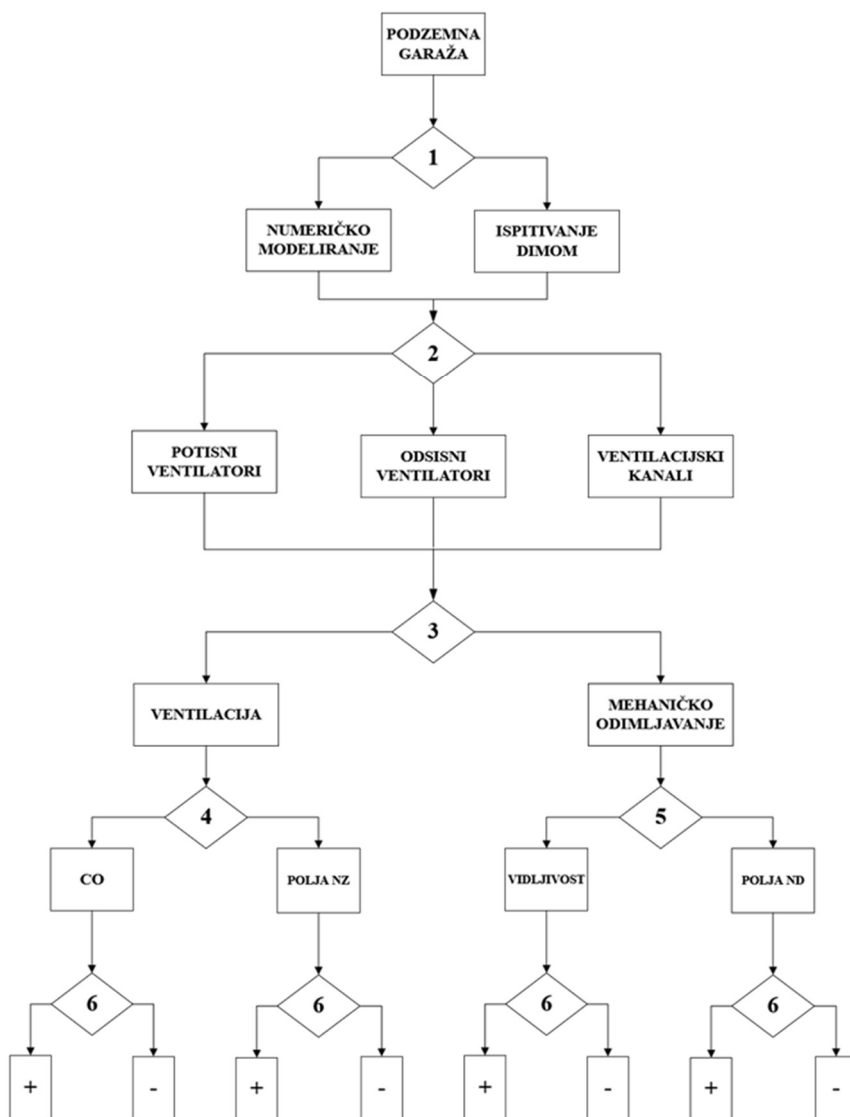
Tablica 5. Koeficijenti rasta požara α

Razvoj požara	α - koeficijent rasta požara [kW/s ²]
Spori	0,00293
Srednji	0,0172
Brzi	0,0469
Ultra brzi	0,1876

4.1. Opis generičke metode

Kako bi se odredila uspješnost navedenih sustava razvijena je metoda za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža. Metoda nije ograničena na način ispitivanja ili analize te se može provoditi eksperimentalno, ispitivanjima vrućim ili hladnim dimom, kao i numeričkim modeliranjem. Temeljna razlika između razvijene metode i postojećih pristupa jest pretpostavka da je cijeli volumen podzemne garaže ispunjen dimom. U ranijim metodama pretpostavljali su se snaga i položaj požara, odnosno njegov smještaj u prostoru garaže. Metoda za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža sastoji se od odabira načina ispitivanja sustava te ocjene njegove uspješnosti prema odabranim parametrima, kako je prikazano na slici 15.

1. Način ispitivanja sustava
 - a. Numeričko modeliranje
 - b. Ispitivanje dimom
2. Odabir sustava
 - a. Sustav potisnim ventilatorima
 - b. Sustav odsisnim ventilatorima
 - c. Sustav s ventilacijskim kanalima
3. Odabir sigurnosnog sustava podzemne garaže
 - a. Sustav ventilacije
 - b. Sustav mehaničkog odimljavanja
4. Odabir parametara za određivanje uspješnosti sustava ventilacije
 - a. Koncentracija ugljikovog monoksida
 - b. Polja nepokretnog zraka
5. Odabir parametara za određivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja
 - a. Vidljivost
 - b. Polja nepokretnog zraka (dima)
6. Ocjena uspješnosti sustava
 - a. Sustav je učinkovit (+)
 - b. Sustav nije učinkovit (-)



Slika 15. Prikaz metode za određivanje uspješnosti sustava

1. Način ispitivanja sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja

Odabir jednoga od dva načina ispitivanja, numeričkim modeliranjem i/ili ispitivanje dimom.

1.1. Ispitivanje dimom

Kako je navedeno u Poglavlju 3, zbog prirode požarnih ispitivanja vrućim dimom u podzemnim garažama takva se ispitivanja provode iznimno rijetko ili se u praksi uopće ne provode. Kada se provode, najčešće su ograničena na jedno ispitivanje, zbog čega se požarna ispitivanja vrućim dimom često zamjenjuju ispitivanjima hladnim dimom. Na slici 16 prikazana je SWOT analiza ispitivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža metodom ispitivanja dimom.

S Strengths - SNAGE	W Weaknesses - SLABOSTI
Ispitivanje instaliranog sustava na licu mjesta u podzemnoj garaži u stvarnim uvjetima	Stratifikacija i uzgonske sile hladnog dima nisu istovjetne ponašanju vrućeg dima
Pogodno za manje podzemne garaže	Nije pogodno za velike podzemne garaže
O Opportunities - PRILIKE	T Threats - PRIJETNJE
Usporedba i validacija ispitivanja dimom numeričkim modeliranjem	Većina ispitivanja dimom provodi se samo jednom, čime se zanemaruju nesigurnosti i pogreške mjerenja

Slika 16. SWOT analiza - ispitivanje dimom

1.2 Numeričko modeliranje

Postupci numeričkog modeliranja detaljno su opisani u Poglavlju 3.4. Za provođenje numeričkih simulacija u području ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža moguće je koristiti različite računalne programe razvijene za računalnu dinamiku fluida (*CFD*, engl. *Computational Fluid Dynamics*). Među komercijalnim rješenjima često se koriste alati poput ANSYS Fluent i STAR-CCM+, dok su među programima otvorenog koda najpoznatiji OpenFOAM i Fire Dynamics Simulator (FDS). Fire Dynamics Simulator razvijen je specijalno za simulaciju požara i raspolaže opsežnom validacijskom bazom za požarne scenarije. Opći CFD alati poput ANSYS Fluent, STAR-CCM+ i OpenFOAM validirani su za širok raspon problema dinamike fluida, dok njihova primjena u požarnim simulacijama zahtijeva dodatnu validaciju za konkretne uvjete analize. Većina navedenih programskih paketa temelji se na metodi konačnih volumena (*FVM*, engl. *Finite Volume Method*) za numeričko rješavanje sustava parcijalnih diferencijalnih jednadžbi odabranog matematičkog modela. Za opisivanje strujanja koja su predmet ovog istraživanja koriste se modeli nestacionarnog turbulentnog strujanja s uzgonom, uz primjenu jednadžbe stanja u kojoj gustoća ovisi samo o temperaturi. Turbulencija se najčešće modelira pomoću modela izvedenih Reynoldsovim osrednjavanjem Navier–Stokesovih jednadžbi, odnosno RANS pristupom (Reynolds-Averaged Navier–Stokes), pri čemu se primjenjuju modeli s dvije transportne jednadžbe, poput k - ϵ ili k - ω SST modela. Ovi modeli omogućuju aproksimaciju utjecaja turbulencije na strujanje fluida povećanjem efektivne viskoznosti u područjima izražene turbulencije. U usporedbi s direktnijim metodama opisivanja turbulentnih vrtloga, ovaj je pristup računalno jeftiniji u pogledu potrebnih računalnih resursa. Fizikalna svojstva fluida, primjerice gustoća, molekularna viskoznost, specifični toplinski kapacitet i toplinska provodnost, računaju se korištenjem korelacija koje ovise o veličinama stanja, kao što su tlak i temperatura, odnosno o toplinskom stanju fluida. U uvjetima značajnih temperaturnih gradijenata, kao što je slučaj u zoni požara, promjene ovih

svojstava mogu imati znatan utjecaj na strujanje. U okviru ovog istraživanja požar se pojednostavljeno modelira kao vremenski promjenjiv izvor topline i dima [157]. Budući da se u simulaciji ne razmatraju detaljne kemijske reakcije procesa izgaranja, generirani dim opisuje se kao pasivni skalar. Vremenski promjenjiv izvor topline, odnosno energija oslobođena uslijed požara, uvodi se kao izvorski član u energetske jednačbe. Transport ugljikova monoksida modelira se rješavanjem standardne transportne jednačbe koja obuhvaća advekciju i difuziju. Na slici 17 prikazana je SWOT analiza ispitivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža numeričkim modeliranjem.

S Strengths - SNAGE Određivanje uspješnosti sustava prije njegove instalacije u podzemnoj garaži Fleksibilnost izmjene pojedinih dijelova sustava Fleksibilnost izmjene cjelokupnog sustava	W Weaknesses - SLABOSTI Ovisnost o pravilnom definiranju početnih i rubnih uvjeta numeričkog modela
O Opportunities - PRILIKE Usporedba i validacija numeričkog modeliranja ispitivanjem dimom	T Threats - PRIJETNJE Nedovoljna interakcija sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja s ostalim instalacijama u podzemnoj garaži (elektroinstalacije, kanalizacija, sprinkler sustav)

Slika 17. SWOT analiza - numeričko modeliranje

2. Odabir sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja

U ovoj fazi odabire se sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja koji se analizira, pri čemu se razmatraju sustavi s ventilacijskim kanalima, potisnim ventilatorima ili odsisnim ventilatorima, kako je opisano u Poglavlju 2.

3. Odabir sigurnosnog sustava podzemne garaže

Odabire se jedan od dva sigurnosna režima rada, sustav ventilacije i/ili sustav mehaničkog odimljavanja. Budući da se sustav ventilacije u slučaju požara koristi kao sustav mehaničkog odimljavanja, moguće je analizirati oba režima, ovisno o odabiru.

4. Odabir parametara za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja

Za sustav ventilacije parametri za određivanje uspješnosti su koncentracija ugljikovog monoksida i/ili polja nepokretnog zraka, dok su za sustav mehaničkog odimljavanja to vidljivost i/ili polja nepokretnog zraka odnosno dima.

4.1. Ventilacija – koncentracija ugljikovog monoksida

S obzirom na to da je ugljikov monoksid otrovan plin, osnovna zadaća sustava ventilacije jest smanjivanje njegove koncentracije na sigurnu razinu. Brzina smanjivanja koncentracije ugljikova monoksida stoga predstavlja dobar pokazatelj uspješnosti sustava ventilacije. Za određivanje, odnosno provjeru minimalnog kapaciteta odsisnih ventilatora može se provesti proračun na temelju minimalno dopuštene koncentracije ugljikova monoksida.

Potrebna količina vanjskog zraka po parkirališnom određuje se prema sljedećoj jednadžbi:

$$V = \frac{q_{CO}}{CO_{doz} - CO_{ok}} \quad (15)$$

gdje je:

V potrebna količina zraka po parkirnom mjestu (m^3/h)

q_{CO} (m^3/h) emisija ugljikova monoksida tokom pokretanja vozila i vožnje brzinom 10 km/h

CO_{doz} dopuštena koncentracija ugljikova monoksida – $100 \times 10^{-6} m^3CO / m^3zraka$ (100 ppm)

CO_{ok} koncentracija ugljikova monoksida vanjskog zraka - $30 \times 10^{-6} m^3CO / m^3zraka$ (30 ppm)

Emisija ugljikova monoksida tokom pokretanja vozila i vožnje brzinom 10 km/h određuje se prema sljedećoj jednadžbi:

$$q_{CO} = \left(q_{CO_{palj}} \frac{T_{pokr}}{3600} + q_{CO_{vož}} \frac{L}{10000} \right) f \quad (16)$$

gdje je:

$q_{CO_{palj}}$ (m^3/h)– emisija ugljikova monoksida vozila pri pokretanju – $0,55 m^3/h$

T_{pokr} – vrijeme trajanja pokretanja vozila – 20 s

$q_{CO_{vož}}$ (m^3/h)– emisija ugljikova monoksida pri vožnji brzinom 10 km/h – $0,60 m^3/h$

L – udaljenost do izlaza iz garaže od parkirnog mjesta

f – faktor istovremenosti – 0,8

Na slici 18 prikazana je SWOT analiza odabira koncentracije ugljikova monoksida kao parametra za određivanje uspješnosti sustava ventilacije.

S Strengths - SNAGE	W Weaknesses - SLABOSTI
Ispitivanje uspješnosti numeričkim modeliranjem	Ispitivanje uspješnosti ispitivanjem dimom
O Opportunities - PRILIKE	T Threats - PRIJETNJE
Mjerenjem koncentracije ugljikova monoksida mjernim uređajima na više mjesta tokom ispitivanja moguće je poboljšati rezultate dobivene ispitivanjem dimom	Usporedba smanjenja koncentracije ugljikova monoksida s drugim otrovnim plinovima otežana je zbog različitih fizikalnih i kemijskih svojstava plinova

Slika 18. SWOT analiza - odabir parametra koncentracija ugljikova monoksida

4.2. Ventilacija – polja nepokretnog zraka

Određivanjem polja nepokretnog zraka tokom pogona sustava ventilacije može se ocijeniti uspješnost promatranog sustava. Osim procjene ukupnih polja nepokretnog zraka, potrebno je analizirati jesu li te zone međusobno povezane ili su lokalizirane na manja područja unutar prostora podzemne garaže. Na slici 19 prikazana je SWOT analiza odabira polja nepokretnog zraka kao parametra za određivanje uspješnosti sustava ventilacije.

S Strengths - SNAGE	W Weaknesses - SLABOSTI
Razvidan prikaz djelovanja sustava ventilacije	Ispitivanje dimom pokazuje veću nesigurnost rezultata u podzemnim garažama većih površina
O Opportunities - PRILIKE	T Threats - PRIJETNJE
Usporedba s ispitivanjem koncentracije ugljikovog monoksida omogućuje kvalitetniju analizu uspješnosti sustava ventilacije	Ispitivanjem polja nepokretnog zraka koncentracija ugljikovog monoksida u podzemnoj garaži ostaje nepoznata

Slika 19. SWOT analiza - odabir parametra polja nepokretnog zraka

5.1. Mehaničko odimljavanje – vidljivost

Vidljivost je udaljenost na kojoj promatrač može prepoznati predmet u odnosu na pozadinu, dok zamračenje predstavlja smanjenje intenziteta svjetlosti pri prolasku kroz dim. Vidljivost se koristi kao osnovni kriterij za procjenu uvjeta sigurne evakuacije korisnika i djelovanja vatrogasnih postrojbi, dok se zamračenje primjenjuje za vizualni prikaz koncentracije dima.

Smanjena vidljivost izravno ugrožava evakuaciju i otežava vatrogasne intervencije. Za djelovanje vatrogasaca potrebna je vidljivost veća od približno 5 m, dok je za sigurnu evakuaciju korisnika podzemne garaže potrebna vidljivost od najmanje 10 do 15 m. U uvjetima vrlo slabe vidljivosti znakovi za hitne izlaze mogu postati nevidljivi, dok se poželjnim smatra da budu uočljivi s udaljenosti od najmanje 30 m. Zbog toga vrijeme evakuacije mora biti kraće

od vremena generiranja i nakupljanja dima. Nakon završetka evakuacije uključuje se sustav mehaničkog odimljavanja radi smanjenja količine dima i poboljšanja vidljivosti za vatrogasne postrojbe. Sustav treba osigurati bezdimnu zonu visine najmanje 2 m iznad poda. Vidljivost u podzemnoj garaži tokom požara može se analizirati numeričkim modeliranjem, ispitivanjem dimom ili uporabom optičkih osjetnika. Za potrebe procjene moguće je primijeniti pojednostavljeni proračun kojim se približno određuje vidljivost tokom požara. Prema jednadžbi izvedenoj prema Koschmiederu, odnosno njezinoj prilagodbi za dim nastao u požaru, vidljivost se može izraziti kao:

$$V = \frac{K}{\sigma} \quad (17)$$

gdje je:

V - vidljivost [m]

K – bezdimenzijski faktor vidljivosti, ovisan o vrsti promatranog objekta i uvjetima osvjjetljenja

σ - koeficijent ekstinkcije [1/m]

Koeficijent ekstinkcije ovisi o koncentraciji dima, veličini čestica i valnoj duljini svjetlosti. Može se odrediti mjerenjem ili procjenom optičke gustoće. U protupožarnoj zaštiti optička gustoća se najčešće izražava po jedinici duljine kako bi se uzeo u obzir put svjetlosti kroz dim:

$$\sigma = 3912 \frac{A_\lambda}{L} \quad (18)$$

gdje je:

A_λ - optička gustoća

L – duljina puta mjerenja [m]

$$A_\lambda = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (19)$$

gdje je:

I_0 - intenzitet upadne svjetlosti

I – intenzitet propuštene svjetlosti

- koeficijent ekstinkcije može se izvesti i iz masene koncentracije dima preko jednadžbe:

$$\sigma = \alpha M \quad (20)$$

gdje je:

M – masena koncentracija dima [g/m³]

α – koeficijent, ovisan o vrsti goriva (primjerice za poliuretan $\alpha = 7 \text{ m}^2/\text{g}$)

K – konstanta ovisi o kriteriju raspoznavanja objekata.

Uobičajeno se uzima

K=3 za raspoznavanje velikih objekata odnosno predmeta

K= 8-10 za raspoznavanje i čitanje natpisa na evakuacijskim znakovima

Na slici 20, prikazana je SWOT analiza odabira vidljivosti kao parametra za određivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja.

S Strengths - SNAGE Analiza vidljivosti predstavlja ključni parametar za sigurnu evakuaciju korisnika podzemne garaže i sigurnost vatrogasaca tokom intervencije	W Weaknesses - SLABOSTI Pri ispitivanju dimom transparentnost hladnog dima nije istovjetna transparentnosti dimnih plinova nastalih izgaranjem
O Opportunities - PRILIKE Mogućnost usporedbe i validacije rezultata numeričkim modeliranjem i/ili ispitivanjem dimom uz primjenu optičkih osjetnika	T Threats - PRIJETNJE Ispitivanjima nije moguće obuhvatiti sve realne scenarije požara u podzemnim garažama

Slika 20. SWOT analiza - odabir parametra vidljivost

5.2. Mehaničko odimljavanje – površina nepokretnog zraka (dima)

Ispitivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja odabirom parametra površine nepokretnog zraka, odnosno dima, istovjetno je ispitivanju uspješnosti sustava ventilacije odabirom parametra polja nepokretnog zraka. Na slici 21 prikazana je SWOT analiza odabira polja nepokretnog zraka, odnosno dima kao parametra za određivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja.

S Strengths - SNAGA	W Weaknesses - SLABOSTI
Razvidan prikaz djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja	Ispitivanje dimom ima veću nesigurnost rezultata ispitivanja u podzemnim garažama većih površina
O Opportunities - PRILIKE	T Threats - PRIJETNJE
Usporedba i validacija ispitivanja numeričkim modeliranjem ispitivanjem dimom	Ispitivanjima nije moguće obuhvatiti sve realne scenarije koji mogu nastati u požarima podzemnih garaža

Slika 21. SWOT analiza - odabir parametra polja nepokretnog zraka (dima)

6. Ocjena uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja

Sukladno rezultatima dobivenim opisanim ispitivanjima i prema odabranim parametrima ocjenjuje se uspješnost ispitivanog sustava ventilacije i sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže. Usporedbom i validacijom različitih načina ispitivanja te primjenom više parametara smanjuje se nesigurnost rezultata, čime ocjena uspješnosti postaje pouzdanija. Na slici 22 prikazana je SWOT analiza ocjene uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža.

S Strengths - SNAGA	W Weaknesses - SLABOSTI
Kvalitetnija ocjena uspješnosti sustava u odnosu na dosadašnje načine ispitivanja	Mogućnost odabira neodgovarajućeg načina ispitivanja i parametara analize
O Opportunities - PRILIKE	T Threats - PRIJETNJE
Usporedba i validacija različitih načina ispitivanja te primjena više parametara povećavaju pouzdanost ocjene uspješnosti	Ispitivanjima nije moguće obuhvatiti sve realne scenarije požara povezane s povećanjem koncentracije otrovnih plinova i izvanrednim događajima u podzemnim garažama

Slika 22. SWOT analiza - ocjena uspješnosti

4.2. Primjena generičke metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja kod evakuacije i pomoći vatrogasnim postrojbama

Evakuacija iz podzemne garaže u slučaju požara predstavlja proces brzog premještanja korisnika iz ugroženog prostora prema sigurnim izlazima. Uspješnost evakuacije izravno je povezana s pravodobnim otkrivanjem požara, širenjem dima te uspješnošću sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja [52]. Dim ima ključan utjecaj na dinamiku kretanja osoba jer se stratificira odozgo prema dolje i postupno smanjuje raspoloživi prostor za kretanje. Kako se sloj dima spušta, kretanje osoba prelazi iz normalnog hoda u kretanje u pognutom položaju, a u ekstremnim uvjetima u puzanje, što značajno produžuje vrijeme evakuacije [166].

Smanjena vidljivost i prisutnost otrovnih dimnih plinova dodatno povećavaju rizik za korisnike. Evakuacijski putevi u podzemnim garažama moraju biti jasno označeni i osvijetljeni rasvjetom u nuždi. Znakovi za evakuaciju usmjeravaju korisnike prema najbližim izlazima, ali u uvjetima dima pojedini znakovi mogu postati nevidljivi ili izlazi mogu biti privremeno neprohodni [167]. Svjetleće sigurnosne trake postavljene uz pod olakšavaju orijentaciju i mogu značajno smanjiti vrijeme evakuacije u uvjetima smanjene vidljivosti [168] [169]. Sustavi za razglas i glasovne poruke dodatno doprinose usmjeravanju korisnika tokom evakuacije te smanjuju vrijeme reakcije u ranoj fazi događaja [170]. Podzemne garaže moraju biti opremljene sustavima za dojavu požara, sustavima za gašenje požara te sustavima ventilacije i mehaničkog odimljavanja, a evakuacijski putevi moraju biti propisno označeni [171]. Učinkovit sustav odimljavanja smanjuje koncentraciju dimnih plinova, poboljšava vidljivost i osigurava prohodnost evakuacijskih puteva, čime se povećava vjerojatnost sigurne evakuacije svih korisnika, uključujući starije osobe i osobe s invaliditetom [172]. Metoda određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža u odnosu na evakuaciju korisnika i poboljšanje vidljivosti kao pomoć vatrogasnim postrojbama tokom intervencije prikazana je na slici 23. Metoda se temelji na usporedbi stvarnog vremena razvoja događaja s predviđenim vremenom evakuacije t_e i procjeni vidljivosti u prostoru garaže.

1. Ako je vrijeme manje od predviđenog vremena evakuacije ($t < t_e$), sustav ventilacije mora biti isključen ako je prethodno bio uključen za potrebe redovne ventilacije podzemne garaže.

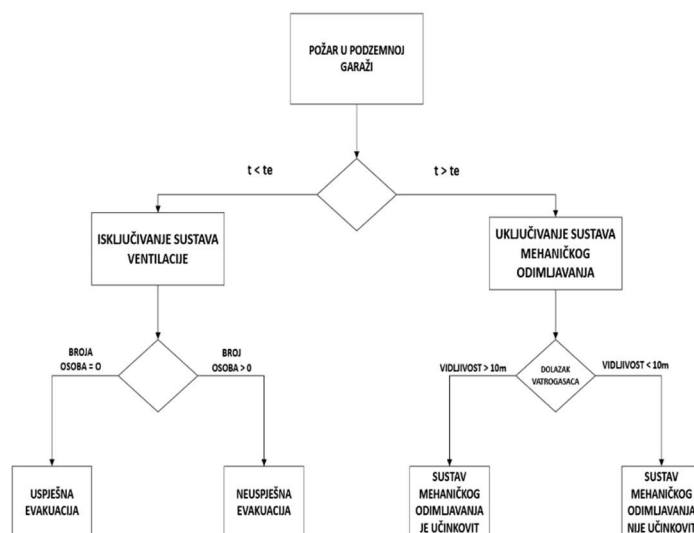
2. U trenutku kada je vrijeme jednako vremenu evakuacije ($t = t_e$), ocjenjuje se uspješnost evakuacije ovisno o broju zaostalih korisnika u garaži:

- a. broj zaostalih korisnika = 0 – evakuacija je uspješna
- b. broj zaostalih korisnika > 0 – evakuacija nije uspješna

3. Ako je vrijeme veće od predviđenog vremena evakuacije ($t > t_e$), uključuje se sustav mehaničkog odimljavanja automatski ili ga aktiviraju vatrogasci po dolasku na intervenciju.

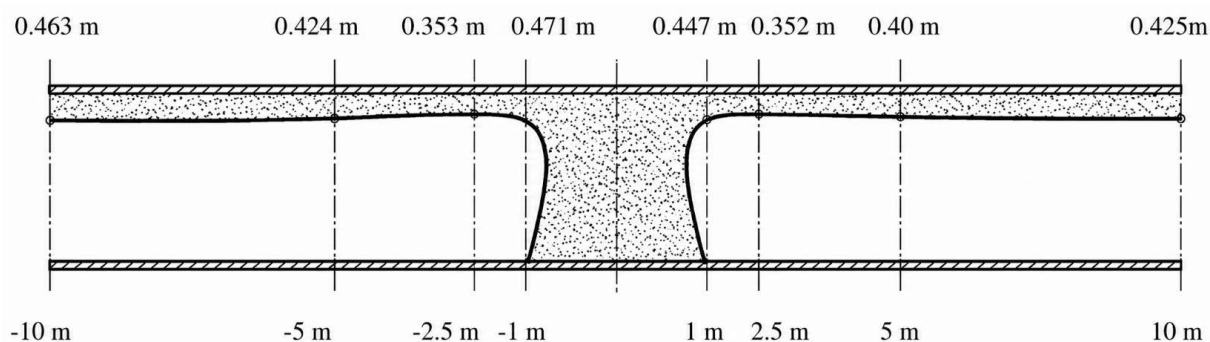
Uspješnost sustava određuje se prema postignutoj vidljivosti:

- a. vidljivost < 10 m – sustav mehaničkog odimljavanja nije učinkovit
- b. vidljivost > 10 m – sustav mehaničkog odimljavanja je učinkovit



Slika 23. Prikaz metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja pri evakuaciji i pomoći vatrogasnim postrojbama

Nakon analize kretanja dima i debljine sloja dima [156], provedeno je terensko ispitivanje podzemnih garaža. Na slici 24 [156] je prikazan presjek debljine sloja dima na udaljenosti od 10 metara od požara.



Slika 24. Prikaz debljine sloja dima

Debljina sloja dima ispod stropa iznosi približno 450 mm. Zbog toga znakovi evakuacije postavljeni do 300 mm ispod stropa u slučaju požara neće biti vidljivi. Kako bi ostali unutar čistog sloja zraka, znakovi evakuacije moraju biti postavljeni najmanje 500 mm ispod stropa. U istraživanje je uključena ukupno 71 podzemna garaža. Većina pregledanih garaža nalazi se u Zagrebu, gdje su terenskim istraživanjem obuhvaćene 43 lokacije. Ostale analizirane garaže nalaze se u Argentini (1), Austriji (2), Bosni i Hercegovini (4), Kini (2), Njemačkoj (2), Indiji (1), Italiji (1), Crnoj Gori (5), Slovačkoj (2), Sloveniji (3) i Ujedinjenom Kraljevstvu (5). Na slici 25 prikazani su postoci nevidljivih znakova evakuacije u slučaju požara. Rezultati pokazuju da u približno 80 % analiziranih podzemnih garaža znakovi evakuacije ne bi bili

vidljivi tokom požara. Položaji znakova evakuacije razvrstani su u tri kategorije prema udaljenosti od stropa: bez znakova (crvena boja), znakovi postavljeni do 300 mm ispod stropa (plava boja) te znakovi postavljeni više od 300 mm ispod stropa (zelena boja). Tipična visina znaka iznosi 180 mm, a znakovi su izvedeni u zeleno-bijeloj kombinaciji.



Slika 25. Položaj znakova evakuacije u podzemnim garažama

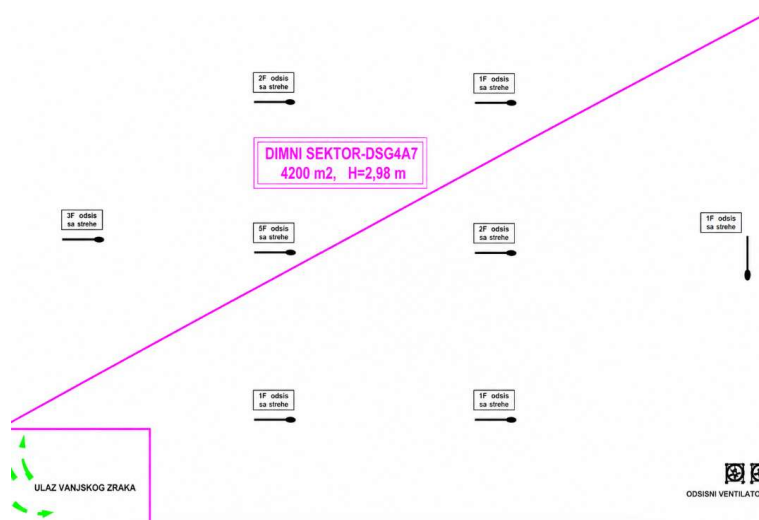
Iako bi se korisnici podzemne garaže trebali evakuirati prije uključanja sustava mehaničkog odimljavanja, analiza rezultata ispitivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja omogućuje prepoznavanje područja s izrazito nepovoljnom vidljivošću evakuacijskih znakova, osobito onih smještenih pod stropom. U slučaju porasta koncentracije štetnih plinova numeričkim modeliranjem ili ispitivanjem vrućim odnosno hladnim dimom moguće je odrediti zone nepokretnog zraka koje predstavljaju povećan rizik za zdravlje korisnika. Na temelju takve analize moguće je optimirati položaje evakuacijskih znakova te ih premjestiti na lokacije gdje će ostati vidljivi, primjerice na zidove ili stupove podzemne garaže. Budući da znakovi evakuacije imaju neovisno napajanje, njihova vidljivost u slučaju požara od značajne je pomoći vatrogasnim postrojbama tokom intervencije.

5. VALIDACIJA METODE NA STUDIJAMA SLUČAJA

Razvijena metoda za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja validirana je na više studija slučaja podzemnih garaža koje su izgrađene i u uporabi. Analizirani su sustavi ventilacije i mehaničkog odimljavanja u podzemnim garažama u Republici Hrvatskoj, Republici Sloveniji, Bosni i Hercegovini, Republici Srbiji te Ujedinjenom Kraljevstvu. Obuhvaćene su garaže različitih arhitektonskih koncepcija, zahtjeva za sustave ventilacije i mehaničkog odimljavanja te pristupa propisima zaštite od požara.

5.1. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Stožice, Ljubljana, Slovenija

Za potrebe parkiranja vozila na nogometnom stadionu Stožice u Ljubljani predviđena je podzemna garaža izvedena u pet podzemnih razina. Ulaz i izlaz vozila te kretanje između razina omogućeni su ulazno-izlaznim rampama. Dobava vanjskog zraka osigurana je preko ulazno-izlazne rampe na prvoj razini te preko okana za dobavu vanjskog zraka na ostalim razinama. Za svaku razinu izveden je zaseban sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja. Za odvod nečistog zraka, odnosno ispušnih plinova te dima u slučaju požara, predviđena su okna za odvod ispušnih i dimnih plinova. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja izveden je potisnim ventilatorima u kombinaciji s odsisnim ventilatorima. Sustav ventilacije služi za uklanjanje ispušnih plinova, prvenstveno produkata izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem, s naglaskom na ugljikov monoksid. U slučaju požara sustav postaje dio aktivne zaštite od požara i služi za odvođenje dima i topline iz prostora garaže. Na svim razinama ugrađena je sprinkler instalacija. U slučaju požara, nakon otkrivanja dima dimnim osjetnicima ili aktiviranjem sprinkler sustava, svi ventilatori u garaži odmah se isključuju. Protupožarna centrala dojavljuje požarnu uzbunu vatrogascima, aktivira zvučne signale i započinje evakuacija korisnika. Dvije minute nakon otkrivanja požara uključuju se odsisni ventilatori u dimnom odjeljku u kojem je požar nastao, dok evakuacija još traje. Nakon približno dvije dodatne minute, po završetku evakuacije, uključuju se potisni ventilatori. Raspored potisnih ventilatora usklađen je s pozicijama sprinkler mlaznica kako ne bi došlo do ometanja vodenog mlaza. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja provedeno je za četvrtu razinu podzemne garaže, dimni odjeljak DSG4A7, površine 4200 m². Na slici 26 prikazan je raspored potisnih i odsisnih ventilatora u ispitivanom odjeljku.



Slika 26. Prikaz položaja ventilatora u dimnom odjeljku - podzemna garaža Stožice Ljubljana

U tablici 6 prikazane su dimenzije ispitivane razine podzemne garaže, uključujući duljinu, širinu, visinu, površinu i volumen.

Tablica 6. Dimenzije četvrte razine - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

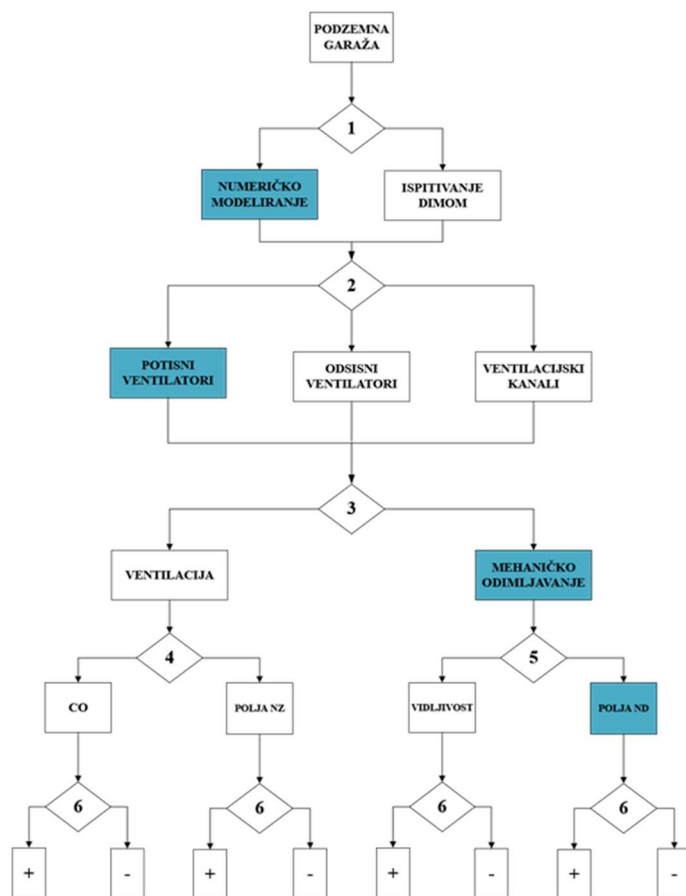
Redni broj		Vrijednost	Mjerna jedinica
1	Duljina	188,5	m
2	Širina	100	m
3	Visina	2,98	m
4	Površina	12141	m ²
5	Volumen	35735	m ³

S obzirom na veliku površinu razine podzemne garaže Stožice, za analizu je odabran odjeljak DSG4A7 koji je ispitan numeričkim modeliranjem i ispitivanjem hladnim dimom. Navedeni odjeljak smatran je izoliranim od ostatka garaže kako susjedni prostori ne bi utjecali na kretanje dima, pa je dimom ispunjen isključivo volumen tog odjeljka. Na taj način omogućena je analiza ponašanja dima i djelovanja sustava mehaničkog odimljavanja u jasno definiranom prostoru bez utjecaja okolnih zona.

5.1.1. Numeričko modeliranje

Djelovanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima pretpostavljeno je istovjetnim djelovanju tokom ispitivanja hladnim dimom. Za numeričku analizu uspješnosti sustava odabran je parametar polja nepokretnog dima, kako je prikazano na slici 27. U tablici 7 prikazane su osnovne postavke numeričkog modeliranja: programski paket, prostorna diskretizacija, vremenska shema simulacije, način modeliranja dima i ventilatora, jednadžba stanja, fizikalna svojstva fluida, model turbulencije i vrsta strujanja.

Na slici 28 prikazan je razvoj polja nepokretnog dima u odabranom odjeljku DSG4A7 u razdoblju od 0 do 600 sekundi nakon uključenja sustava.



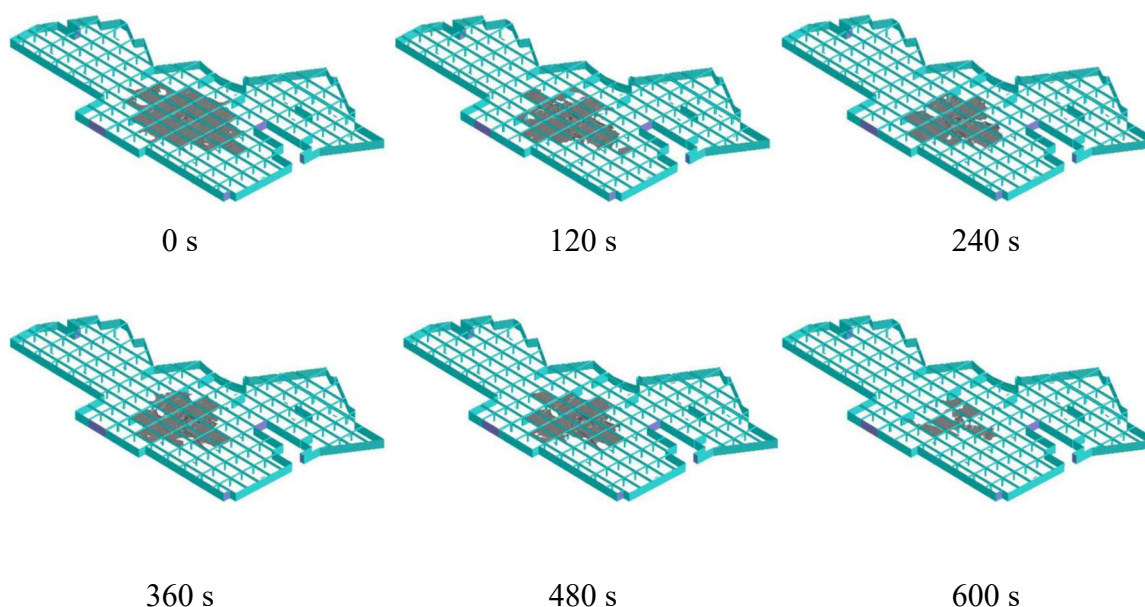
Slika 27. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Tablica 7. Postavke numeričkog modeliranja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Programski paket	ANSYS Fluent
Prostorna diskretizacija	trodimenzijska
Vremenska shema simulacije	nestacionarna
Modeliranje dima	dim je modeliran kao pasivni skalar, predstavljen dodatnom koncentracijom CO ₂ . Transport pasivnog skalara odvijao se konvekcijom i difuzijom, pri čemu njegova koncentracija nije izravno utjecala na fizikalna svojstva fluida. Utjecaj požara na strujanje uzet je u obzir preko volumetrički izvora topline (zone požara) i posljedične promjene temperature i gustoće zraka. Zona požara ujedno je predstavljala izvor pasivnog skalara. Zraku koji je prošao kroz zonu požara dodijeljena je vrijednost pasivnog skalara od 100 % referentne vrijednosti, koja odgovara dodatnoj koncentraciji CO ₂ određenoj aproksimativnim analitičkim proračunom procesa izgaranja. Na taj je način omogućeno praćenje transporta i prostorne raspodjele dima bez modeliranja detaljne

	kemije izgaranja i utjecaja sastava produkata izgaranja na fizikalna svojstva fluida.
Modeliranje ventilatora	potisni ventilatori modelirani su kao zone u kojima fluid postiže zadanu brzinu i smjer strujanja
Jednadžba stanja	nestlačivi idealni plin (zrak)
Fizikalna svojstva fluida	fizikalna svojstva fluida određena su kao funkcija lokalnog polja temperature
Model turbulencije	RNG k- ϵ sa standardnim zidnim funkcijama
Vrsta strujanja	viskozno, turbulentno

Kod strujanja praćenih prijenosom topline značajke fluida, osobito gustoća, ovise o temperaturi. Gradijent gustoće uzrokovan temperaturnim razlikama generira uzgonske sile koje induciraju prirodnu konvekciju. Model nestlačivog idealnog plina primjenjuje se u slučajevima kada su promjene tlaka tokom proračuna male i ne utječu značajno na stlačivost medija. U tom modelu gustoća se računa kao funkcija lokalne temperature, dok se referentni tlak smatra konstantnim.

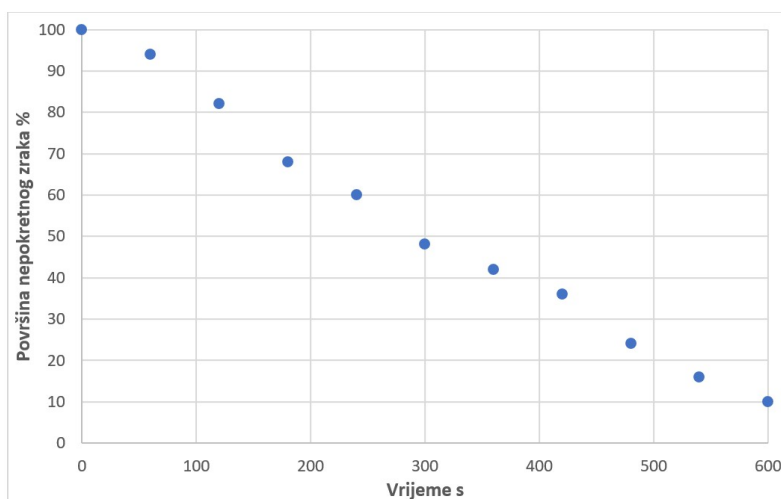


Slika 28. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

U tablici 8 prikazana su polja nepokretnog dima, izražena u postotku i u m^2 , dok su na slici 29 prikazane polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu u razdoblju od 0 do 600 sekundi nakon uključenja sustava.

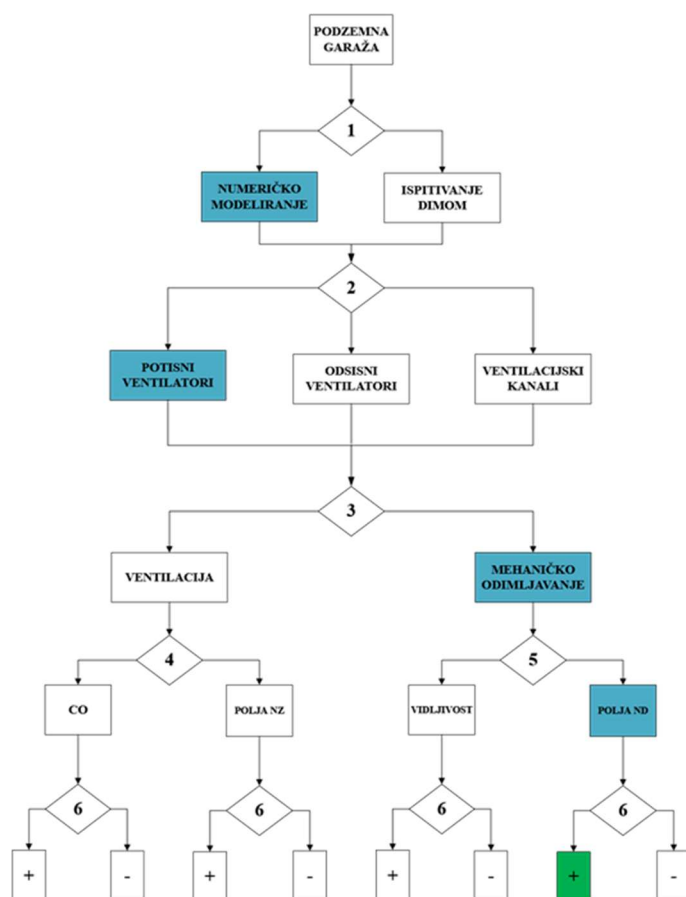
Tablica 8. Prikaz polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	Polja nepokretnog dima [m ²]
0	100	4200
60	94	4032
120	82	3444
180	68	2856
240	60	2520
300	48	2016
360	42	1764
420	36	1512
480	24	1008
540	16	672
600	10	420



Slika 29. Prikaz polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

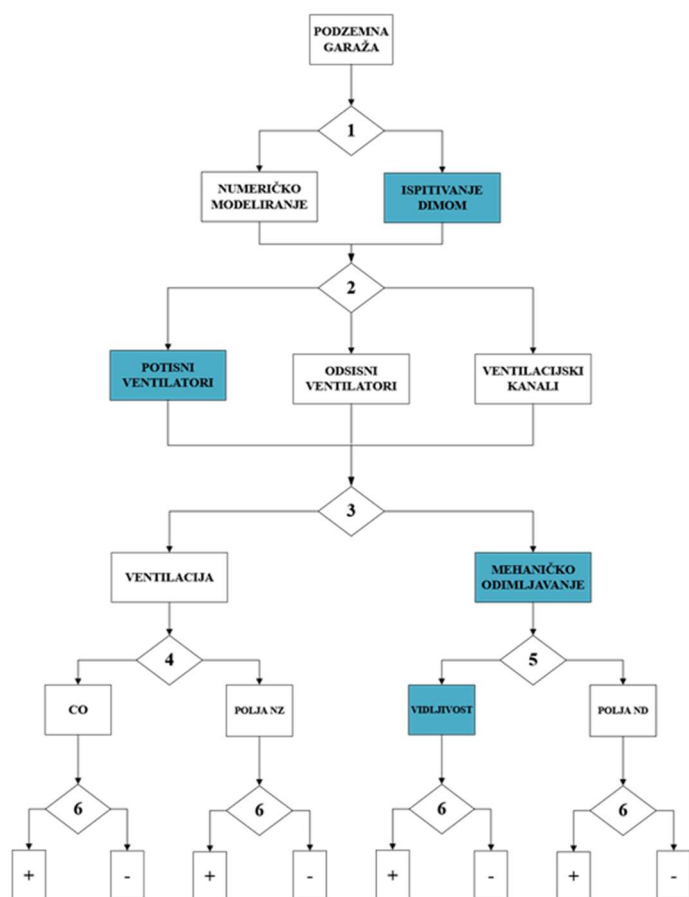
Nakon 600 sekundi od uključivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima dim se zadržao na približno 10 % ukupne analizirane površine. Zaostala polja nepokretnog dima bila su lokalizirana i međusobno nepovezana. Na temelju rezultata ispitivanja utvrđeno je da se površina polja nepokretnog dima ne smanjuje linearno. U prvih 180 sekundi smanjenje je iznosilo približno 32 %, dok je u posljednjih 180 sekundi iznosilo oko 26 % ukupne površine. Takvo ponašanje pripisuje se opstrukcijama u prostoru garaže, prvenstveno stupovima i gredama te položaju odsisnih ventilatora. Rezultati ispitivanja pokazali su da je sustav mehaničkog odimljavanja učinkovit, kako je prikazano na slici 30.



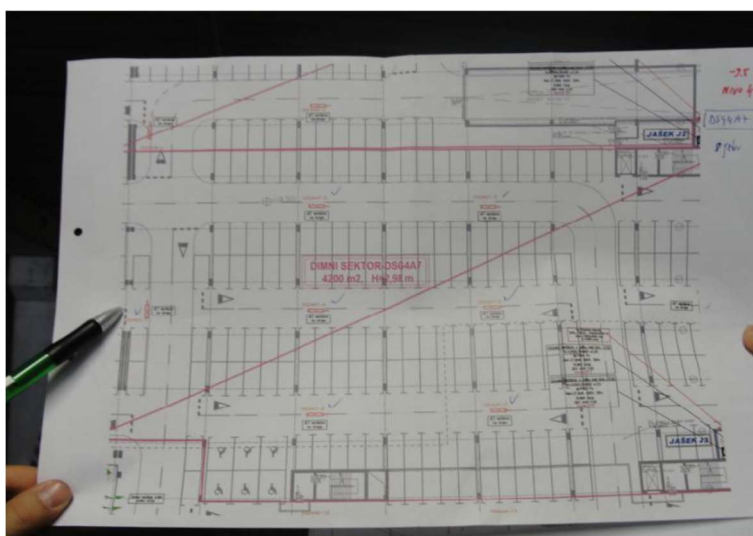
Slika 30. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

5.1.2. Ispitivanje hladnim dimom

Za određivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja i validaciju rezultata numeričkog modeliranja provedeno je ispitivanje hladnim dimom u podzemnoj garaži. Za proizvodnju dima korišten je generator dima i magle TRAINER 401 proizvođača MSS Professional. Uređaj omogućuje stvaranje dima različitih optičkih svojstava, od prozirne izmaglice do gustog takozvanog „white-out” dima koji simulira uvjete smanjene vidljivosti. Maksimalni kapacitet proizvodnje iznosi približno 1000 m³/min, uz mogućnost neprekidnog rada nešto kraće od četiri sata pri punom opterećenju. Za određivanje udaljenosti korišten je laserski daljinomjer PD-1 proizvođača HILTI, mjernog raspona 0,05–100 m i preciznosti ±1,5 mm. Zbog velike površine garaže nije bilo moguće cijeli prostor ispuniti dimom pa je ispitivanje provedeno u odabranom odjeljku DSG4A7 na četvrtoj razini. Kao parametar za ocjenu uspješnosti sustava u ispitivanju hladnim dimom odabrana je vidljivost, kako je prikazano na slici 31, a na slici 32 prikazan je tlocrt ispitivanog dimnog odjeljka DSG4A7 podzemne garaže.

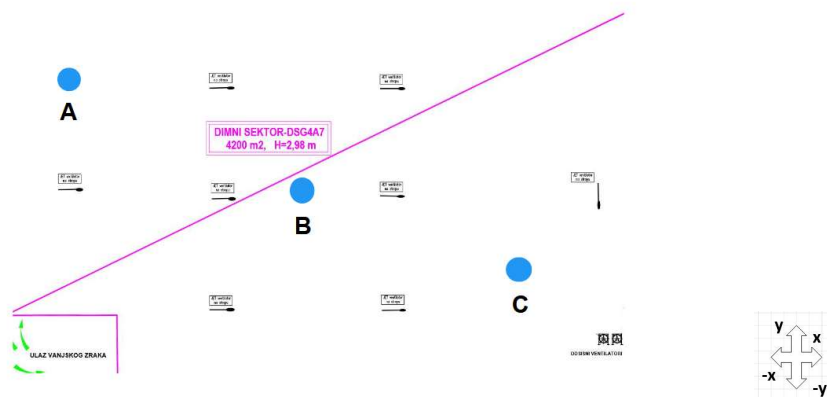


Slika 31. Prikaz metode – ispitivanje dimom - podzemna garaža Stožice, Ljubljana



Slika 32. Tlocrt odjeljka - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Na slici 33 prikazana su mjesta u podzemnoj garaži na kojima je mjerena vidljivost tokom ispitivanja dimom. Zbog veličine ispitivanog dimnog odjeljka odabrane su tri mjerne točke, označene slovima A, B i C.



Slika 33. Prikaz mjernih mjesta za ispitivanje vidljivosti - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Na slici 34 prikazano je zadimljavanje prostora podzemne garaže generatorom dima. Generator je postavljen na granici ispitivanog odjeljka i usmjeren prema njegovoj unutrašnjosti. Hladni dim ispunjava cijelu visinu garaže jer se generator nalazi na podu, a temperatura dima nije dovoljno visoka za stratifikaciju pod stropom, kao što je slučaj kod vrućih dimnih plinova. Transparentnost hladnog dima takva je da je svjetlost rasvjetnih tijela u garaži i dalje vidljiva.



Slika 34. Ispitivanje dimom generatorom dima i magle - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

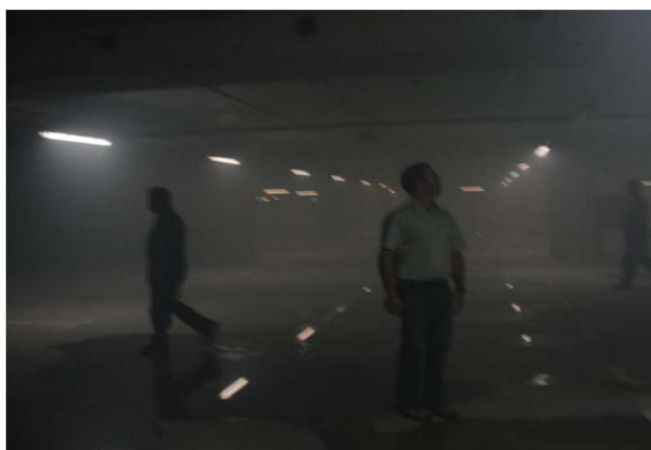
Na slici 35 prikazano je kretanje dima u ispitivanom odjeljku. Razvidno je kako se dim stratificira pod stropom podzemne garaže te se spušta na visinu približno 1,5 m iznad poda. Transparentnost hladnog dima i dalje je takva da su rasvjetna tijela vidljiva. Potrebno je napomenuti da vidljivost ovisi i o promatraču te njegovim fiziološkim značajkama, poput oštine vida i osjetljivosti oka, pa se kao svojstvo dima koristi i neprozirnost, odnosno opacitet

[161]. Može se pretpostaviti da rasvjetna tijela u podzemnoj garaži u stvarnom požaru ne bi ostala u funkciji zbog izloženosti povišenim temperaturama i vrućim dimnim plinovima.



Slika 35. Kretanje hladnog dima tokom ispitivanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

Na slici 36 prikazano je određivanje vidljivosti deset minuta nakon uključivanja sustava mehaničkog odimljavanja. Prije uključivanja sustava cijeli ispitivani odjeljak bio je ispunjen hladnim dimom. Udaljenost je mjerena laserskim daljinomjerom. Međutim, kao što je ranije navedeno, širenje, stratifikacija i transparentnost hladnog dima nisu istovjetni ponašanju vrućih dimnih plinova. Dodatno, rasvjetna tijela u podzemnoj garaži tokom ispitivanja ostala su u funkciji, premda se njihov rad u uvjetima stvarnog požara ne može pretpostaviti.

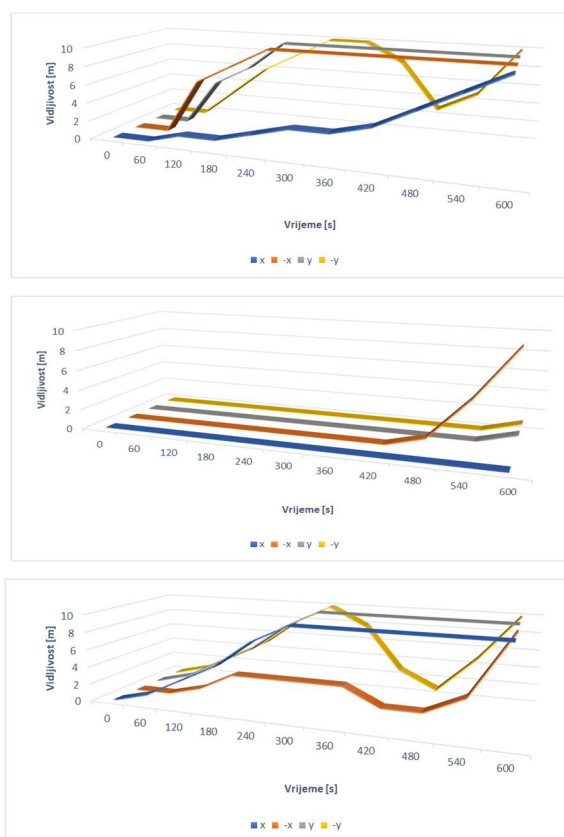


Slika 36. Određivanje vidljivosti deset minuta nakon uključivanja sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

U tablici 9 prikazane su vidljivosti u metrima u ispitivanim točkama u četiri različita smjera, a na slici 37 prikazana je raspodjela vidljivosti oko ispitivanih točaka.

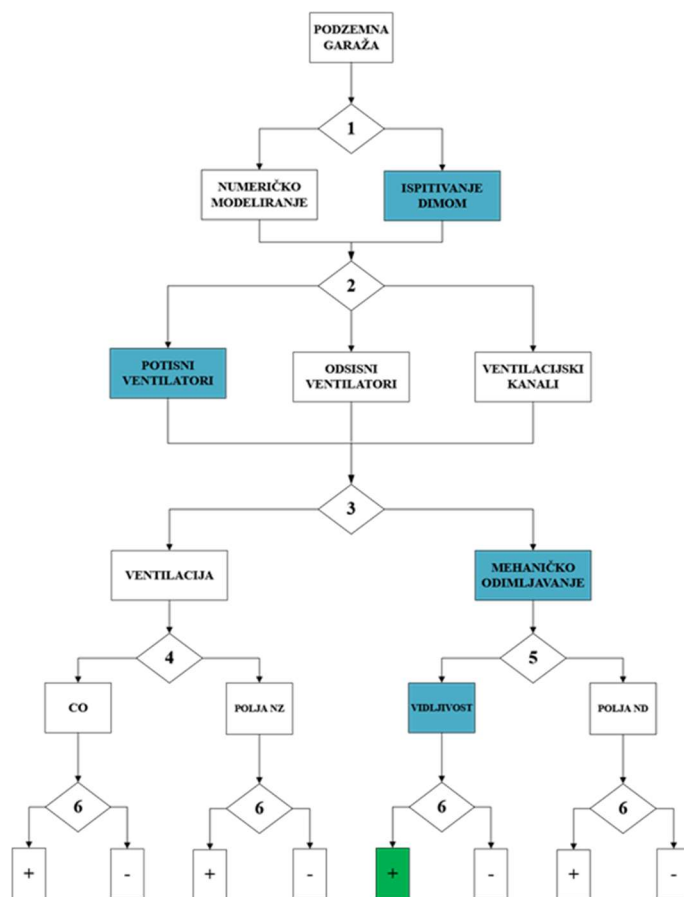
Tablica 9. Vidljivost iz ispitivanih točaka u četiri različita smjera - podzemna garaža Stožice, Ljubljana

	Vrijeme [s]										
	0	60	120	180	200	300	360	420	480	540	600
A											
x	0	0	1	1	2	3	3	4	6	8	10
-x	0	0	6	8	10	10	10	10	10	10	10
y	0	0	5	7	10	10	10	10	10	10	10
-y	0	0	3	6	8	10	10	8	3	5	10
B											
x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-x	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	10
y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
C											
x	0	1	3	5	8	10	10	10	10	10	10
-x	0	0	1	3	3	3	3	1	1	3	10
y	0	1	3	5	8	10	10	10	10	10	10
-y	0	1	3	5	8	10	8	3	1	5	10



Slika 37. Prikaz vidljivosti u različitim smjerovima iz ispitivanih točaka A, B i C

S obzirom na to da je u točkama A i C izmjerena vidljivost jednaka ili veća od 10 m, dok je u točki B vidljivost bila manja od 10 m, rezultati ispitivanja upućuju na zaključak da je sustav mehaničkog odimljavanja učinkovit, kako je prikazano na slici 38.

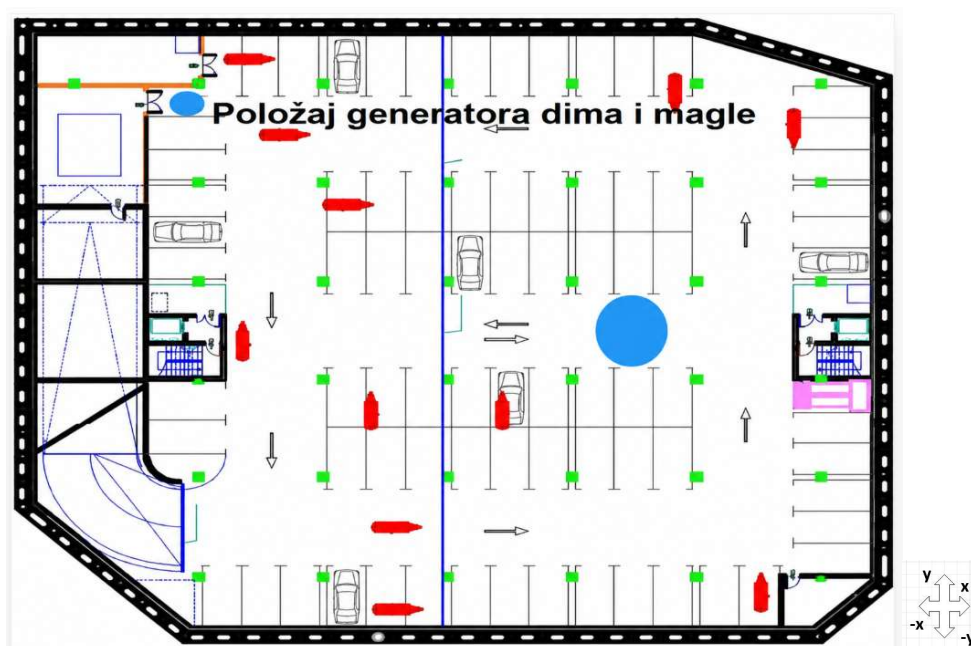


Slika 38. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja – podzemna garaža Stožice, Ljubljana

5.2. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

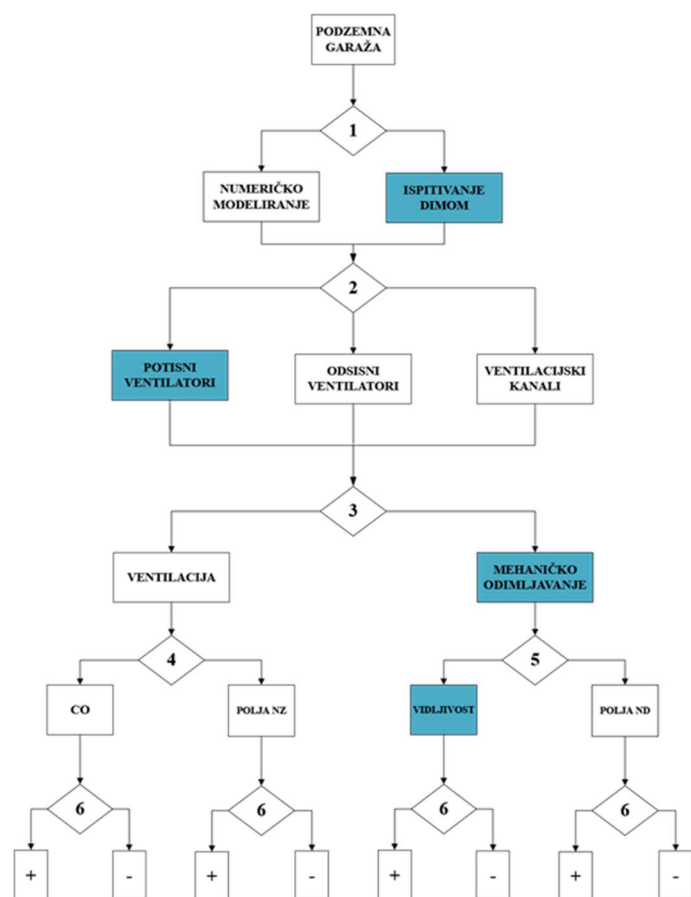
Ispitivanje hladnim dimom sustava mehaničkog odimljavanja provedeno je na drugoj podzemnoj razini podzemne garaže Stari Grad u Sarajevu, Bosna i Hercegovina. Podzemna garaža izvedena je u dvije podzemne razine. Ulaz i izlaz vozila te kretanje između razina izvedeni su ulazno-izlaznim rampama. Dobava vanjskog zraka osigurana je preko ulazno-izlazne rampe za prvu razinu podzemne garaže te preko okana za dobavu vanjskog zraka za drugu razinu. Za svaku razinu podzemne garaže izveden je zaseban sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja. Za izbacivanje nečistog zraka, odnosno ispušnih plinova i dima u slučaju požara iz prostora podzemne garaže predviđena su okna za odvod štetnih ispušnih i dimnih plinova. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemne garaže izveden je

potisnim ventilatorima. Površina jedne razine podzemne garaže iznosi 2075,78 m², a visina garaže 2,7 m. Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja sastoji se od dva odsisna ventilatora te jedanaest dvobrzinskih potisnih ventilatora. Kapacitet svakog odsisnog ventilatora iznosi 31 000 m³/h, a potisnih ventilatora 4284 m³/h na višoj brzini, odnosno 2124 m³/h na nižoj brzini. Potisak potisnih ventilatora iznosi 21,8 N na višoj brzini i 5,29 N na nižoj brzini. Na slici 39 prikazan je tlocrt podzemne garaže s rasporedom potisnih ventilatora, položajem generatora dima i magle u prostoru te mjestom u garaži na kojem je tokom ispitivanja mjerena vidljivost. Položaj odsisnih ventilatora označen je ljubičastom bojom.

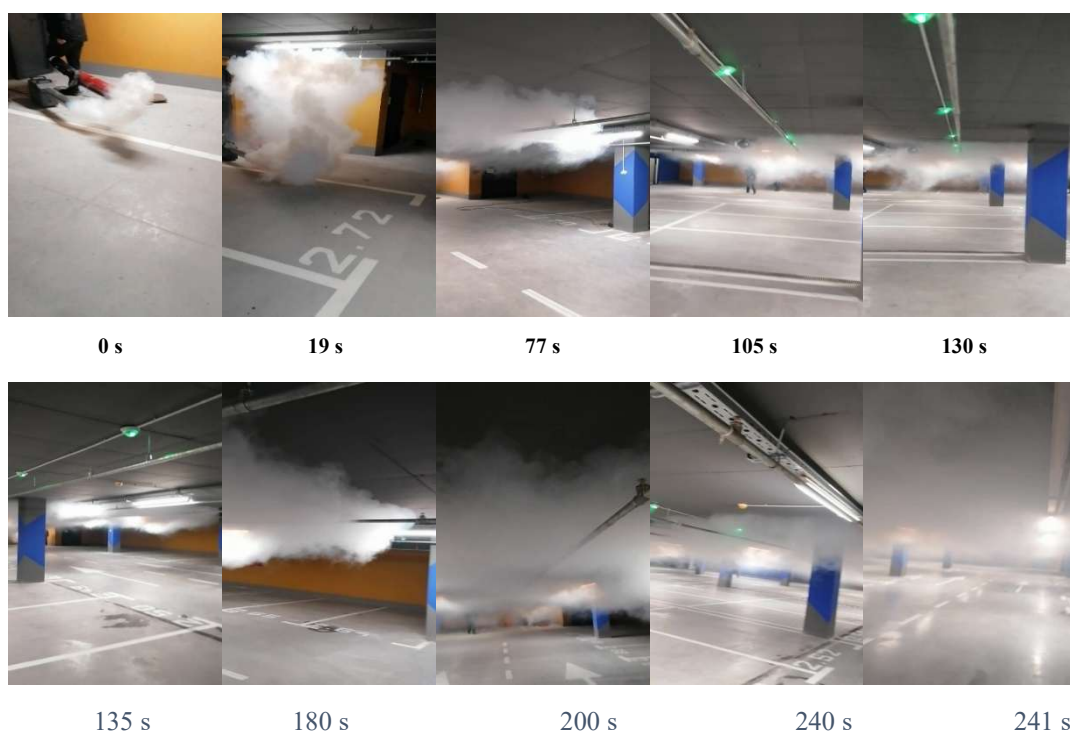


Slika 39. Tlocrt - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

Za proizvodnju hladnog dima u postupku ispitivanja korišten je generator dima Vulcan 5000 s mikroprocesorskom kontrolom rada, koji omogućuje kontinuiranu proizvodnju stabilnog, optički gustog dima. Proizvedeni dim zadržava postojanost u turbulentnim strujanjima zraka te ne isparava poput konvencionalnih sustava na bazi vode, što omogućuje ponovljiva i usporediva ispitivanja vidljivosti. Na slici 40 prikazana je metoda ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže Stari Grad u Sarajevu primjenom hladnog dima, a na slici 41 prikazano je kretanje dima tokom ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja u razdoblju od početka ispitivanja do uključivanja sustava.



Slika 40. Prikaz metode - ispitivanje dimom - podzemna garaža Stari Grad



Slika 41. Ispitivanje hladnim dimom - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

Hladni dim izlazi iz generatora dima i magle te se, budući da je lakši od zraka, diže prema stropu podzemne garaže. Nakon 19 sekundi od početka ispitivanja generirani dim stratifikacijom doseže strop podzemne garaže. Nakon 47 sekundi dim prekriva znak za evakuaciju pod stropom garaže, udaljen 10 m od generatora dima i magle. Transparentnost hladnog dima u tom je trenutku takva da je rasvjetno tijelo još vidljivo. Nakon 68 sekundi hladni dim prekriva potisni ventilator montiran pod stropom garaže, udaljen 12 m od generatora. Dim je tada gust, transparentnost je mala i ventilator više nije vidljiv. Nakon 77 sekundi dim je uzdužno prešao približno 12,5 m od generatora dima i magle. Razvidno je da je brzina kretanja hladnog dima tokom ispitivanja približno 0,16 m/s. Učinak vjetra na kretanje dima istovjetan je učinku prisilne ventilacije[173]. Prema tome, brzina kretanja hladnog dima tokom ispitivanja bila je unutar granica brzina kretanja vrućeg dima. U 105. sekundi dim je prešao 22,5 m u smjeru okomitom na smjer istjecanja dima iz generatora, što odgovara brzini od 0,21 m/s. Arhitektura podzemne garaže takva je da se u uzdužnom smjeru od generatora nalaze parkirna mjesta s lijeve strane, pa dim ispunjava i taj volumen. U okomitom smjeru od generatora dim se kreće uz zid. Razvidno je da generiranje sve većih količina hladnog dima dovodi do povećanja brzine njegova kretanja. Daljnjim kretanjem dim nakon 130 sekundi ispunjava približno 170 m² površine garaže, što znači da svake sekunde zahvaća oko 1,3 m². Transparentnost dima pod stropom takva je da je rasvjeta djelomično vidljiva, dok zelene lampe koje označuju zauzetost parkirnog mjesta nisu vidljive. Nakon 135 sekundi dim doseže udaljenost 20 m u uzdužnom smjeru od generatora, što odgovara brzini od 0,15 m/s. Nakon 180 sekundi dim doseže 28 m u uzdužnom smjeru, odnosno kreće se brzinom od 0,16 m/s. Znak za evakuaciju na udaljenosti 25 m u uzdužnom smjeru u potpunosti je prekriven dimom i više nije vidljiv nakon 200 sekundi od početka ispitivanja. Nakon 240 sekundi dim ispunjava približno 350 m² površine garaže, što znači da svake sekunde zahvaća oko 1,5 m². U 240. sekundi od početka ispitivanja uključen je sustav mehaničkog odimljavanja. Tada dolazi do turbulencije i dim ispunjava cijeli volumen od poda do stropa. U stvarnim uvjetima do tog trenutka svi korisnici morali bi biti evakuirani iz prostora garaže zbog opasnosti od udisanja vrućih otrovnih dimnih plinova koji ispunjavaju cijeli volumen. Zbog turbulentnog strujanja dima smanjuje se njegova transparentnost, a vidljivost na visini iznad 1,8 m od poda iznosi 10 m. Na slici 42 prikazano je smanjenje vidljivosti zbog turbulentnog kretanja dima.



Slika 42. Prikaz smanjenja vidljivosti uslijed turbulentnog kretanja dima – podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

U tablici 10 prikazani su koraci ispitivanja hladnim dimom ovisno o vremenskom trenutku ispitivanja.

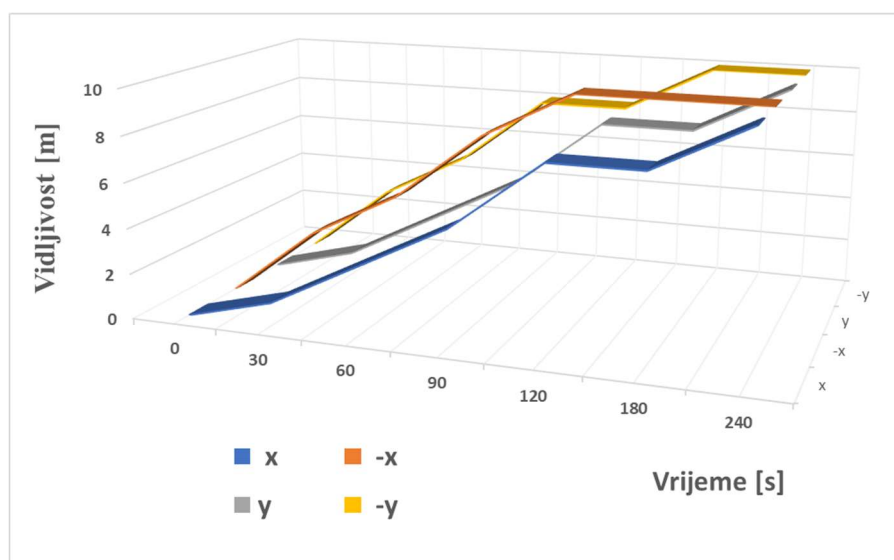
Tablica 10. Koraci ispitivanja ovisno o vremenskom trenutku - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

Redni broj	Korak ispitivanja	Vremenski trenutak [s]
1	početak ispitivanja	0
2	dim je dosegnuo strop podzemne garaže	19
3	dim je dosegnuo 12,5 m od generatora dima i magle	77
4	dim je dosegnuo 22,5m od generatora dima i magle	105
5	dim je ispunio 170 m ² površine podzemne garaže	130
6	dim je dosegnuo 20 m od generatora dima i magle	135
7	dim je dosegnuo 28 m od generatora dima i magle	180
8	dim je ispunio 350 m ² garaže	240
9	početak rada sustava mehaničkog odimljavanja	240

U tablici 11 prikazane su vidljivosti u metrima u ispitivanim točkama u četiri različita smjera, a na slici 43 prikazan je raspored vidljivosti oko ispitivanih točaka u različitim smjerovima.

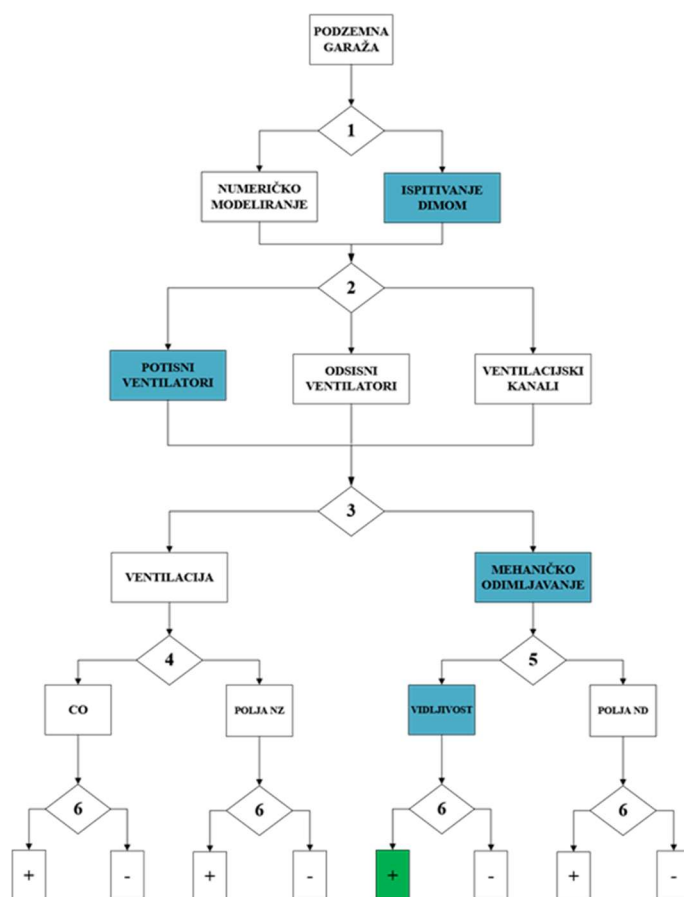
Tablica 11. Vidljivost od ispitivane točke - podzemna garaža Stari Grad

	Vrijeme [s]						
	0	30	60	90	120	180	240
x	0	1	3	5	8	8	10
-x	0	3	5	8	10	10	10
y	0	1	3	5	8	8	10
-y	0	3	5	8	8	10	10



Slika 43. Vidljivosti od ispitivane točke - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

Ukupno polja nepokretnog zraka iznose približno 200 m², odnosno manje od 10 % ukupne površine podzemne garaže. Najviše takvih polja uočeno je uz pregradne zidove te kod ulazno-izlazne rampe. To može upućivati na to da je brzina dobave vanjskog zraka preko ulazno-izlazne rampe, odnosno nadoknada vanjskog zraka, nezadovoljavajuća. Rezultati ispitivanja pokazuju da je sustav mehaničkog odimljavanja učinkovit, kako je prikazano na slici 44.



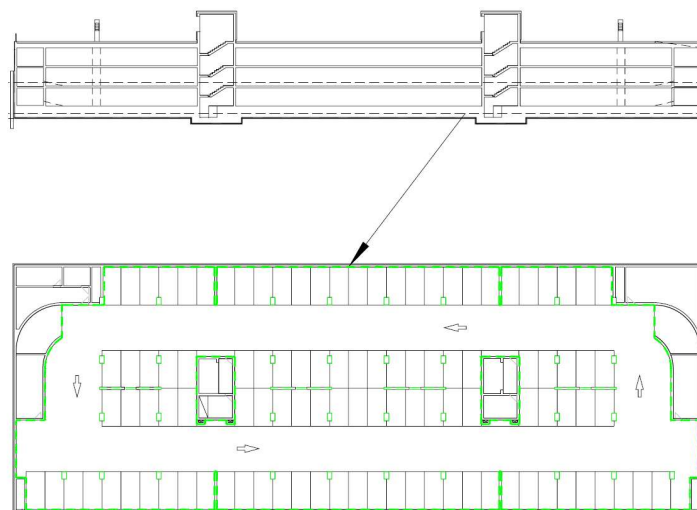
Slika 44. Prikaz uspješnosti mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Stari Grad, Sarajevo

5.3. Ispitivanje sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreba, Hrvatska

Za potrebe parkiranja vozila predviđena je podzemna garaža na tri razine. Ulaz i izlaz vozila iz podzemne garaže te kretanje između pojedinih razina izvedeni su dvjema ulazno-izlaznim rampama. Strukturno opterećenje objekta garaže prenosi se na sustav potpornih stupova i zidova. Svi potporni zidovi neprekinuti su duž cijele visine razina podzemne garaže. Zidovi u uzdužnoj simetralnoj ravnini izvedeni su s kružnim olakšanjima koja omogućuju strujanje zraka u poprečnom smjeru. Potporni stupovi i zidovi te svi ostali konstrukcijski elementi koji doprinose vertikalnoj opstrukciji kretanja zraka uzeti su u obzir prilikom izrade modela domene strujanja. Uspješnost sustava ventilacije analizirana je za jednu razinu podzemne garaže. U tablici 12 prikazane su dimenzije razine podzemne garaže: dužina, širina, visina, površina i volumen, a na slici 45 prikazani su presjek i tlocrt podzemne garaže.

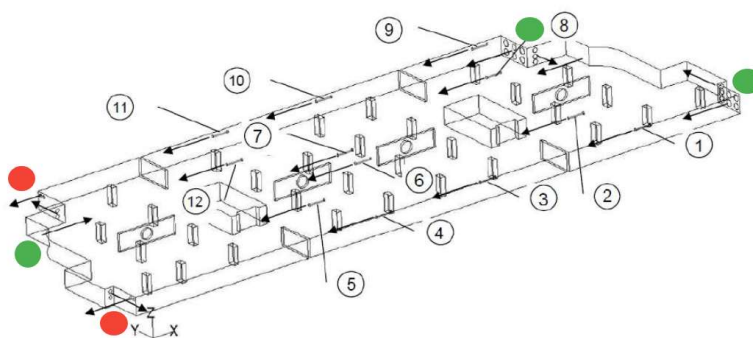
Tablica 12. Geometrijske dimenzije razine - podzemna garaža VIP, Zagreb

Redni broj	Vrijednost	Mjerna jedinica
1	Duljina	90
2	Širina	32
3	Visina	2,35
4	Površina	m ²
5	Volumen	m ³



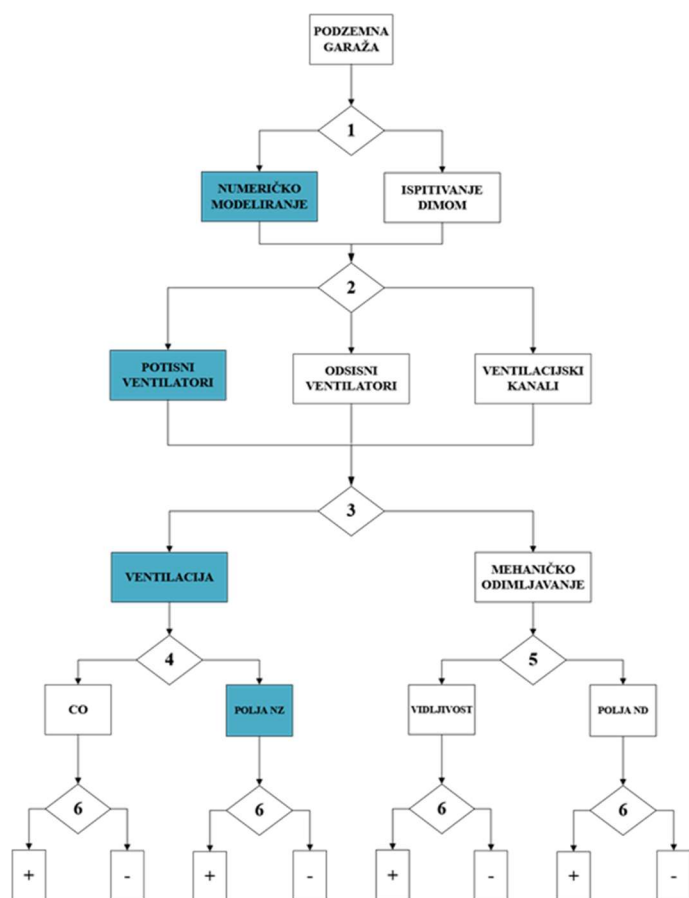
Slika 45. Presjek i tlocrt - podzemna garaža VIP, Zagreb

Sustav ventilacije podzemne garaže s potisnim ventilatorima ostvaruje minimalno pet izmjena zraka na sat na svakoj razini garaže pomoću aksijalnih odsisnih ventilatora smještenih u vertikalnim izlaznim oknima. Vanjski zrak dovodi se preko ulazno-izlaznih rampi i okana. Na razini podzemne garaže pod stropom je smješteno 12 potisnih ventilatora, s položajima i smjerovima djelovanja prikazanim na slici 46. Crvenom bojom označeni su položaji odsisnih ventilatora, a zelenom ulazi vanjskog zraka.



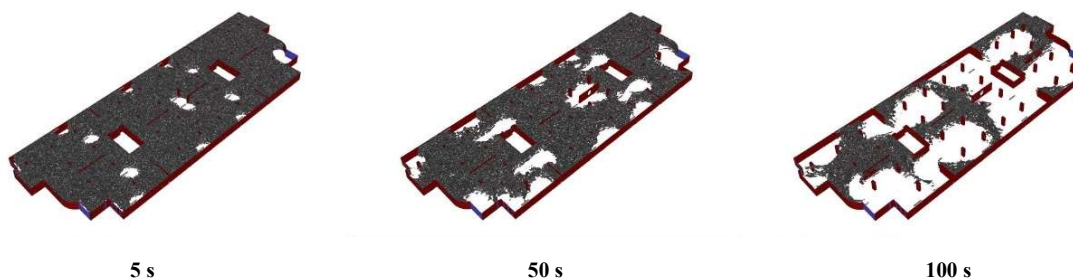
Slika 46. Položaji ulaza vanjskog zraka, odsisnih i potisnih ventilatora - podzemna garaža VIP, Zagreb

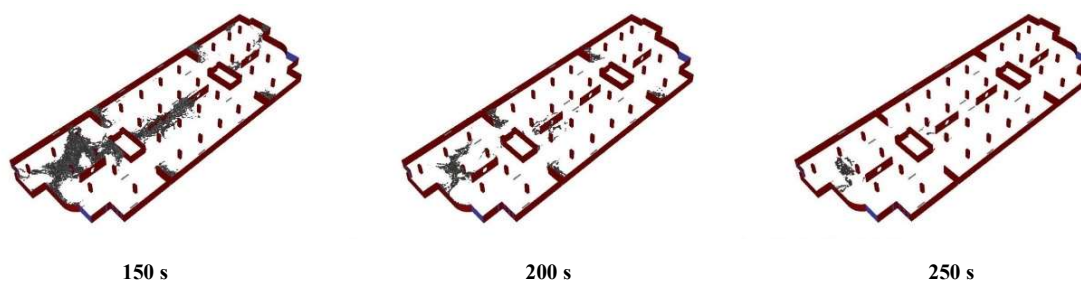
Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na Slici 47 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava ventilacije potisnim ventilatorima podzemne garaže VIP.



Slika 47. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža VIP, Zagreb

Na slici 48 prikazana je uspješnost sustava ventilacije potisnim ventilatorima kroz smanjenje polja nepokretnog zraka u razdoblju od 0 do 250 sekundi nakon uključenja sustava, a u tablici 13 i na slici 49 prikazane su polja nepokretnog zraka u postocima i m² ovisno o vremenu.

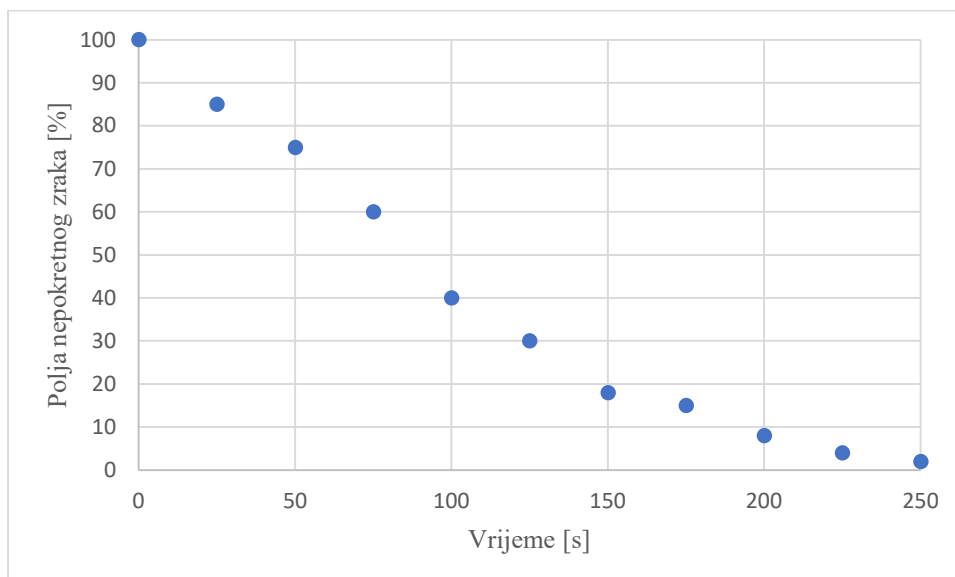




Slika 48. Polje nepokretnog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb

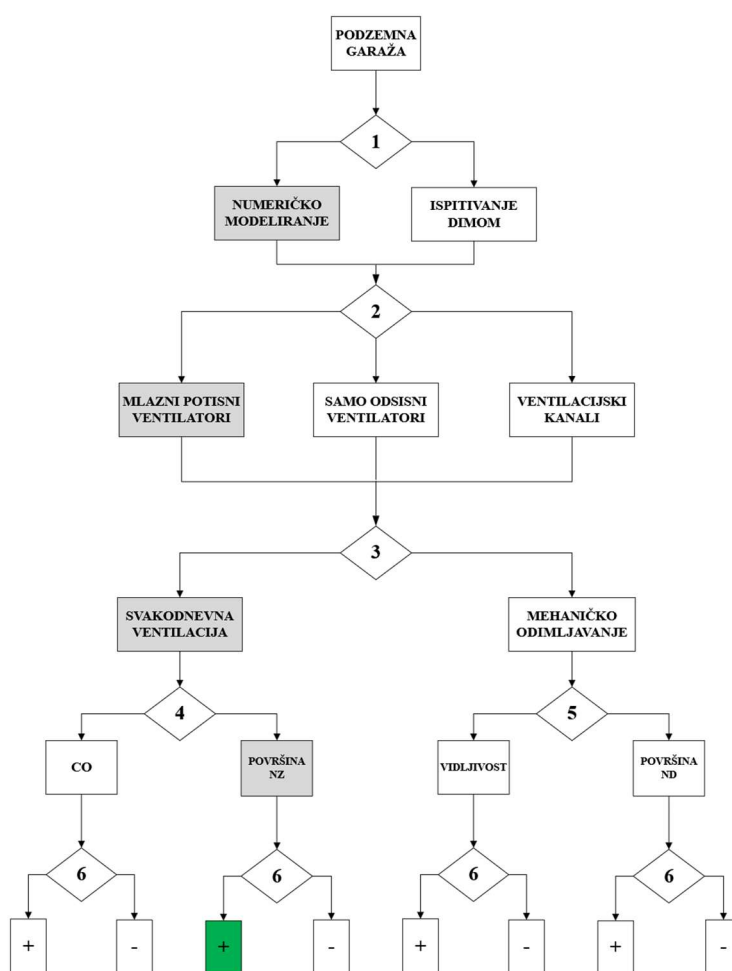
Tablica 13. Polja nepokretnog zraka u funkciji vremena - sustav s potisnim ventilatorima, podzemna garaža VIP

Vrijeme [s]	Polje nepokretnog zraka [%]	Polje nepokretnog zraka [m ²]
0	100	2495
25	85	2120
50	75	1871
75	60	1497
100	40	998
125	30	749
150	18	450
175	15	374
200	8	200
225	4	100
250	2	50



Slika 49. Polje nepokretnog zraka u funkciji vremena - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb

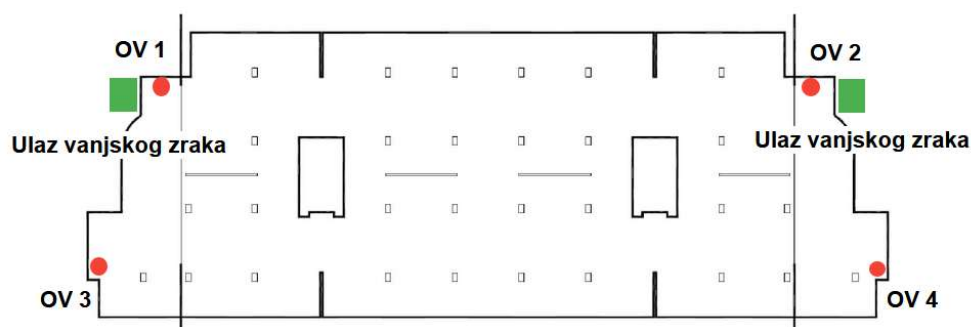
Analiza uspješnosti sustava ventilacije podzemne garaže generičkom CFD metodom pokazuje da su tokom rada sustava polja nepokretnog zraka lokalizirana i međusobno nepovezana. Ukupna površina tih polja iznosi približno 100 m², odnosno oko 2 % ukupne površine podzemne garaže. Nadoknada vanjskog zraka kroz ulazno-izlazne rampe i okna, potpomognuta djelovanjem potisnih ventilatora, proteže se u uzdužnom smjeru kroz cijeli prostor garaže, pri čemu je uklanjanje ugljikova monoksida djelotvorno. Ispitivanje je pokazalo da je sustav ventilacije s potisnim ventilatorima učinkovit te da se u roku od 180 sekundi onečišćeni zrak uklanja iz prostora garaže. Ako bi se isti sustav koristio za mehaničko odimljavanje, uspješno bi uklanjao dim i poboljšavao vidljivost vatrogasnim postrojbama tokom intervencije u slučaju požara. Rezultati ispitivanja potvrđuju uspješnost sustava ventilacije, kako je prikazano na slici 50.



Slika 50. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP

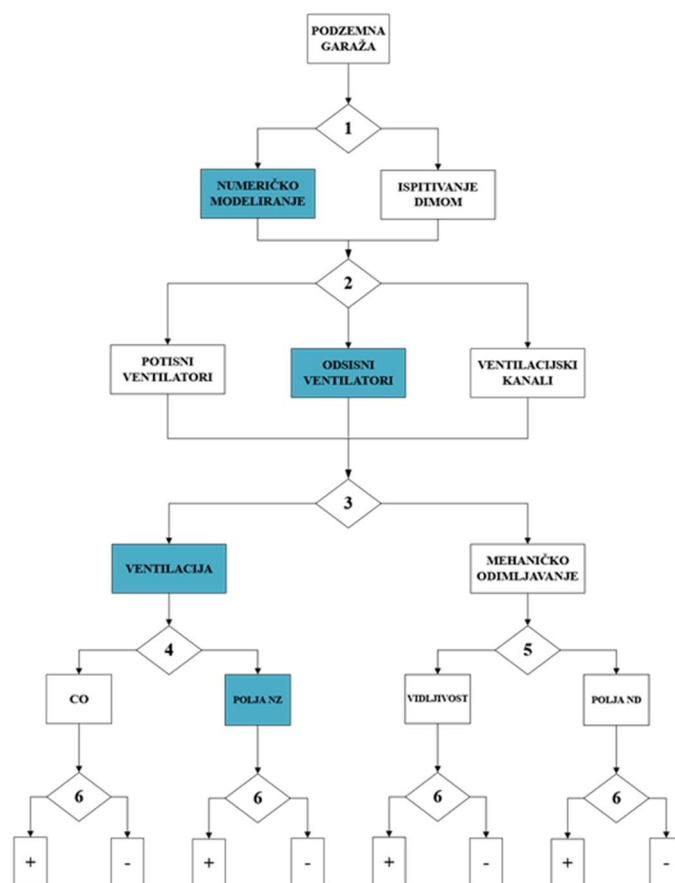
5.4. Ispitivanje sustava ventilacije odsisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb, Hrvatska

Za istovjetnu podzemnu garažu opisanu u Poglavlju 5.3 analizirana je uspješnost sustava ventilacije izvedenog samo odsisnim ventilatorima. Sustav ostvaruje minimalno pet izmjena zraka na sat na svakoj razini garaže pomoću osam aksijalnih odsisnih ventilatora smještenih u grupama po dva ventilatora u vertikalnim izlaznim oknima. Vanjski zrak dovodi se preko ulazno-izlaznih rampi, kako je prikazano na slici 51.



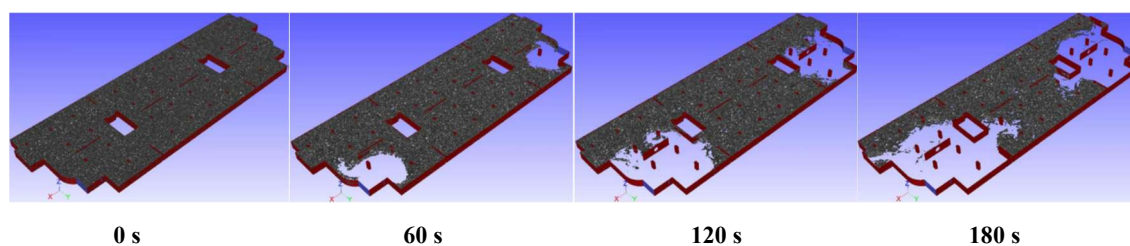
Slika 51. Položaj odsisnih ventilatora i ulaza vanjskog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb

Crvenom bojom označeni su položaji odsisnih ventilatora, a zelenom ulazi vanjskog zraka. Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 52 prikazana je metoda numeričkog modeliranja sustava ventilacije odsisnim ventilatorima podzemne garaže VIP u Zagrebu.



Slika 52. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža VIP, Zagreb

Na slici 53 prikazana je uspješnost sustava ventilacije odsisnim ventilatorima u razdoblju od 0 do 180 sekundi nakon uključenja sustava kroz smanjenje polja nepokretnog zraka.

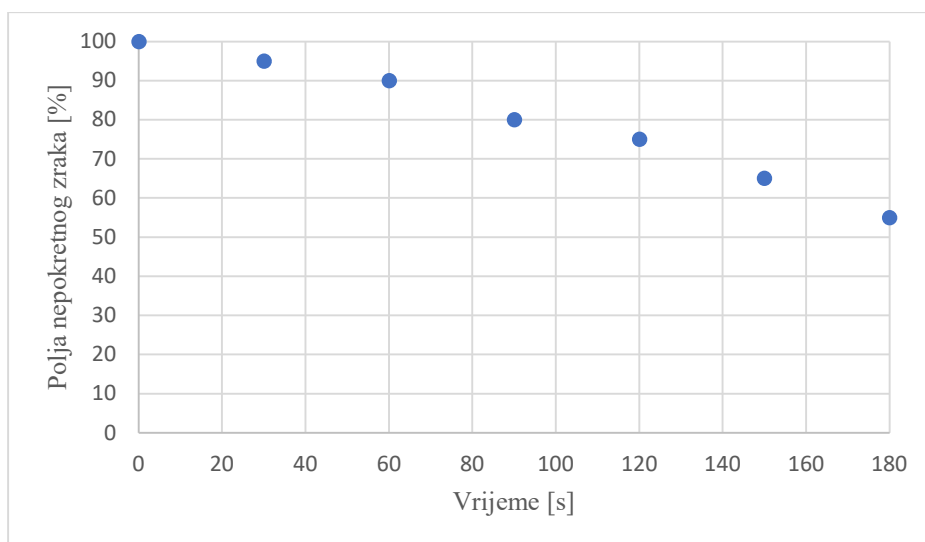


Slika 53. Polja nepokretnog zraka - podzemna garaža VIP, Zagreb

U tablici 14 i na slici 54 prikazana su polja nepokretnog zraka u postocima i m² ovisno o vremenu.

Tablica 14. Polja nepokretnog zraka u ovisnosti o vremenu - sustav odsisnim ventilatorima - podzemna garaža
VIP, Zagreb

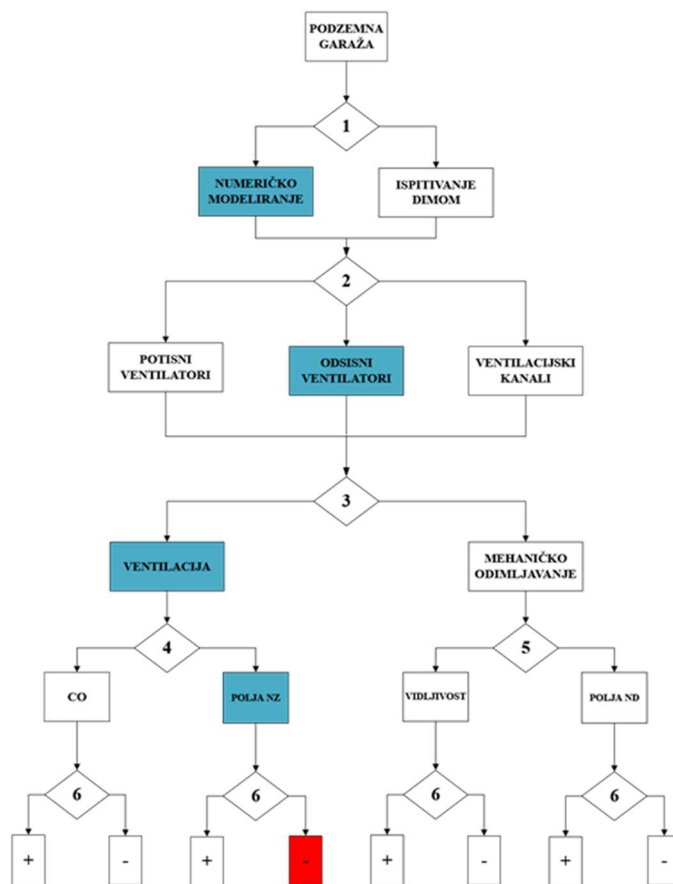
Vrijeme [s]	Polja nepokretnog zraka [%]	Polja nepokretnog zraka [m ²]
0	100	2495
30	95	2370
60	90	2245
90	80	1996
120	75	1871
150	65	1621
180	55	1372



Slika 54. Polja nepokretnog zraka u ovisnosti o vremenu - sustav odsisnim ventilatorima - podzemna garaža VIP, Zagreb

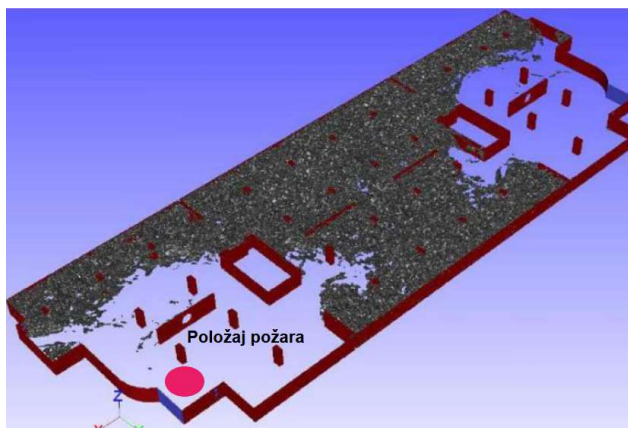
Analiza uspješnosti sustava ventilacije podzemne garaže pokazuje da i nakon 180 s, odnosno 3 minute rada sustava, u središnjem dijelu garaže i dalje postoje velika polja nepokretnog zraka. Površina tih polja iznosi približno 1370 m², što odgovara oko 55 % ukupne površine razine podzemne garaže. Ulaz vanjskog zraka ograničen je na područje u neposrednoj blizini ulazno-izlaznih rampi, dok koncentracija ugljikova monoksida u središnjem dijelu garaže ostaje praktički nepromijenjena unatoč radu sustava ventilacije. Provedena analiza pokazuje da je sustav ventilacije podzemne garaže koji koristi isključivo odsisne ventilatore neučinkovit. Takav sustav predstavlja potencijalnu opasnost za korisnike prostora, kao i za vatrogasne

postrojbe tijekom intervencije u slučaju požara. Rezultati ispitivanja potvrđuju navedene zaključke, kao što je prikazano na slici 55.



Slika 55. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije - podzemna garaža VIP

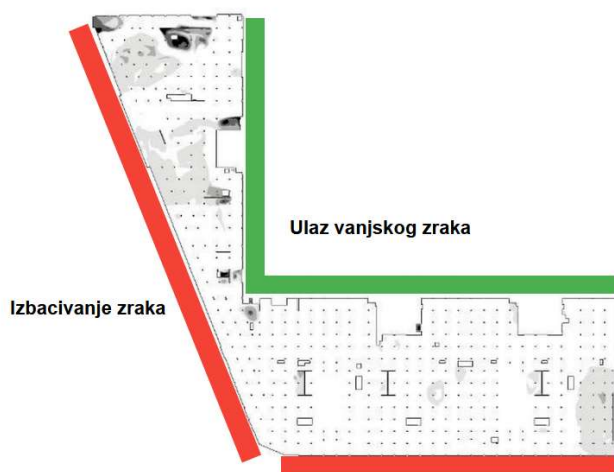
Nadalje, ako bi se uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja analizirala dosadašnjim metodama, postavljanjem požara na unaprijed određeni položaj u podzemnoj garaži, analiza bi mogla pokazati da je sustav učinkovit, iako to u stvarnosti nije slučaj. Na slici 56 prikazan je primjer položaja požara, označen crvenom bojom u kutu podzemne garaže, koji bi prema postojećim metodama analize pokazao prividnu uspješnost sustava.



Slika 56. Primjer analize uspješnosti sustava dosadašnjim metodama

5.5. Ispitivanje sustava ventilacije potisnim ventilatorima - podzemna garaža Colchester, Velika Britanija

Za ventilaciju podzemne garaže u Colchesteru analiziran je sustav s potisnim ventilatorima. Podzemna garaža otvorena je s obje strane, a potisni ventilatori usmjeravaju i izbacuju zrak iz prostora garaže. Odsisni ventilatori nisu predviđeni. Na slici 57 crvenom bojom označeni su otvori kroz koje potisni ventilatori izbacuju zrak, a zelenom bojom otvori za dobavu, odnosno nadoknadu vanjskog zraka.



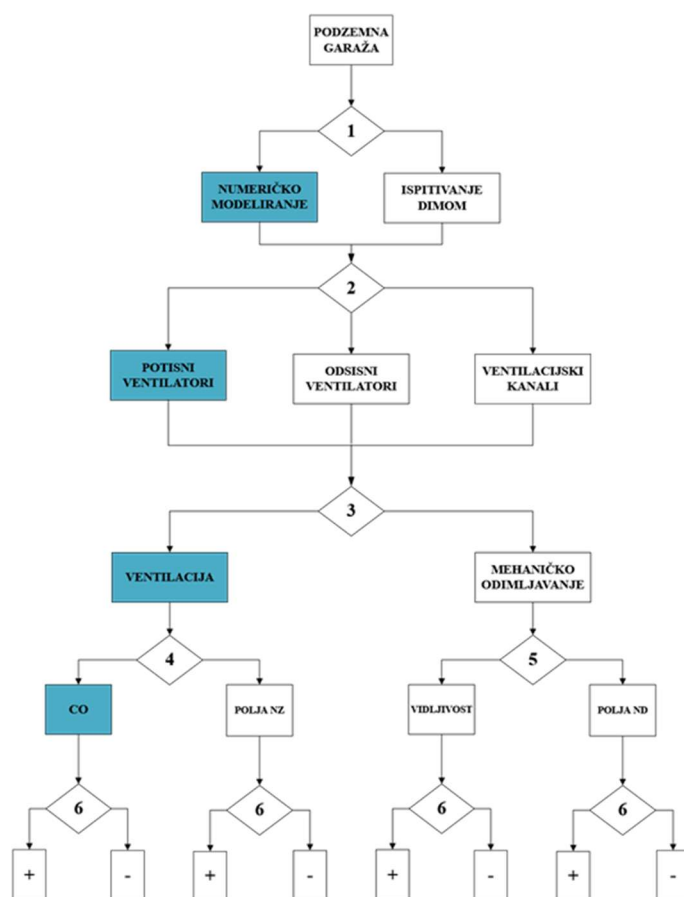
Slika 57. Položaj otvora za ubacivanje i izbacivanje zraka - podzemna garaža Colchester

U Tablici 15 prikazane su osnovne postavke numeričkog modeliranja.

Tablica 15. Postavke numeričkog modeliranja - podzemna garaža Colchester

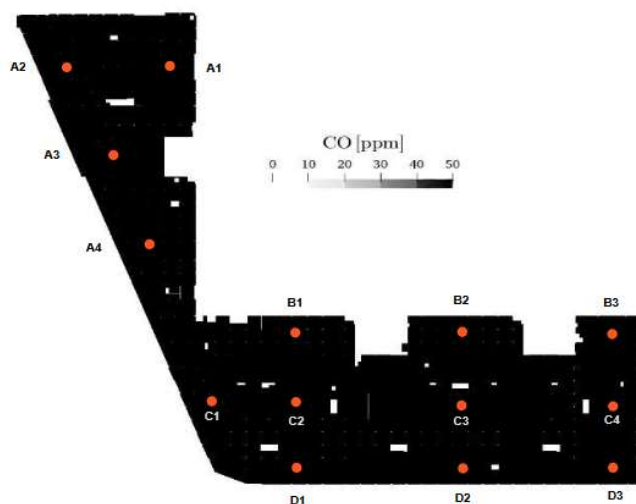
Programski paket	OpenFOAM
Prostorna diskretizacija	trodimenzijska
Vremenska shema simulacije	nestacionarna
Modeliranje dima	dim je modeliran kao pasivni skalar, predstavljen dodatnom koncentracijom CO ₂ . Transport pasivnog skalara odvijao se konvekcijom i difuzijom, pri čemu njegova koncentracija nije izravno utjecala na fizikalna svojstva fluida. Utjecaj požara na strujanje uzet je u obzir preko volumetrijskog izvora topline (zone požara) i posljedične promjene temperature i gustoće zraka. Zona požara ujedno je predstavljala izvor pasivnog skalara. Zraku koji je prošao kroz zonu požara dodijeljena je vrijednost pasivnog skalara od 100 % referentne vrijednosti, koja odgovara dodatnoj koncentraciji CO ₂ određenoj aproksimativnim analitičkim proračunom procesa izgaranja. Na taj je način omogućeno praćenje transporta i prostorne raspodjele dima bez modeliranja detaljne kemije izgaranja i utjecaja sastava produkata izgaranja na fizikalna svojstva fluida.
Modeliranje ventilatora	potisni ventilatori modelirani su kao zone u kojima fluid postiže zadanu brzinu i smjer strujanja
Jednadžba stanja	nestlačivi idealni plin
Fizikalna svojstva	fizikalna svojstva mješavine su određena kao funkcija lokalnih masenih udjela komponenti i lokalnog polja temperature
Model turbulencije	RNG k- ϵ sa standardnim zidnim funkcijama
Vrsta strujanja	viskozno, turbulentno
Kod strujanja praćenih prijenosom topline značajke fluida, osobito gustoća, ovise o temperaturi. Gradijent gustoće uzrokovan temperaturnim razlikama generira uzgonske sile koje induciraju prirodnu konvekciju. Model nestlačivog idealnog plina primjenjuje se u slučajevima kada su promjene tlaka tokom proračuna male i ne utječu značajno na stlačivost medija. U tom modelu gustoća se računa kao funkcija lokalne temperature, dok se referentni tlak smatra konstantnim.	

Na slici 58 prikazan je odabir parametara za analizu sustava ventilacije. Odabrano je numeričko modeliranje ventilacije sustavom s potisnim ventilatorima, a analizirani parametar je koncentracija ugljikova monoksida u pojedinim točkama podzemne garaže.



Slika 58. Prikaz metode–numeričko modeliranje - podzemna garaža Colchester

Na slici 59 prikazane su točke u kojima se prati koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu.

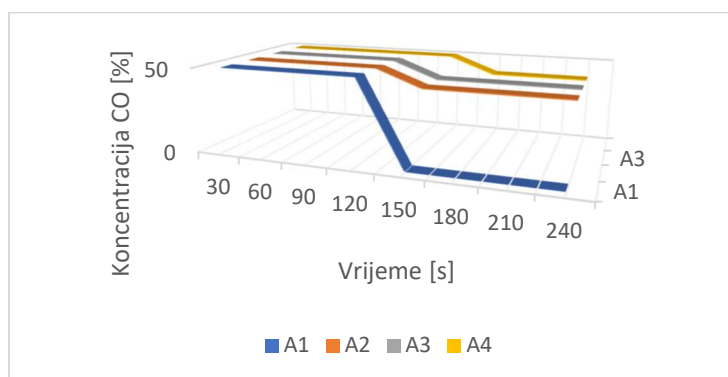


Slika 59. Prikaz analiziranih točaka - podzemna garaža Colchester

Rezultati ispitivanja uspješnosti sustava ventilacije prikazani su za vremensko razdoblje od 240 sekundi. To razdoblje predstavlja predviđeno vrijeme evakuacije korisnika podzemne garaže tokom kojeg korisnici mogu sigurno napustiti prostor bez opasnosti za zdravlje i život. Koncentracije ugljikova monoksida ovisno o vremenu prikazane su u tablici 16 i na slici 60 za točke A1, A2, A3 i A4; u tablici 17 i na slici 61 za točke B1, B2 i B3; u tablici 18 i na slici 62 za točke C1, C2, C3 i C4; te u tablici 19 i na slici 63 za točke D1, D2 i D3.

Tablica 16. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke A1, A2, A3 i A4

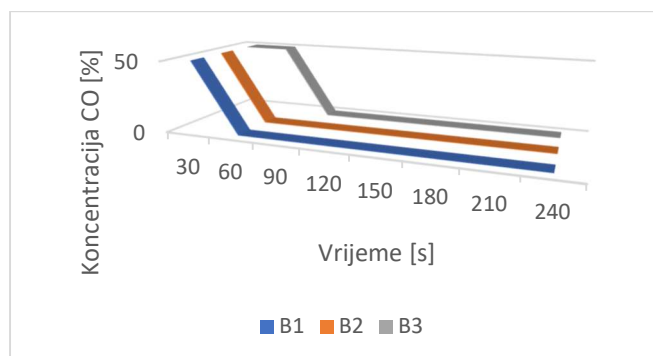
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s
A1	50	50	50	50	50	0	0	0	0
A2	50	50	50	50	40	40	40	40	40
A3	50	50	50	50	40	40	40	40	40
A4	50	50	50	50	50	40	40	40	40



Slika 60. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke A1, A2, A3 i A4

Tablica 17. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke B1, B2 i B3

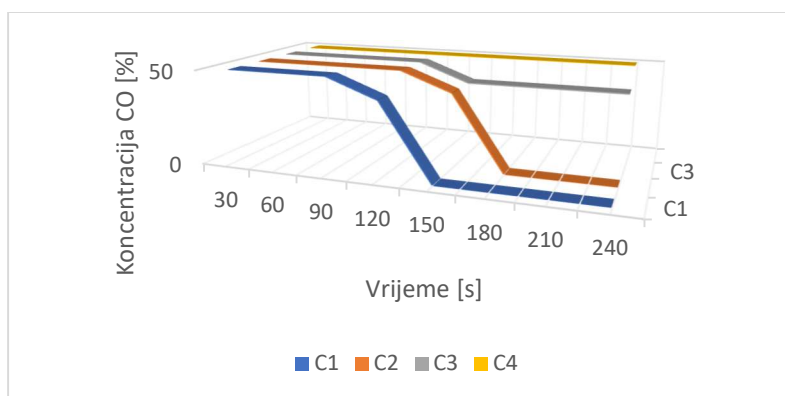
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s
B1	50	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	50	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	50	50	0	0	0	0	0	0	0



Slika 61. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke B1, B2 i B3

Tablica 18. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke C1, C2, C3 i C4

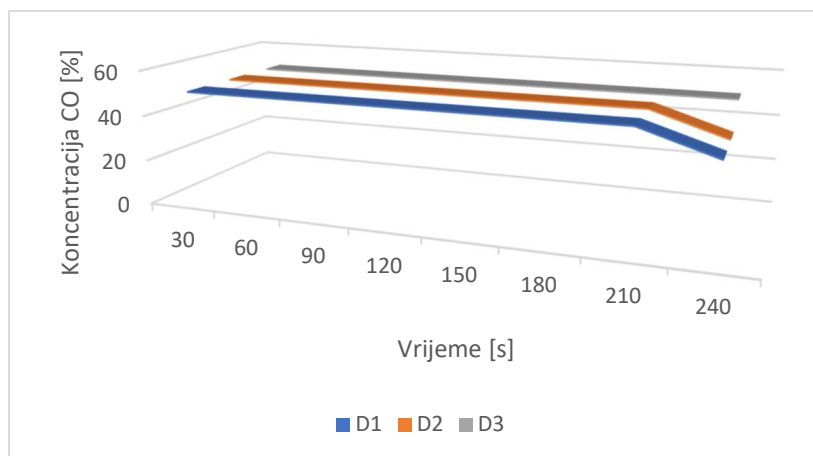
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s
C1	50	50	50	50	40	0	0	0	0
C2	50	50	50	50	50	40	0	0	0
C3	50	50	50	50	40	40	40	40	40
C4	50	50	50	50	50	40	40	40	40



Slika 62. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke C1, C2, C3 i C4

Tablica 19. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke D1, D2 i D3

	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s
D1	50	50	50	50	50	50	50	50	40
D2	50	50	50	50	50	50	50	50	40
D3	50	50	50	50	50	50	50	50	50



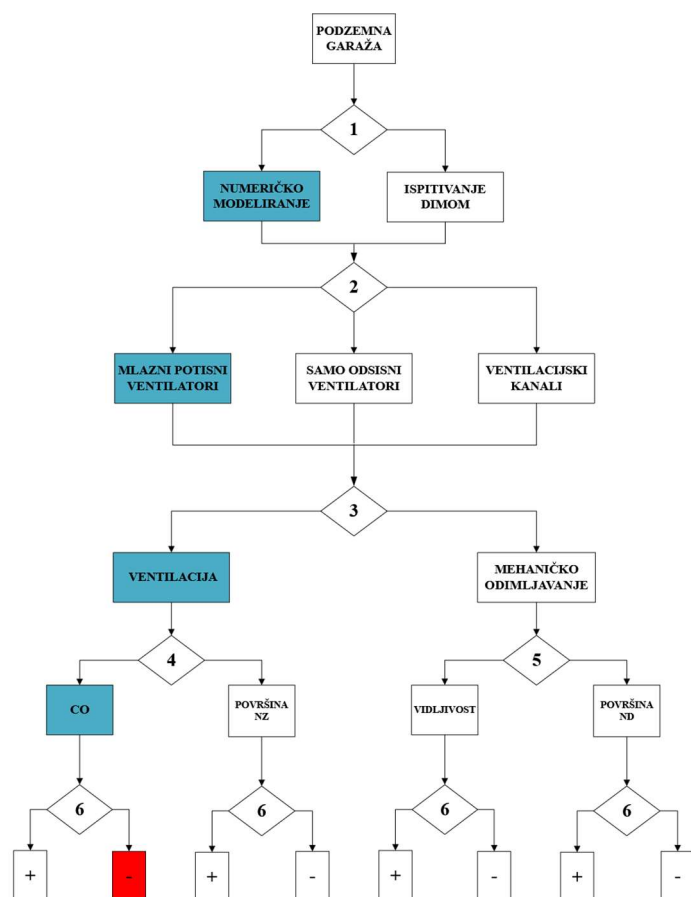
Slika 63. Koncentracija ugljikova monoksida ovisno o vremenu - točke D1, D2 i D3

Na slici 64 prikazano je numeričko ispitivanje uspješnosti sustava ventilacije potisnim ventilatorima u podzemnoj garaži u Colchesteru, Velika Britanija, u proširenom vremenskom razdoblju od 836 sekundi te pad koncentracije ugljikova monoksida s početne vrijednosti od 50 ppm.



Slika 64. Polja nepokretnog zraka i koncentracija CO - podzemna garaža Colchester

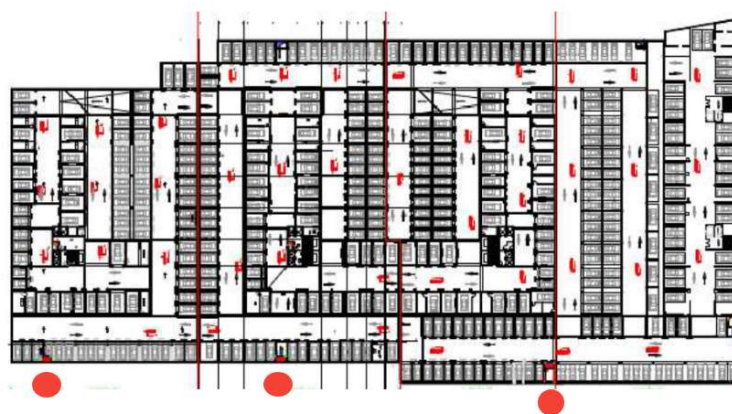
Ispitivanje uspješnosti sustava ventilacije pokazalo je da nakon tridesetak sekundi od uključenja sustava koncentracija ugljikova monoksida u blizini otvora za dobavu vanjskog zraka pada na nulu. Nakon približno 150 sekundi oko polovice površine podzemne garaže ima koncentraciju ugljikova monoksida 0 ppm, dok druga polovica i dalje zadržava početnu koncentraciju od 50 ppm. I nakon 300 sekundi koncentracija ugljikova monoksida u približno dvije trećine površine garaže iznosi 30 ppm ili više. Daljnjim radom sustava koncentracija ugljikova monoksida postupno opada, ali i nakon 836 sekundi na pojedinim mjestima ostaje oko 50 ppm. Ispitivanje je pokazalo da sustav ventilacije s potisnim ventilatorima bez odsisnih ventilatora nije učinkovit te ne može dovoljno smanjiti koncentraciju ugljikova monoksida niti uspješno ukloniti onečišćeni zrak iz prostora podzemne garaže. Rezultati ispitivanja potvrđuju neučinkovitost sustava, kako je prikazano na slici 65.



Slika 65. Prikaz uspješnosti sustava ventilacije - podzemna garaža Colchester

5.6. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka, Bosna i Hercegovina

Ulaz i izlaz vozila s analizirane razine predviđeni su pomoću dviju ulazno-izlaznih rampi. Svi strukturni elementi koji predstavljaju prepreku kretanju zraka, poput stupova, greda i unutarnjih zidova, uzeti su u obzir pri izradi numeričkog modela. Kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja iznosi šest izmjena zraka na sat, a za usmjeravanje dima prema odsisnim ventilatorima predviđena su 42 potisna ventilatora smještena 0,05 m ispod stropa. Na slici 66 prikazan je tlocrt podzemne garaže u Novoj Otoci s položajem potisnih i odsisnih ventilatora, označenih crvenom bojom.



Položaj odsisnih ventilatora

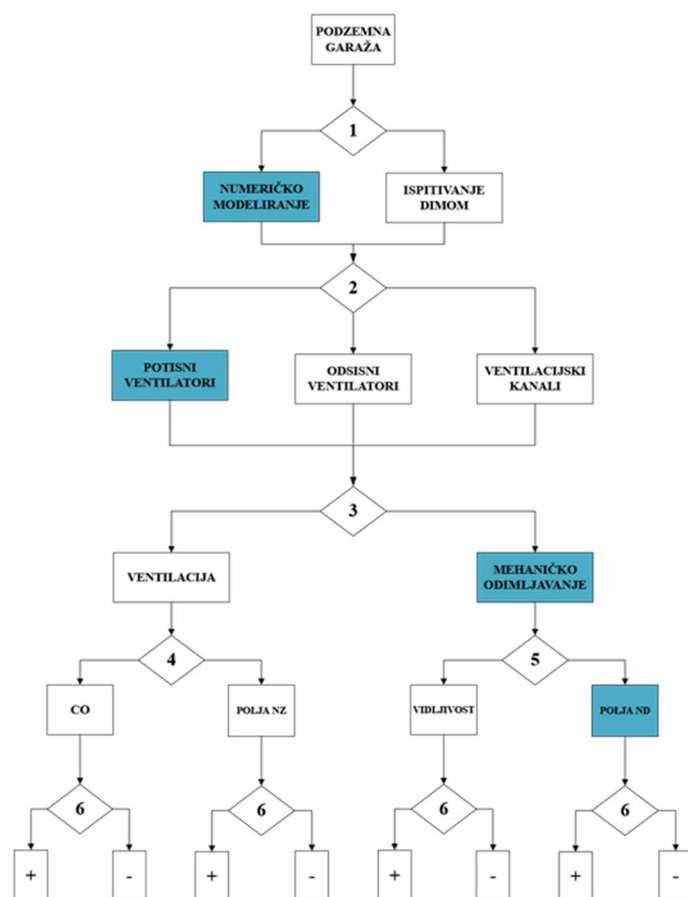
Slika 66. Tlocrt podzemne garaže s položajima odsisnih i potisnih ventilatora - podzemna garaža Nova Otoka

Dimenzije podzemne garaže Nova Otoka (visina, površina i volumen) prikazane su u tablici 20.

Tablica 20. Dimenzije razine - podzemna garaža Nova Otoka

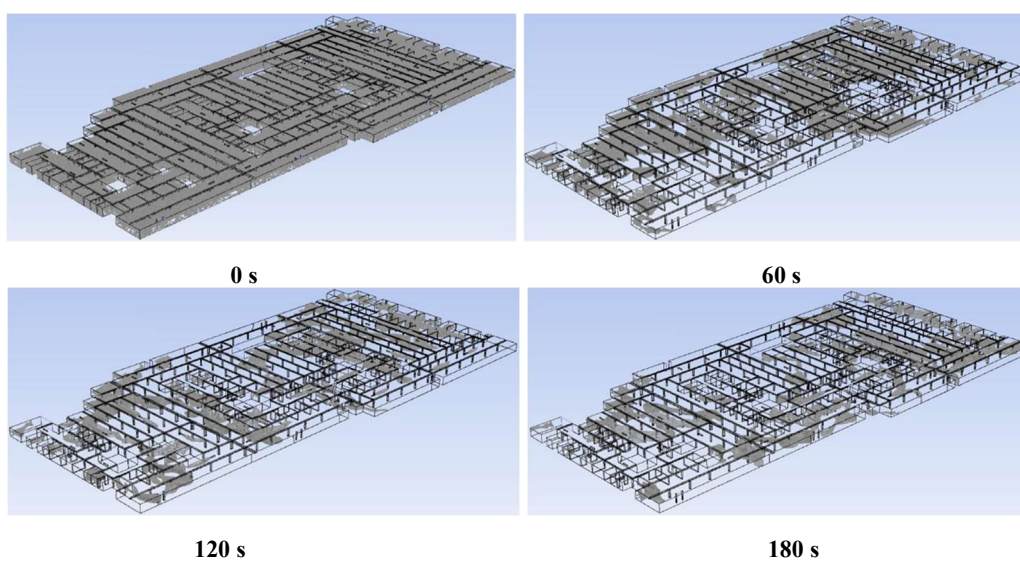
Redni broj		Vrijednost	Mjerna jedinica
3	Visina	3	m
4	Površina	12800	m ²
5	Volumen	38400	m ³

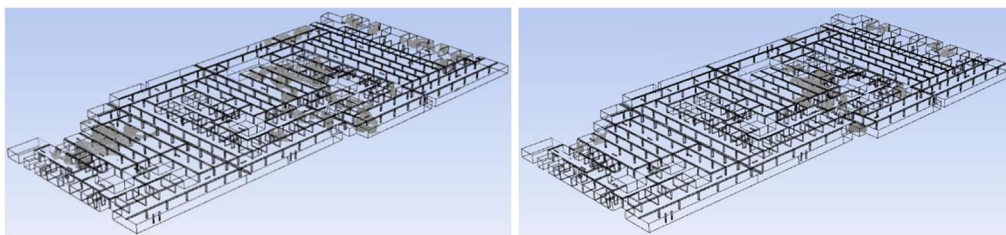
Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 67 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima u podzemnoj garaži Nova Otoka.



Slika 67. Prikaz metode - numeričko ispitivanje - podzemna garaža Nova Otoka

Na slici 68 prikazana je uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima numeričkim modeliranjem u razdoblju od 0 do 300 sekundi nakon uključenja sustava.



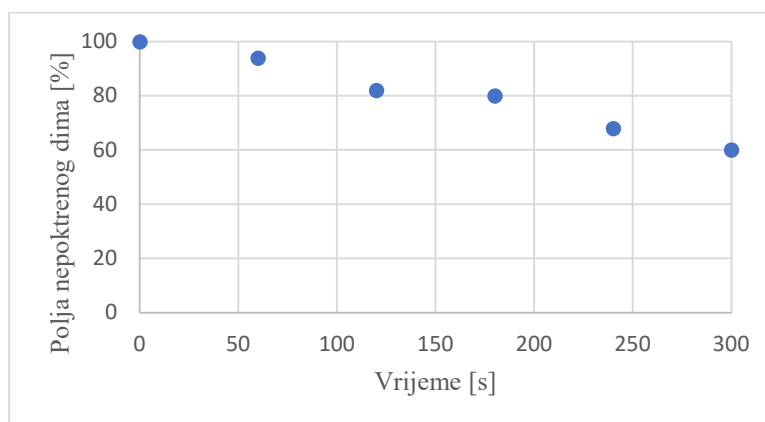


240 s 360 s
Slika 68. Površine nepokretnog dima - podzemna garaža Nova Otoka

Analiza sustava mehaničkog odimljavanja generičkom metodom pokazala je da površina zona nepokretnog zraka iznosi približno 2300 m², što odgovara do 19 % ukupne površine razine podzemne garaže. Uočeno je nekoliko većih, međusobno povezanih područja nepokretnog zraka, smještenih pretežno u zonama sa značajnim vertikalnim opstrukcijama, poput zidova i širokih greda. Nakon 300 sekundi rada sustava mehaničkog odimljavanja dim je u velikoj mjeri uklonjen iz prostora podzemne garaže. U tablici 21 i na slici 69 prikazane su površine zona nepokretnog zraka ovisno o vremenu.

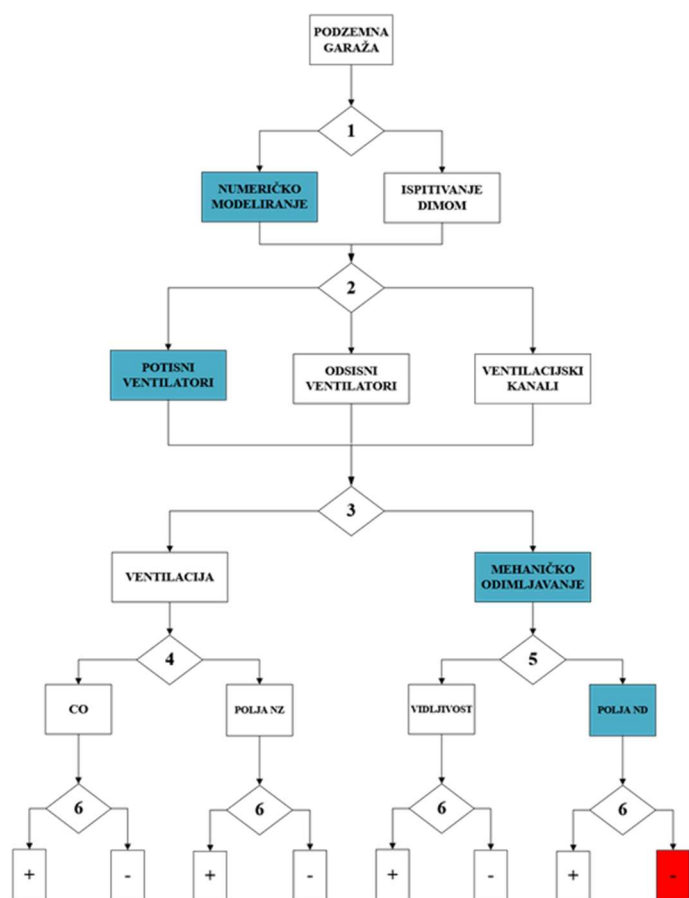
Tablica 21. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	Polja nepokretnog dima [m ²]
0	100	12800
60	94	4032
120	82	3444
180	68	2856
240	60	2520
300	19	2300



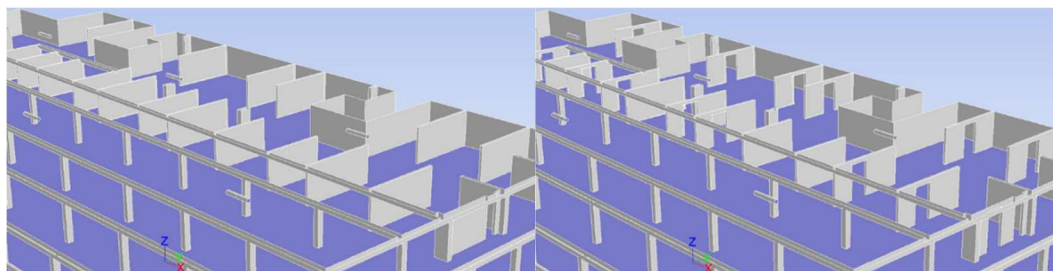
Slika 69. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka

Rezultati ispitivanja pokazali su da sustav mehaničkog odimljavanja nije učinkovit, kako je prikazano na slici 70.



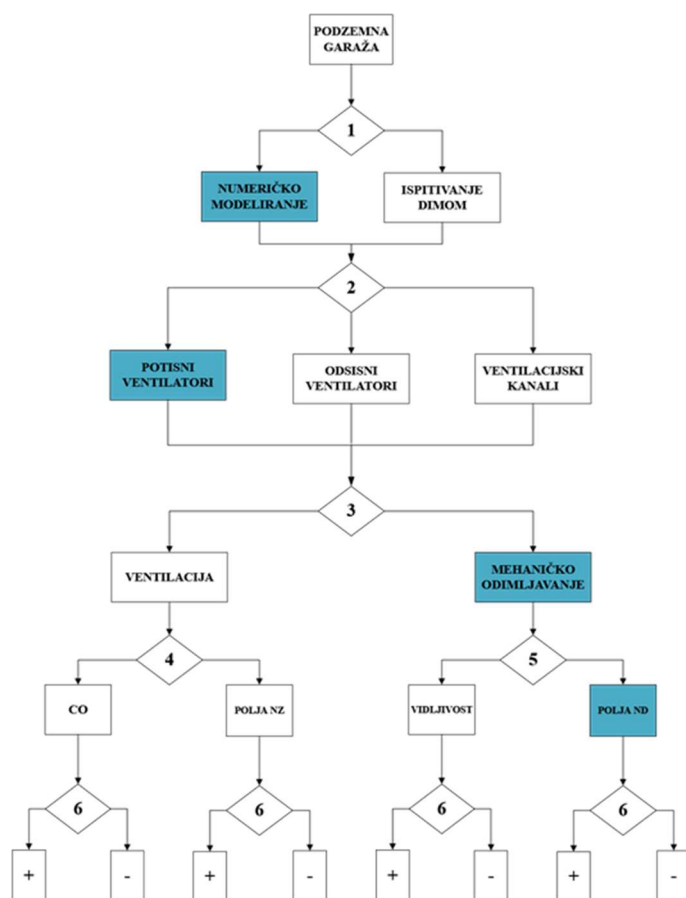
Slika 70. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Nova Otoka

Budući da su polja nepokretnog zraka velika, provedene su građevinske preinake u podzemnoj garaži otvaranjem prolaza u zidovima, kako je prikazano na slici 71. Sustav mehaničkog odimljavanja s navedenim preinakama analiziran je numeričkim modeliranjem. Na lijevoj strani slike prikazano je početno stanje, a na desnoj izvedene građevinske preinake.



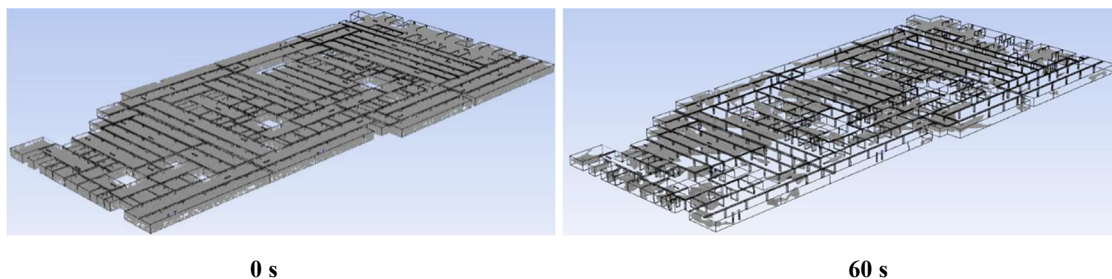
Slika 71. Preinake građevinskih elemenata - podzemna garaža Nova Otoka

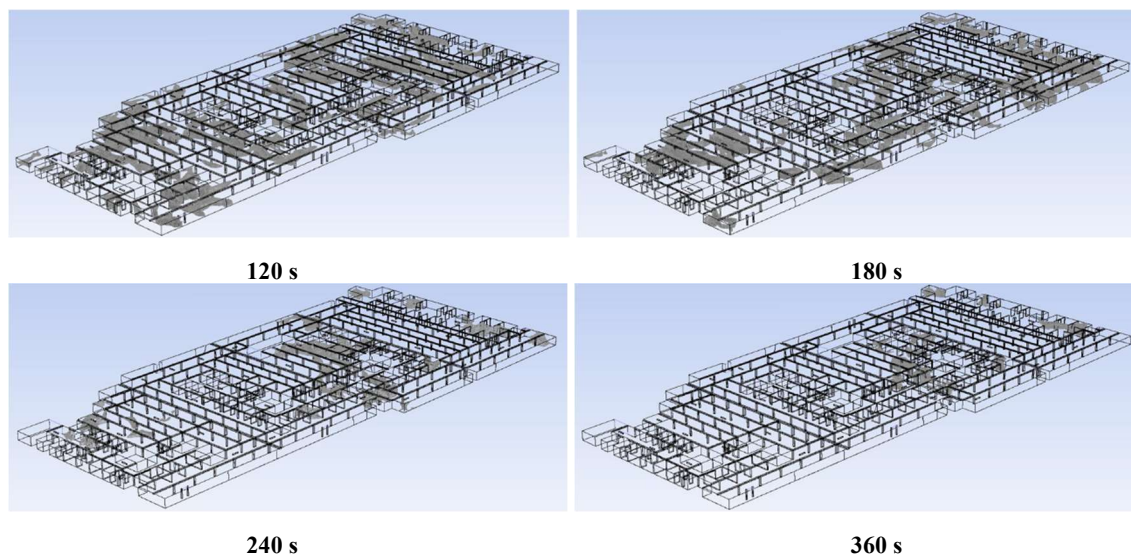
Na slici 72 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima u podzemnoj garaži Nova Otoka, uz građevinske preinake.



Slika 72. Prikaz metode s građevinskim preinakama –numeričko modeliranje - podzemna garaža Nova otoka

Na slici 73 prikazana je uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima numeričkim modeliranjem u razdoblju od 0 do 300 sekundi nakon uključenja sustava, uz građevinske preinake.



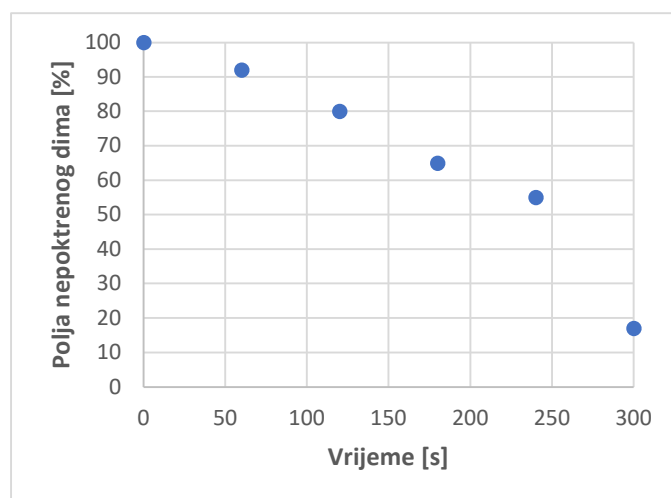


Slika 73. Povlja nepokretnog dima s građevinskim preinakama - podzemna garaža Nova Otoka

Nakon građevinskih preinaka polja nepokretnog zraka iznosi približno 2100 m², što odgovara oko 17 % ukupne površine razine podzemne garaže. Analiza generičkom metodom pokazala je smanjenje tih površina za približno 2 %, odnosno oko 200 m², otvaranjem prolaza u pregradnim zidovima. U tablici 22 i na slici 74 prikazana su polja nepokretnog zraka ovisno o vremenu.

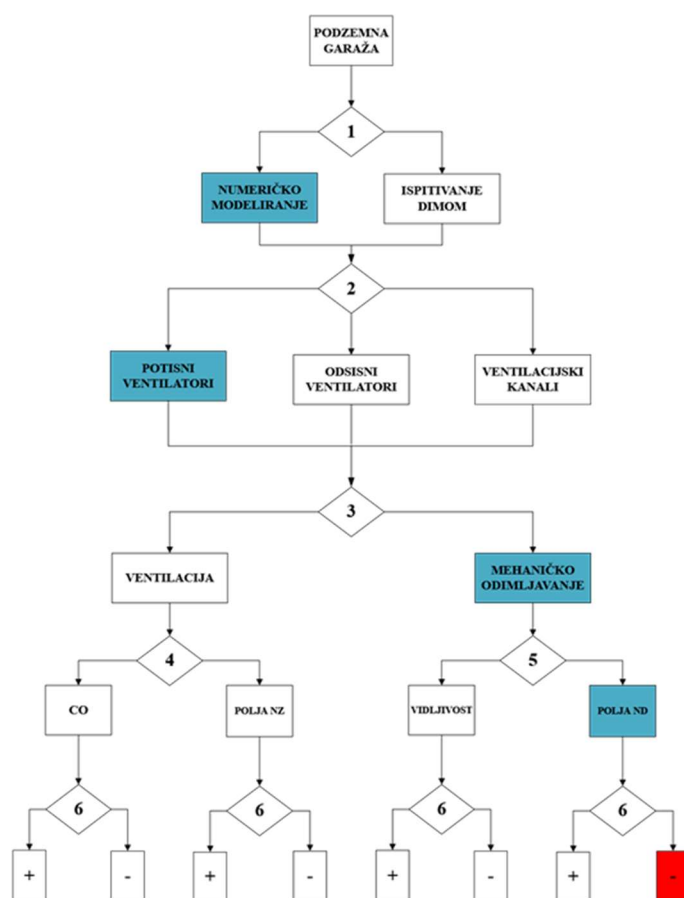
Tablica 22. Polja nepokretnog dima s građevinskim preinakama ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	Polja nepokretnog dima [m²]
0	100	12800
60	92	4032
120	80	3444
180	65	2856
240	58	2520
300	17	2176



Slika 74. Polja nepokrenog dima s građevinskim preinakama ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Nova Otoka

Rezultati ispitivanja pokazali su da sustav mehaničkog odimljavanja nije učinkovit ni uz građevinske preinake, kako je prikazano na slici 75.



Slika 75. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja s građevinskim preinakama - podzemna garaža Nova Otoka

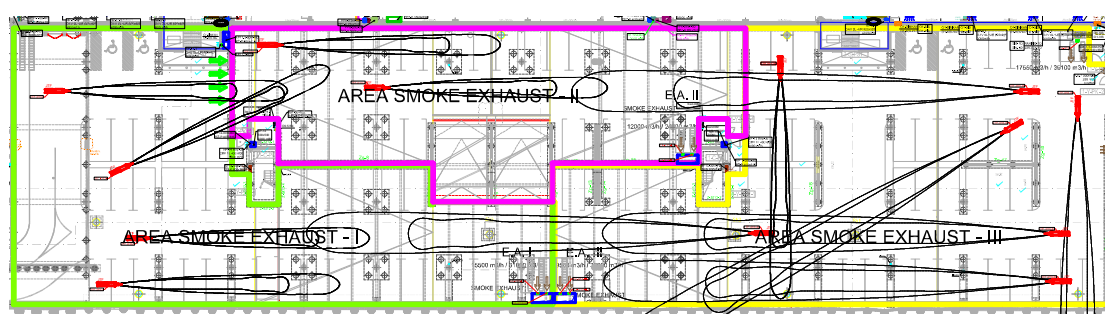
5.7. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza, Beograd, Srbija

Za potrebe parkiranja vozila trgovačkog centra Beograd Plaza u Beogradu predviđena je podzemna garaža na tri razine sa 461 parkirališnim mjestom. Ulaz i izlaz vozila iz podzemne garaže te kretanje između pojedinih razina izvedeni su ulazno-izlaznim i unutarnjim rampama. Strukturno opterećenje objekta garaže prenosi se na sustav potpornih stupova i zidova. Svi potporni zidovi neprekinuti su duž cijele visine razina podzemne garaže. Potporni stupovi i zidovi te svi ostali elementi koji doprinose vertikalnoj opstrukciji kretanja zraka uzeti su u obzir pri izradi matematičkog modela domene strujanja. U tablici 23 prikazane su dimenzije razine podzemne garaže.

Tablica 23. Dimenzije razine - podzemna garaža Beograd Plaza

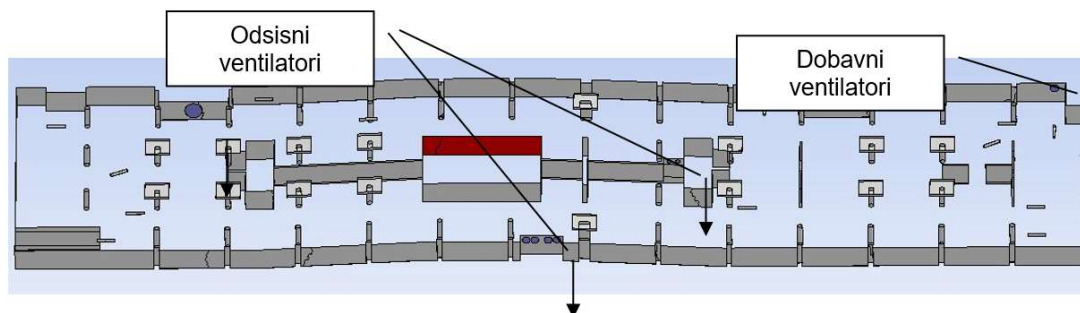
Redni broj		Vrijednost	Mjerna jedinica
1	Duljina	188,5	m
2	Širina	100	m
3	Visina	2,98	m
4	Površina	12141	m ²
5	Volumen	35735	m ³

Kapacitet sustava mehaničkog odimljavanja iznosi deset izmjena zraka na sat. Sustav se sastoji od šest odsisnih ventilatora, trinaest potisnih ventilatora te jednog ventilatora za dobavu zraka. Nadoknada zraka, uz navedeni dobavni ventilator, ostvaruje se preko ulazno-izlazne i unutarnje rampe te otvora na pročelju zgrade. Potisni ventilatori ugrađeni su na udaljenosti 0,05 m ispod stropa podzemne garaže. Tlačne strane ventilatora opremljene su deflektorima koji izlaznu struju zraka usmjeravaju pod kutom od 5° u odnosu na horizontalu. Volumen razine prizemlja u pogledu odimljavanja podijeljen je na tri dijela, kako je prikazano na slici 76.

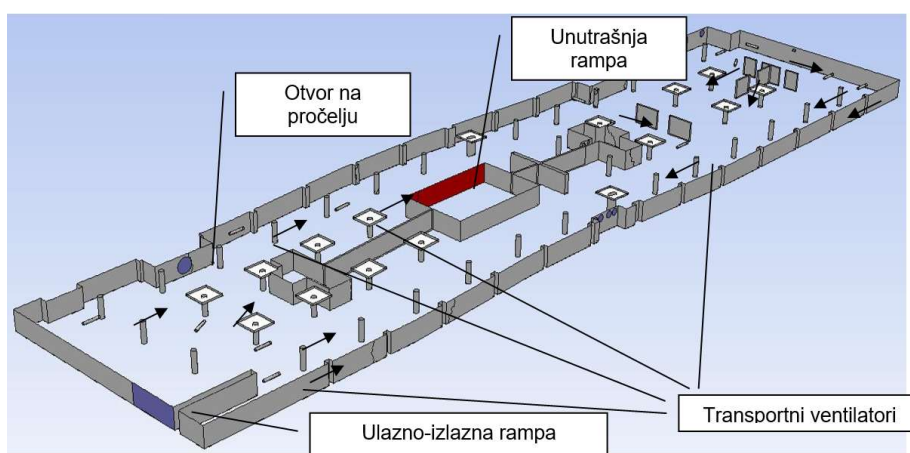


Slika 76. Tlocrt - podzemna garaža Beograd Plaza

Položaj dobavnog ventilatora i odsisnih ventilatora prikazani su na slici 77, a smjer djelovanja mlaznih potisnih ventilatora i položaj otvora za ulaz vanjskog zraka na slici 78.

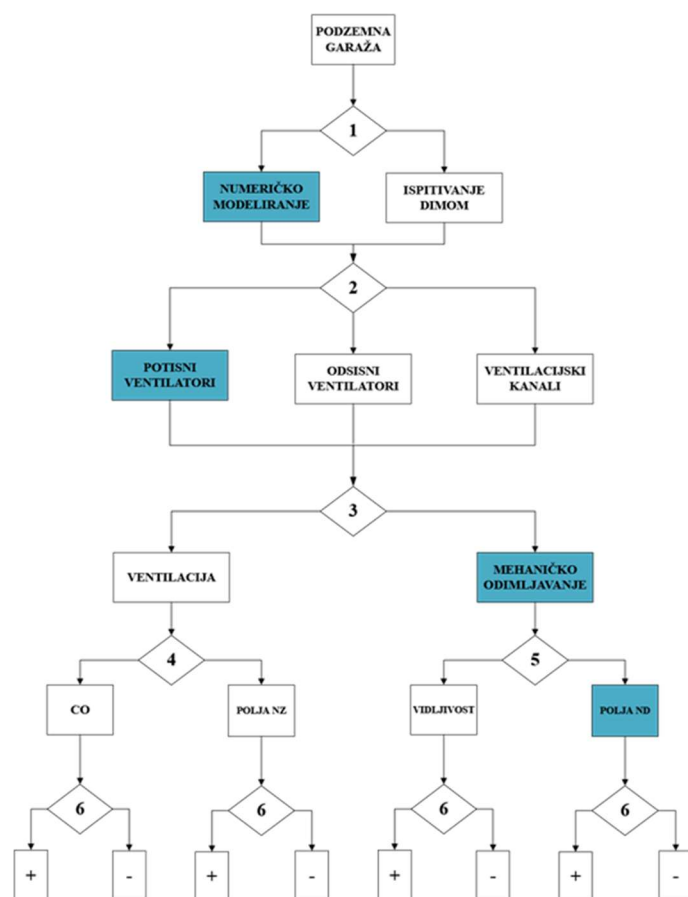


Slika 77. Položaj odsisnih ventilatora i ventilatora za dobavu vanjskog zraka - podzemna garaža Beograd Plaza



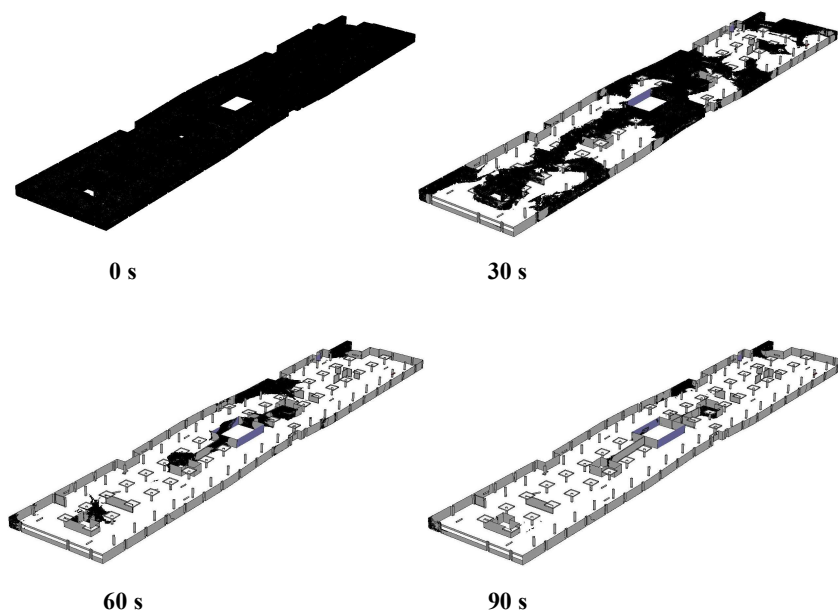
Slika 78. Položaj potisnih ventilatora i otvora za dobavu vanjskog zraka - podzemna garaža Beograd Plaza

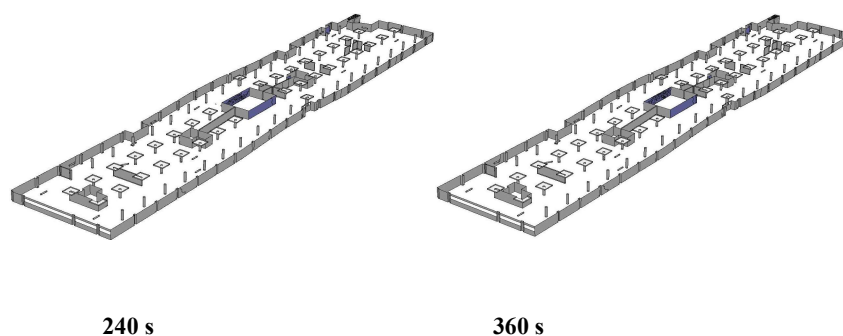
Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 79 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima u podzemnoj garaži Beograd Plaza.



Slika 79. Prikaz metode - numeričko modeliranje - podzemna garaža Beograd Plaza

Na slici 80 prikazana je uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima numeričkim modeliranjem u razdoblju od 0 do 360 sekundi nakon uključenja sustava.



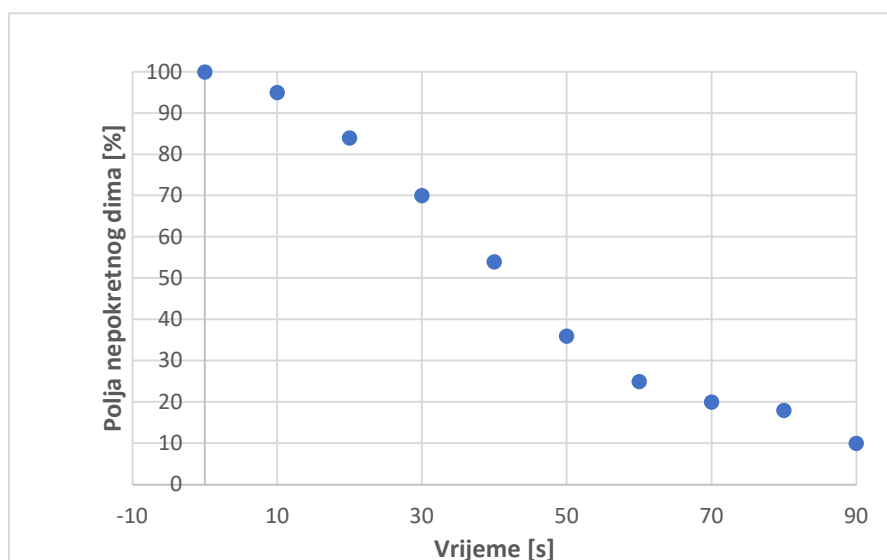


Slika 80. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Beograd Plaza

U tablici 24 i na slici 81 prikazane su polja nepokretnog dima ovisno o vremenu.

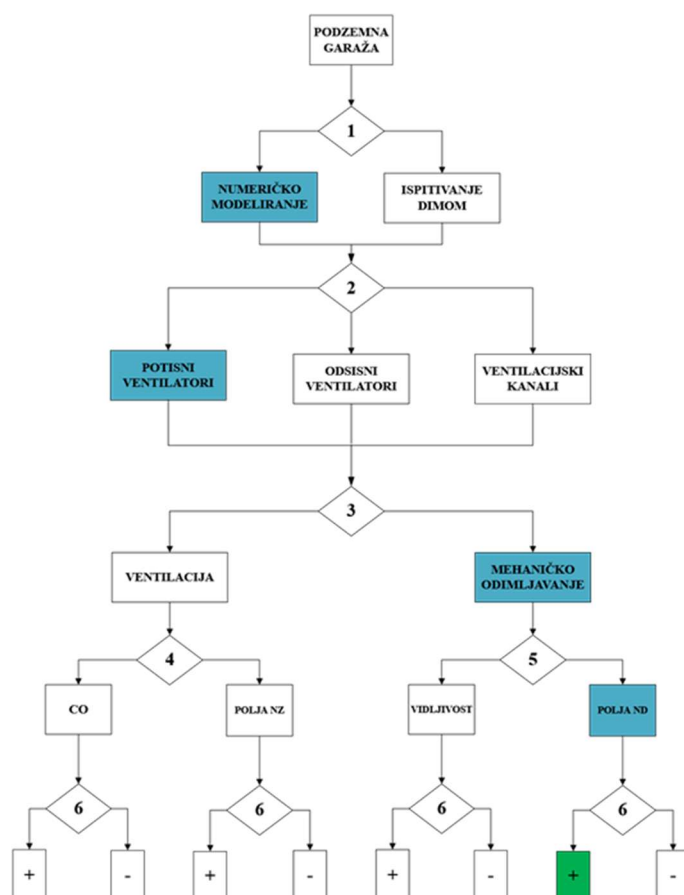
Tablica 24. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	Polja nepokretnog dima [m²]
0	100	12141
10	95	11533
20	84	10198
30	70	8498
40	54	6556
50	36	4370
60	25	3035
70	20	2428
80	15	1821
90	10	1214
100	<5	< 607
360	<5	< 607



Slika 81. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav s potisnim ventilatorima - podzemna garaža Beograd Plaza

Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja pokazalo je da polja nepokretnog dima iznosi približno 600 m², što predstavlja manje od 5 % ukupne površine razine podzemne garaže. Ta su područja lokalizirana i međusobno nepovezana, pri čemu se najveće nalazi u zavjetrini zida. Analiza sustava mehaničkog odimljavanja ukazuje na značajan pad količine dima u cijelom prostoru već tokom prve dvije minute. Nakon dvije i pol minute jedino područje u kojem koncentracija dimnih plinova ostaje jednaka početnoj nalazi se u neposrednoj blizini unutarnje rampe. To područje pokazuje karakteristiku sustava odimljavanja u tom dijelu volumena garaže jer ograničava širenje dima i zadržava ga u blizini izvora. Rezultati ispitivanja potvrđuju uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja, kako je prikazano na slici 82.



Slika 82. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Beograd Plaza

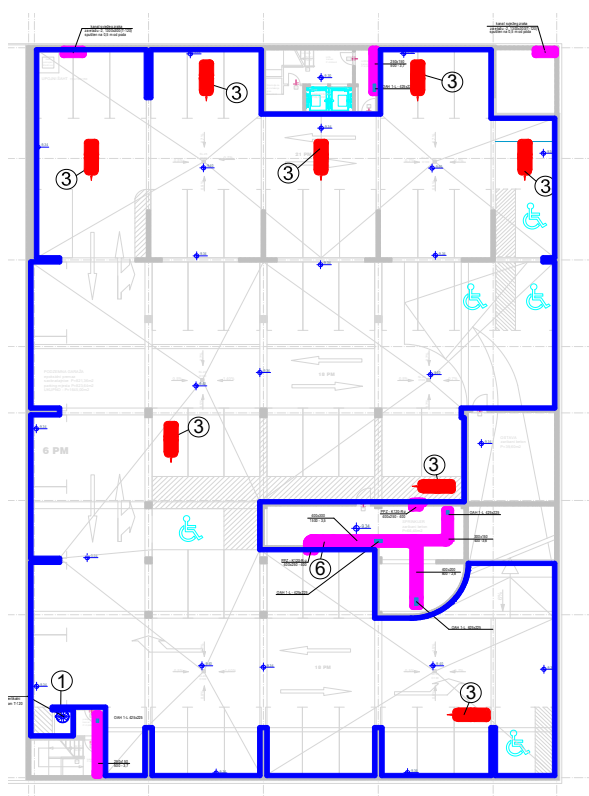
5.8. Ispitivanje sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Numeričko modeliranje generičkom metodom za određivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja podzemne garaže Moja Malta u Sarajevu provedeno je za drugu razinu podzemne garaže. Na toj razini nalazi se 62 parkirnih mjesta. Ulaz i izlaz vozila s analizirane razine predviđeni su jednom ulazno-izlaznom rampom, a svi strukturni elementi koji predstavljaju prepreku kretanju zraka, poput stupova, greda i unutarnjih zidova, uzeti su u obzir pri izradi numeričkog modela. U tablici 25 prikazane su dimenzije, visina, površina i volumen analizirane razine podzemne garaže.

Tablica 25. Dimenzije razine - podzemna garaža Moja Malta

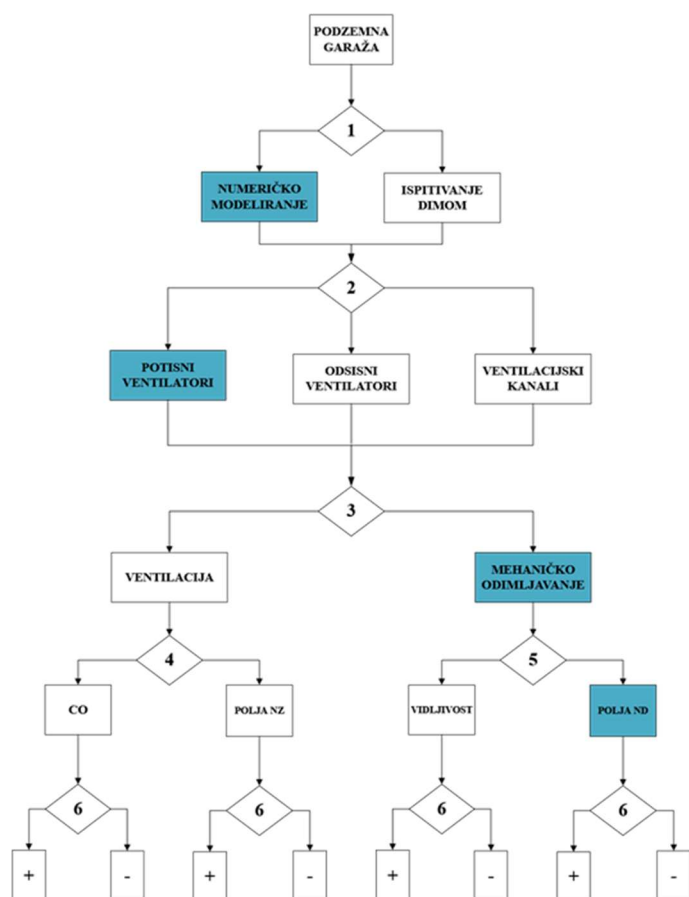
Redni broj		Vrijednost	Mjerna jedinica
1	Visina	2,90	m
2	Površina	1670	m ²
3	Volumen	4843	m ³

Sustav mehaničkog odimljavanja izveden je potisnim ventilatorima te se sastoji od jednog odsisnog ventilatora i osam potisnih ventilatora, pri čemu ostvaruje sedam izmjena zraka na sat. Potisni ventilatori ugrađeni su na udaljenosti 0,05 m ispod stropa etaže. Na tlačnoj strani ventilatora ugrađeni su deflektori koji izlaznu struju zraka usmjeravaju pod kutom od 5° prema dolje u odnosu na horizontalu. Na taj način izlazna struja zraka usmjerena je prema podu podzemne garaže. Smjer djelovanja potisnih ventilatora i njihov položaj, kao i položaj odsisnog ventilatora, prikazani su na slici 83.



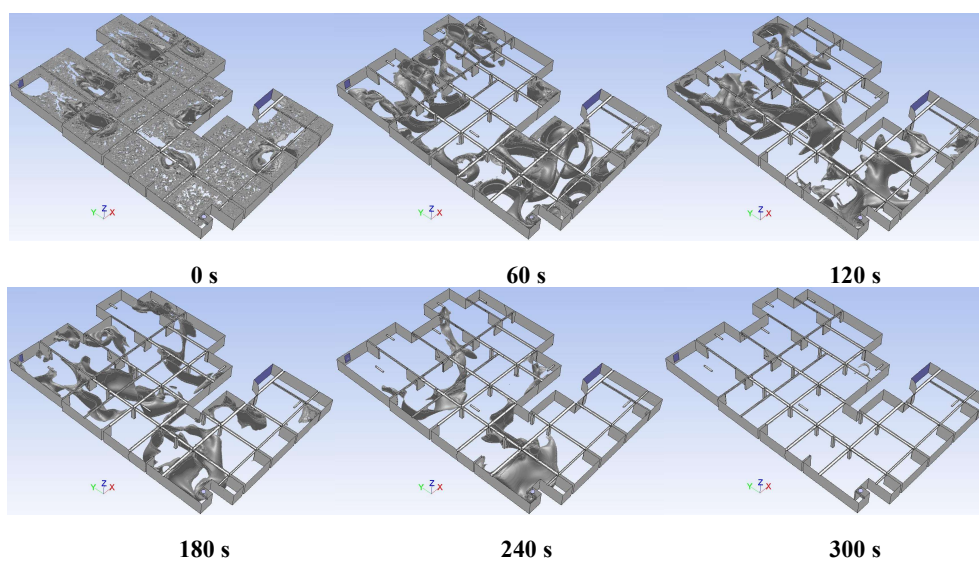
Slika 83. Prikaz položaja potisnih ventilatora - podzemna garaža Moja Malta

Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 84 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima u podzemnoj garaži Moja Malta.



Slika 84. Prikaz metode –numeričko modeliranje - podzemna garaža Moja Malta

Na slici 85 prikazana je uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima numeričkim modeliranjem u razdoblju od 300 sekundi nakon uključenja sustava.

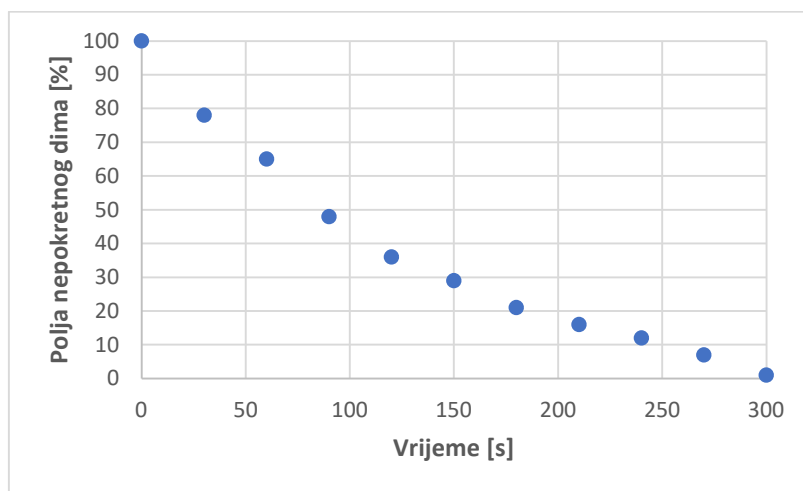


Slika 85. Polja nepokretnog dima - podzemna garaža Moja Malta

U tablici 26 i na slici 86 prikazana su polja nepokretnog dima u postocima i m² ovisno o vremenu.

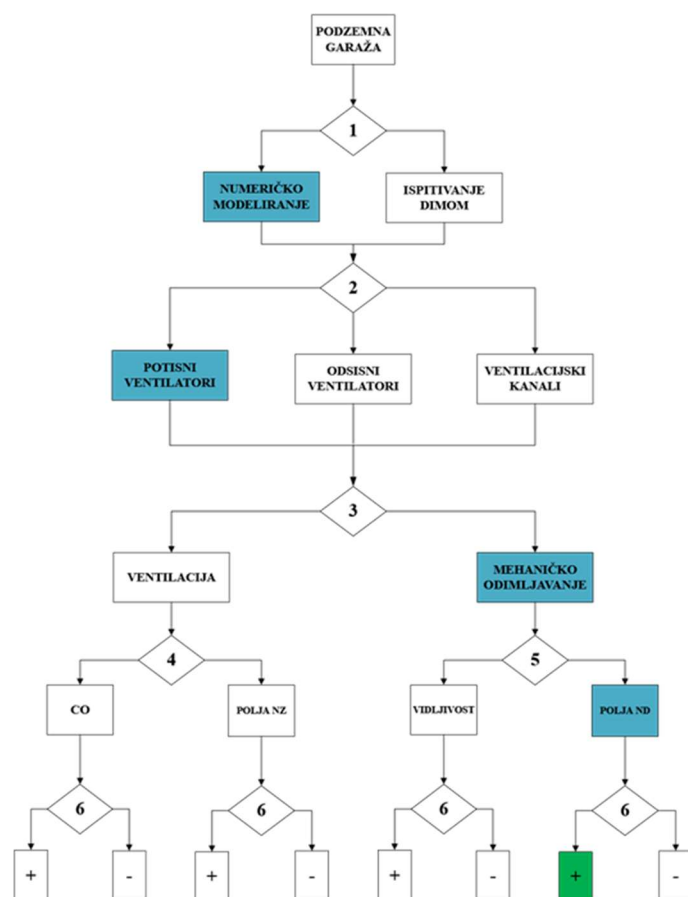
Tablica 26. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - sustav potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	Polja nepokretnog dima [m ²]
0	100	4200
30	78	3276
60	65	2730
90	48	2016
120	36	1512
150	29	1218
180	21	882
210	16	672
240	12	504
270	7	294
300	1	42



Slika 86. Polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu - sustav potisnim ventilatorima - podzemna garaža Moja Malta

Rezultati ispitivanja pokazali su da je sustav mehaničkog odimljavanja učinkovit, kako je prikazano na slici 87.



Slika 87. Prikaz uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja - podzemna garaža Moja Malta

Ispitivanje uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja pokazalo je da se nakon 300 sekundi rada sustava u cijelom volumenu podzemne garaže nalaze samo zanemarive količine dima. Zbog nepovoljne geometrijske konfiguracije garaže najveće količine dima najdulje se zadržavaju u uglu u kojem je smješten odsisni ventilator. Položaj odsisnog ventilatora izrazito je nepovoljan jer se nalazi u zatvorenom i izoliranom uglu koji je na stropu dodatno opstruiran gredom.

5.9. Usporedba sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima i ventilacijskim kanalima

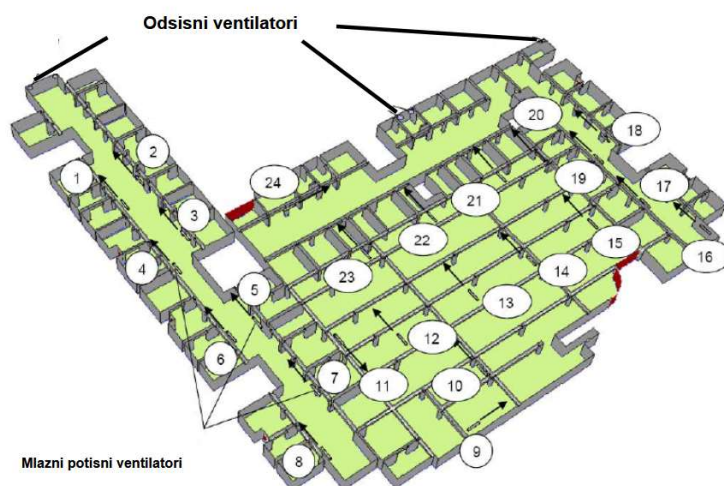
Na primjeru istovjetne garaže generičkom metodom provedena je usporedba uspješnosti odimljavanja sustava s vatrootpornim ventilacijskim kanalima i sustava s potisnim ventilatorima. Razmještaj potisnih ventilatora i vatrootpornih ventilacijskih kanala određen je u skladu s važećim propisima i pravilima struke. Razmještaj elemenata pojedinog sustava mogao je biti i drugačiji, što bi dovelo do određenih odstupanja u rezultatima. Cilj ispitivanja nije bio davanje prednosti pojedinom sustavu, već osiguravanje optimalnog rasporeda elemenata kako bi uspješnost svakog sustava bila što veća. Kapacitet sustava mehaničkog

odimljavanja u oba slučaja iznosi osam izmjena zraka na sat. U tablici 27 prikazane su dimenzije analizirane podzemne garaže.

Tablica 27. Dimenzije podzemne garaže

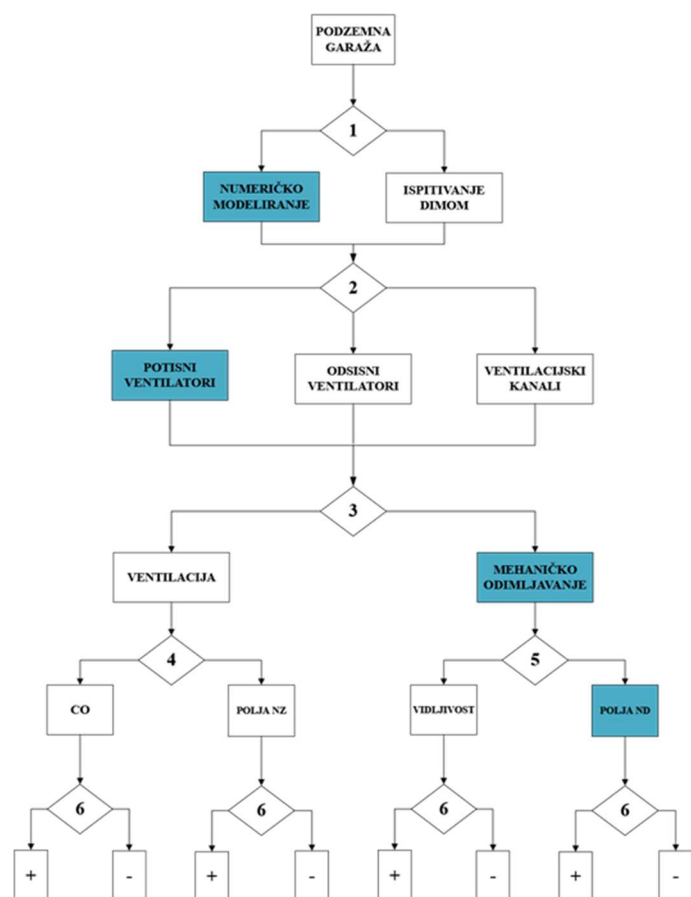
Redni broj	Vrijednost	Mjerna jedinica
1	Duljina	88
2	Širina	92
3	Visina	2,90
4	Površina	8096
5	Volumen	23478

Potisni ventilatori ugrađeni su na udaljenosti 0,05 m ispod stropa podzemne garaže. Tlačna strana ventilatora opremljena je deflektorom koji izlaznu struju zraka usmjerava pod kutom od 5° u odnosu na horizontalu. Smjer djelovanja potisnih ventilatora i položaj odsisnih ventilatora prikazani su na slici 88.



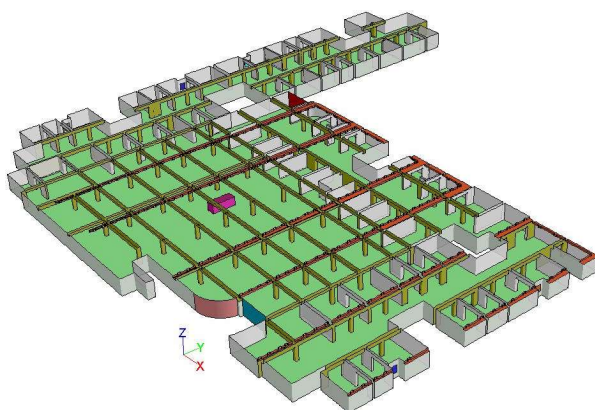
Slika 88. Prikaz smjera djelovanja potisnih ventilatora i položaja odsisnih ventilatora

Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 89 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima za usporedbu sa sustavom s ventilacijskim kanalima.



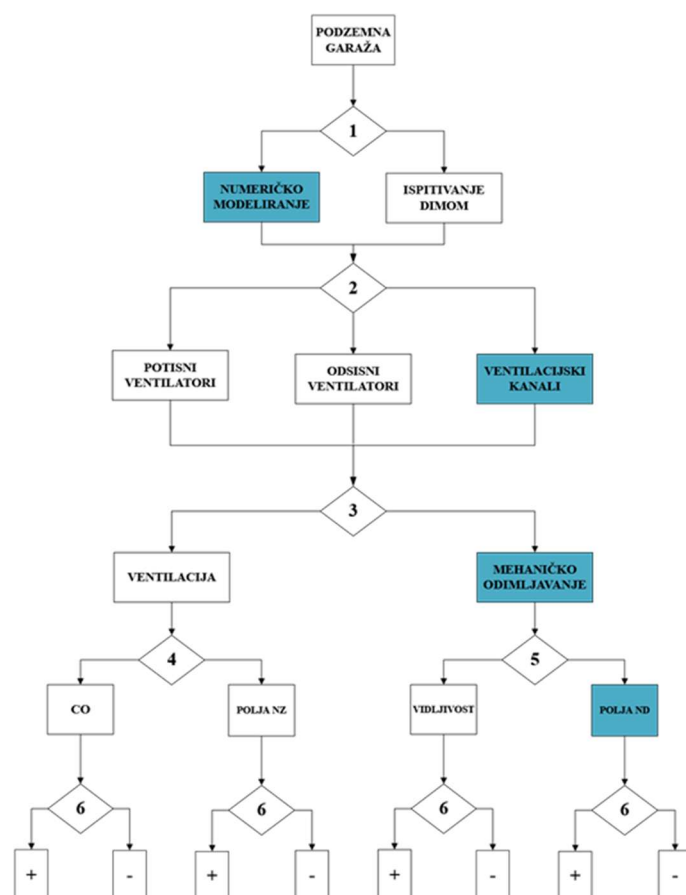
Slika 89. Prikaz metode - numeričko modeliranje sustav potisnim ventilatorima

Položaj ventilacijskih kanala u podzemnoj garaži prikazan je na slici 90.



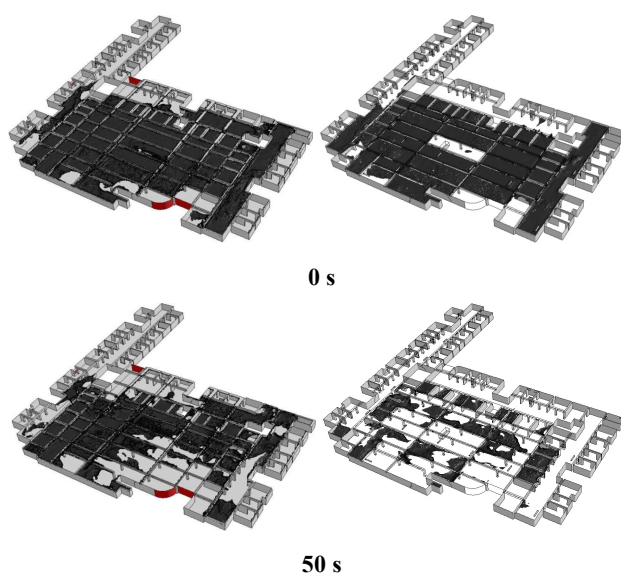
Slika 90. Položaj ventilacijskih kanala u podzemnoj garaži

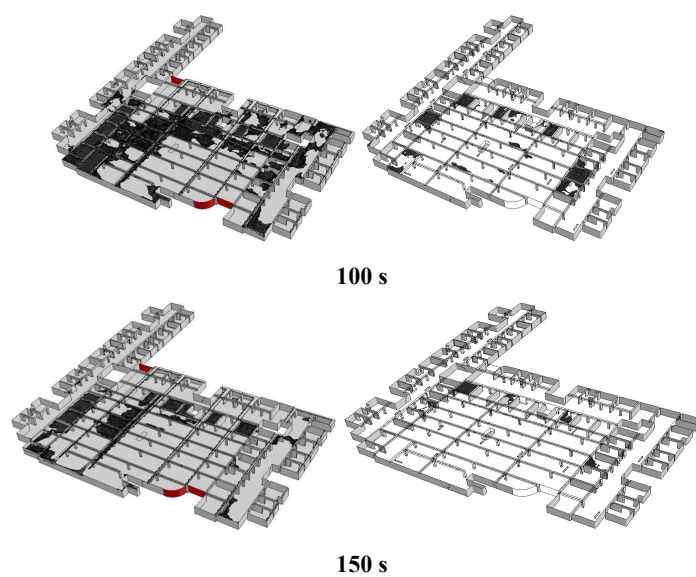
Osnovne postavke numeričkog modeliranja prikazane su u tablici 7. Na slici 91 prikazana je metoda numeričkog ispitivanja sustava mehaničkog odimljavanja ventilacijskim kanalima za usporedbu sa sustavom s potisnim ventilatorima.



Slika 91. Prikaz metode - numeričko modeliranje sustav ventilacijskim kanalima

Na slici 92 prikazana je usporedba sustava mehaničkog odimljavanja potisnim ventilatorima (desna strana) i ventilacijskim kanalima (lijeva strana) u razdoblju od 150 sekundi nakon uključenja oba sustava.



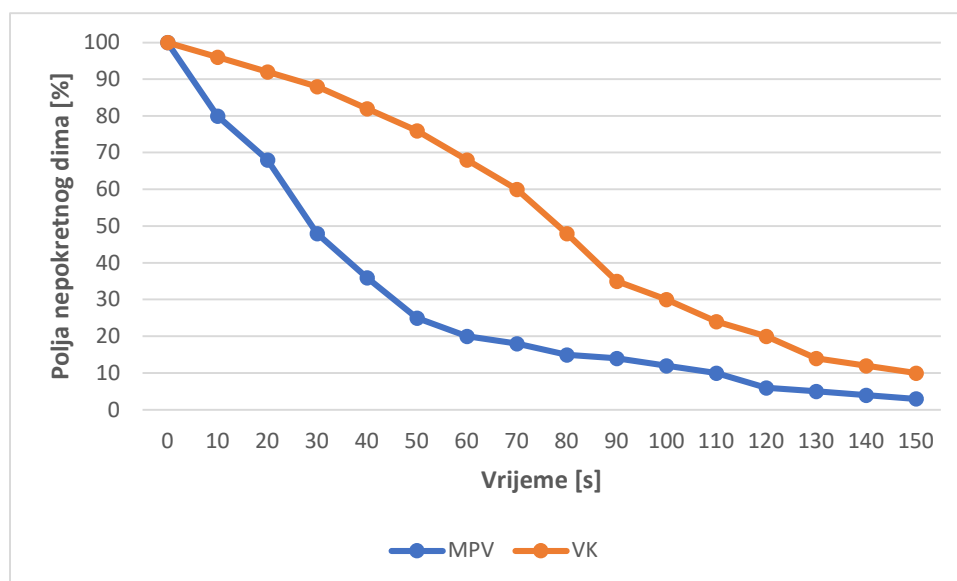


Slika 92. Polja nepokretnog dima

U tablici 28 i na slici 93 prikazane su polja nepokretnog dima ovisno o vremenu.

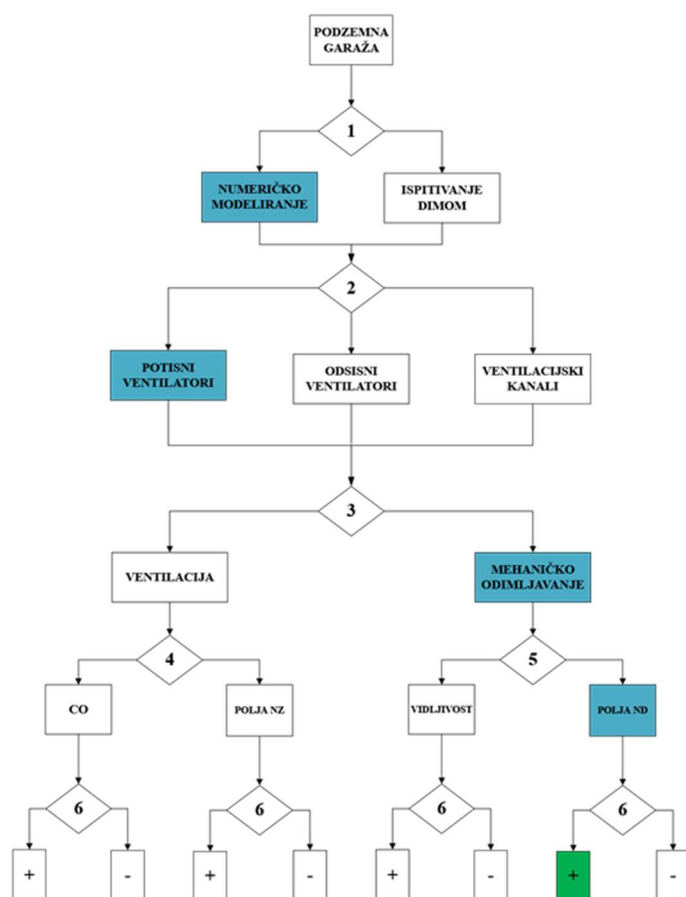
Tablica 28. Polja nepokretnog dima ovisno o vremenu - usporedba sustava mehaničkog odimljavanja

Vrijeme [s]	Polja nepokretnog dima [%]	
	Sustav potisnim ventilatorima	Sustav s ventilacijskim kanalima
0	100	100
10	80	96
20	68	92
30	48	88
40	36	82
50	25	76
60	20	68
70	18	60
80	15	48
90	14	35
100	12	30
110	10	24
120	6	20
130	5	14
140	4	12
150	3	9

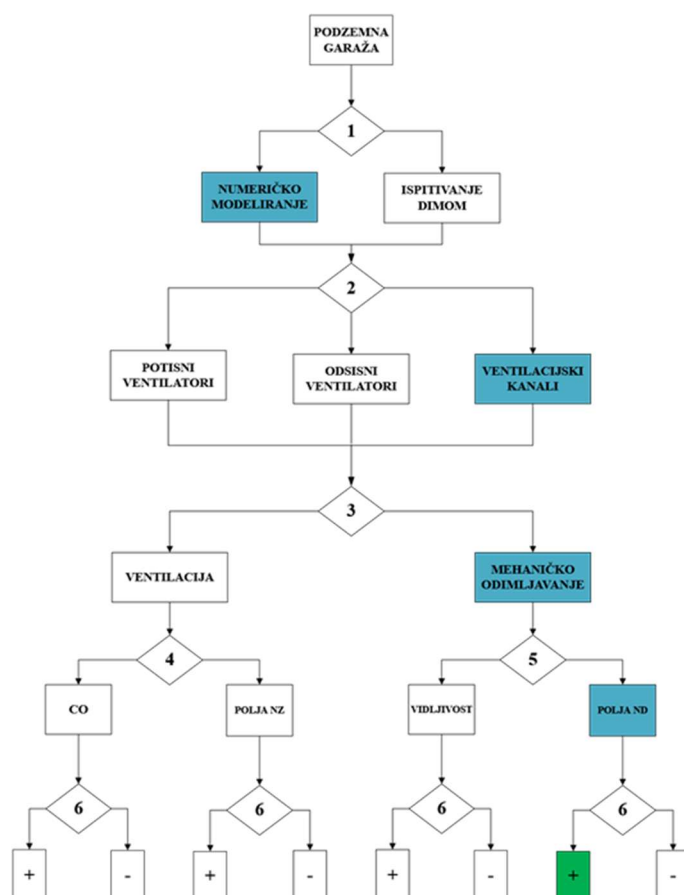


Slika 93. Polja nepokretnog dima u ovisnosti o vremenu usporedba sustava mehaničkog odimljavanja

Aktiviranjem oba sustava mehaničkog odimljavanja započinje proces odimljavanja. Već nakon dvadeset sekundi razvidno je da je sustav s potisnim ventilatorima učinkovitiji od sustava s vatrootpornim ventilacijskim kanalima. Sustav s potisnim ventilatorima gotovo je u cijelosti odveo dim razvijen požarom i prije kraja analiziranog vremenskog razdoblja, dok je sustavu s vatrootpornim ventilacijskim kanalima bilo potrebno više vremena za uklanjanje 90–95 % razvijenog dima iz podzemne garaže. Ipak, oba sustava u promatranom vremenu uspješno uklanjaju dim iz prostora garaže. Rezultati generičke metode pokazuju da sustav s potisnim ventilatorima brže uklanja dimne plinove razvijene požarom u odnosu na sustav s vatrootpornim ventilacijskim kanalima, osobito u početnoj fazi odimljavanja. Iako je sustav s potisnim ventilatorima učinkovitiji, razlika u ukupnoj brzini odimljavanja između analiziranih sustava nije velika. Rezultati ispitivanja potvrđuju da su oba sustava mehaničkog odimljavanja učinkovita, kako je prikazano na slikama 94 i 95.



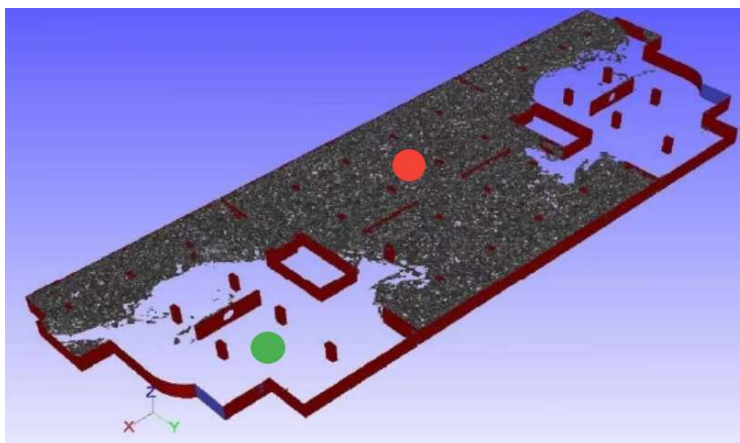
Slika 94. Prikaz usporedbe uspješnosti mehaničkog odimljavanja - potisni ventilatori



Slika 95. Prikaz usporedbe uspješnosti mehaničkog odimljavanja - ventilacijski kanali

5.10. Primjena generičke metode određivanja uspješnosti sustava mehaničkog odimljavanja kod evakuacije

Na primjeru podzemne garaže VIP u Zagrebu metoda je primijenjena za analizu položaja evakuacijskih znakova u prostoru garaže pri radu sustava ventilacije s odsisnim ventilatorima. Na slici 96 prikazani su rezultati ispitivanja uspješnosti sustava ventilacije iz poglavlja 5.4. Crvenom bojom označeno je područje u kojem znakovi za evakuaciju neće biti vidljivi tokom rada sustava, dok je zelenom bojom označeno područje u kojem znakovi ostaju vidljivi. Budući da je metodom dokazano da sustav ventilacije s odsisnim ventilatorima nije učinkovit, razvidno je da značajan broj evakuacijskih znakova postavljenih pod stropom neće biti vidljiv. Time se izravno ugrožava sigurnost korisnika jer evakuacijski izlazi neće biti jasno označeni.



Slika 96. Prikaz vidljivosti znakova za evakuaciju analizom rezultata ispitivanja

5.11. Trošak životnog ciklusa sustava

Za cjelovitu ekonomsku usporedbu sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja primjenjuje se metoda određivanja troška životnog ciklusa sustava (LCC, *engl. Life Cycle Cost*). Trošak životnog ciklusa sustava obuhvaća investicijske troškove te troškove korištenja i održavanja tijekom promatranog razdoblja. Trošak životnog ciklusa određuje se primjenom metode neto sadašnje vrijednosti (NPV) troškova te se može izraziti jednadžbom za sadašnju vrijednost novčanih tokova, u skladu s načelima norme ISO 15686-5:2023 Građevine - Planiranje uporabnog vijeka - 5. dio: Trošak životnog ciklusa:

$$LCC = C_{inv} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{kor,t} + C_{odr,t}}{(1+r)^t} \quad (21)$$

gdje je

LCC trošak životnog ciklusa sustava [euro]

C_{inv} investicijski trošak [euro]

$C_{kor,t}$ trošak korištenja u godini t [euro]

$C_{odr,t}$ trošak održavanja u godini t [euro]

r diskontna stopa

n promatrano razdoblje

Investicijski troškovi obuhvaćaju dobavu elemenata sustava (ventilatora i ventilacijskih kanala), njihovu ugradnju te troškove priključenja sustava na elektroenergetsku mrežu. Troškovi korištenja obuhvaćaju potrošnju električne energije sustava te trošak angažirane snage

(kW) sustava ventilacije. Troškovi održavanja obuhvaćaju periodično održavanje elemenata sustava, popravak te zamjenu oštećenih ili neispravnih elemenata sustava, kao i, prema potrebi, nabavu novih. Svi troškovi prikazani su u tablici 29.

Tablica 29. Prikaz troškova sustava

Sustav ventilacije i mehaničkog odimljavanja			
	Odsisni ventilatori	Potisni ventilatori	Ventilacijski kanali
Investicijski troškovi	Niski dobava i ugradnja manjeg broja ventilatora	Visoki dobava i ugradnja većeg broja ventilatora	Visoki dobava i ugradnja ventilatora i ventilacijskih kanala
Troškovi korištenja	Niski ugrađen manji broj ventilatora	Visoki ugrađen veći broj ventilatora	Srednji ugrađen manji broj ventilatora
Troškovi održavanja	Niski ugrađen manji broj ventilatora	Visoki ugrađen veći broj ventilatora	Srednji ugrađen manji broj ventilatora, uz potrebu čišćenja ventilacijskih kanala

Kvantitativna analiza troška životnog ciklusa nije predmet ovog rada, stoga se ekonomska usporedba sustava u ovom poglavlju provodi na kvalitativnoj razini. Ako je metodom određivanja uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja dokazano da su svi analizirani sustavi učinkoviti, na temelju kvalitativne analize investicijskih troškova te troškova korištenja i održavanja može se zaključiti da sustav s odsisnim ventilatorima predstavlja povoljnije rješenje u odnosu na ostale analizirane sustave, budući da zahtijeva najmanji broj ventilatora. Sustav s potisnim ventilatorima zahtijeva najveći broj ugrađenih ventilatora, zbog čega su i troškovi najveći. Sustav s ventilacijskim kanalima zahtijeva manji broj ventilatora, ali su investicijski troškovi ventilacijskih kanala visoki. Međutim, zbog manjeg broja ugrađenih ventilatora, troškovi korištenja i održavanja manji su nego kod sustava s potisnim ventilatorima, iako su veći nego kod sustava s odsisnim ventilatorima.

6. ANALIZA I RASPRAVA REZULTATA

1. Uspješnost sustava ventilacije

Analiza studija slučaja pokazuje da uspješnost ventilacije izravno ovisi o odabranom konceptu sustava. Na primjeru iste podzemne garaže VIP u Zagrebu analizirana su dva različita sustava ventilacije. Sustav koji koristi potisne ventilatore u kombinaciji s odsisnim ventilatorima omogućio je strujanje zraka kroz gotovo cijeli volumen garaže, pri čemu su zone nepokretnog zraka bile lokalizirane i obuhvaćale približno 2 % ukupne površine. Takav rezultat ukazuje na učinkovitu izmjenu zraka i uklanjanje onečišćenja iz prostora garaže. Suprotno tome, sustav izveden samo odsisnim ventilatorima u istoj garaži pokazao je velika područja nepokretnog zraka. Više od polovice površine ostalo je bez učinkovite izmjene zraka i nakon više minuta rada sustava. Rezultati jasno pokazuju da sustav koji se oslanja isključivo na odsisne ventilatore ne može učinkovito izbaciti onečišćeni zrak iz cijelog volumena podzemne garaže. Posebno je značajan primjer garaže u Colchesteru, gdje sustav s potisnim ventilatorima bez odsisnih ventilatora koji služe za izbacivanje onečišćenog zraka iz garaže nije uspio smanjiti koncentraciju ugljikova monoksida ni nakon produljenog rada. Rezultati pokazuju da lokalno miješanje zraka ne znači i učinkovito uklanjanje zagađenja. Sustav može uzrokovati kretanje zraka unutar prostora, ali bez stvarnog izbacivanja onečišćenog zraka dolazi do njegove recirkulacije. U takvim uvjetima opasne koncentracije plinova mogu ostati prisutne u pojedinim dijelovima garaže.

Ovi rezultati potvrđuju da učinkovit sustav ventilacije mora osigurati:

- kontinuirano izbacivanje onečišćenog zraka iz garaže
- kontrolirano usmjeravanje strujanja zraka
- djelovanje u cijelom volumenu prostora

2. Uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja

Rezultati analize sustava mehaničkog odimljavanja pokazuju da sama ugradnja ventilatora nije dovoljna za postizanje učinkovitog odvođenja dima. Presudni čimbenici su oblik prostora, raspored ventilatora i prisutnost arhitektonskih prepreka. U garažama Stožice i Beograd Plaza sustavi su pokazali visoku uspješnost, a zadržavanje dima bilo je ograničeno na manja, međusobno odvojena područja. . Takva raspodjela omogućuje kontinuirano odvođenje dima prema odsisnim točkama, što je ključno za sigurnost vatrogasaca i uvjete evakuacije.

Suprotno tome, primjer garaže Nova Otoka pokazuje da nepovoljan oblik prostora može značajno smanjiti uspješnost sustava čak i kada je kapacitet ventilatora dovoljan. Velike povezane zone nepokretnog dima ukazuju na otežano odvođenje dima iz pojedinih dijelova

prostora. Građevinske preinake djelomično su smanjile taj učinak, ali ga nisu uklonile, što potvrđuje da se uspješnost sustava mora promatrati zajedno s prostornim rješenjem garaže. Iz toga proizlazi važan zaključak kako uspješnost sustava mehaničkog odimljavanja ne ovisi samo o kapacitetu ventilatora, već o međusobnom odnosu ventilacijskog sustava i prostora garaže.

3. Validacija metode i usporedba s tradicionalnim pristupima

Jedan od ključnih doprinosa istraživanja jest pokazivanje da tradicionalni pristupi mogu dovesti do pogrešne procjene uspješnosti sustava. Ako se požar analizira na povoljno odabranom položaju, sustav može djelovati učinkovit iako u stvarnim uvjetima u pojedinim dijelovima garaže ne osigurava dovoljno kretanje zraka. Razvijena generička metoda uklanja to ograničenje jer promatra stanje u kojem je cijeli volumen prostora ispunjen dimom. Sustav se na taj način provjerava u najnepovoljnijim uvjetima rada, što predstavlja sigurnosno opravdan pristup procjeni uspješnosti. Usporedba numeričkog modeliranja i ispitivanja hladnim dimom dodatno potvrđuje primjenjivost metode. Iako hladni dim ne prikazuje u potpunosti toplinska svojstva vrućih dimnih plinova, obrasci kretanja dima i područja slabog strujanja pokazuju dobro podudaranje rezultata.

4. Utjecaj na evakuaciju i sigurnost korisnika

Rezultati istraživanja imaju izravno značenje za sigurnost korisnika podzemnih garaža. Učinkovit sustav ventilacije ne određuje samo kvalitetu zraka i sposobnost uklanjanja dima, nego utječe i na:

- vidljivost evakuacijskih znakova
- prohodnost evakuacijskih puteva
- orijentaciju korisnika u prostoru
- uvjete za djelovanje vatrogasnih postrojbi

Analiza položaja evakuacijskih znakova pokazala je da raspored postojećih znakova često nije prilagođen stvarnim uvjetima širenja dima. Znakovi postavljeni preblizu stropu ulaze u dimni sloj i postaju nevidljivi upravo u trenutku kada su najpotrebniji. Sustav ventilacije time je izravno povezan s rasporedom signalizacije i strategijom evakuacije, a ta povezanost u dosadašnjoj praksi često nije bila sustavno razmatrana.

5. Ograničenja istraživanja

Razvijena metoda, kao i svako modeliranje složenih fizikalnih procesa, ima određena ograničenja. Ispitivanja hladnim dimom ne mogu u potpunosti prikazati toplinsku stratifikaciju i ponašanje vrućih dimnih plinova u stvarnom požaru. Numeričko modeliranje ovisi o pravilnom definiranju početnih i rubnih uvjeta, pa kvaliteta rezultata izravno ovisi o točnosti

postavljenog modela. Također nije moguće obuhvatiti sve moguće požarne scenarije koji se mogu pojaviti u podzemnim garažama, a utjecaj dodatnih sustava zaštite od požara, poput sprinkler instalacija, u ovom je radu prikazan pojednostavljeno. Unatoč navedenim ograničenjima, metoda omogućuje dosljedno i ponovljivo određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja te predstavlja pouzdanu osnovu za analizu njihova djelovanja u realnim prostornim uvjetima.

6. Opći zaključci iz rezultata

Analiza rezultata pokazuje da uspješnost sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja ovisi o sposobnosti sustava da ukloni onečišćeni zrak i dim iz cijelog prostora podzemne garaže. Sustavi koji kombiniraju potisne i odsisne ventilatore značajno smanjuju pojavu velikih povezanih zona nepokretnog zraka. Nasuprot tome, sustavi koji koriste isključivo odsisne ventilatore pokazuju zadržavanje zraka u dijelovima prostora, što smanjuje ukupnu sposobnost sustava za izmjenu zraka. Rezultati dodatno potvrđuju da arhitektonske značajke prostora izravno utječu na raspodjelu strujanja. Položaj ventilatora i njihova međusobna usklađenost jednako su važni kao i kapacitet sustava. Procjena uspješnosti stoga mora obuhvatiti cijeli volumen garaže, a ne samo pojedine lokalne zone. Razvijena metoda omogućuje objektivno određivanje tih svojstava i primjenjiva je za procjenu stvarne sposobnosti sustava da osigura sigurne uvjete u podzemnim garažama.

ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje rezultiralo je razvojem generičke metode za određivanje uspješnosti sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža. Razvijena metoda omogućuje pouzdanu procjenu stvarne sposobnosti sustava da ukloni dim i onečišćeni zrak iz cijelog volumena prostora, neovisno o arhitekturi garaže, vrsti ventilacijskog sustava i načinu ispitivanja. Time je potvrđena početna hipoteza rada da je moguće razviti univerzalni pristup za objektivno određivanje uspješnosti ventilacijskih sustava u podzemnim garažama.

Ključna prednost metode proizlazi iz pretpostavke da se sustav analizira u stanju kada je cijeli volumen prostora ispunjen dimom ili štetnim plinovima. Takav pristup uklanja ograničenja tradicionalnih metoda koje ovise o odabranom požarnom scenariju i položaju izvora požara te omogućuje jednoznačnu procjenu uspješnosti sustava u najnepovoljnijim uvjetima rada. Metoda je primjenjiva eksperimentalno, numeričkim modeliranjem ili njihovom kombinacijom, što omogućuje široku primjenu u istraživanjima i praktičnoj primjeni. Rezultati studija slučaja pokazali su značajne razlike u ponašanju različitih koncepata ventilacije. Sustavi koji kombiniraju potisne i odsisne ventilatore omogućuju uklanjanje onečišćenog zraka iz gotovo cijelog volumena garaže, dok sustavi koji koriste samo odsisne ventilatore ne osiguravaju učinkovitu izmjenu zraka u cijelom prostoru. Time je potvrđeno da kapacitet ventilatora sam po sebi nije dovoljan pokazatelj uspješnosti, već je presudan njihov raspored i međusobno djelovanje u odnosu na geometriju prostora. Analiza sustava mehaničkog odimljavanja pokazala je da arhitektonske značajke garaže izravno utječu na raspodjelu dima. Prostorne prepreke, položaj ventilatora i način nadoknade zraka određuju pojavu zona nepokretnog dima, što ima izravan utjecaj na sigurnost evakuacije i uvjete za vatrogasnu intervenciju. Istraživanje potvrđuje da sustav mehaničkog odimljavanja mora biti promatran zajedno s prostornim rješenjem garaže i strategijom evakuacije. Rezultati rada imaju izravno značenje za sigurnost korisnika podzemnih garaža. Uspješnost ventilacije utječe na vidljivost evakuacijskih znakova, prohodnost evakuacijskih puteva i orijentaciju korisnika u prostoru. Analiza položaja signalizacije pokazala je da dio znakova u stvarnim uvjetima može postati nevidljiv zbog ulaska u dimni sloj, što naglašava potrebu usklađivanja ventilacijskog sustava i strategije evakuacije. Unatoč ograničenjima vezanim uz pojednostavljenja numeričkih modela i razlike između hladnog i vrućeg dima, razvijena metoda omogućuje dosljedno i ponovljivo određivanje uspješnosti ventilacijskih sustava te predstavlja pouzdanu osnovu za daljnja istraživanja. Metoda se može proširiti povezivanjem s detaljnim požarnim modelima, analizama toplinskog djelovanja na konstrukciju te interakcijom s drugim sustavima aktivne zaštite od požara. Znanstveni doprinos rada ogleda se u razvoju univerzalne metode koja

omogućuje objektivnu procjenu ventilacijskih sustava u podzemnim garažama te u dokazivanju njihove povezanosti sa sigurnošću evakuacije i zaštitom ljudskih života. Rezultati istraživanja imaju neposrednu primjenu u projektiranju, provjeri i unapređenju sustava ventilacije i mehaničkog odimljavanja te predstavljaju doprinos razvoju protupožarnog inženjerstva i sigurnosti korištenja podzemnih garaža.

LITERATURA

- [1] M. Alimzhanova, M. Spearpoint, and G. Jomaas, "Fire safety assessment of sprinkler systems for car parks using the J-value methodology," *Fire Saf. J.*, vol. 129, 2022, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103565.
- [2] T. Klimczak, J. Paś, and A. Rosiński, "Fire alarm systems in use in buildings and underground garages - reliability of operation," *WUT Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.6682.
- [3] A. Demir, "Investigation of Air Quality in the Underground and Aboveground Multi-Storey Car Parks in Terms of Exhaust Emissions," *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.461.
- [4] M. Darçın, "Accidental Carbon Monoxide Poisonings in Adana, Turkey: A 14-year Study," *Haseki Tıp Bülteni*, 2017, doi: 10.4274/haseki.3158.
- [5] N. I. Mohammed, N. Othman, and K. B. Baharuddin, "Air quality profile in an enclosed car park," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.567.3.
- [6] T. R. Hull, A. A. Stec, and K. T. Paul, "Hydrogen chloride in fires," in *Fire Safety Science*, 2008. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-665.
- [7] F. Larsson, P. Andersson, and B. E. Mellander, "Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests," *Batteries*, vol. 2, no. 2, 2016, doi: 10.3390/batteries2020009.
- [8] P. Sturm, J. Rodler, T. Thaller, D. Fruhwirt, and P. Föbtleitner, "Hot smoke tests for smoke propagation investigations in long rail tunnels," *Fire Saf. J.*, vol. 105, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.03.003.
- [9] K. Niaz, H. Bahadar, F. Maqbool, and M. Abdollahi, "A review of environmental and occupational exposure to xylene and its health concerns," Nov. 23, 2015, *Leibniz Research Centre for Working Environment and Human Factors*. doi: 10.17179/excli2015-623.
- [10] G. Mallach *et al.*, "Exhaust ventilation in attached garages improves residential indoor air quality," *Indoor Air*, vol. 27, no. 2, 2017, doi: 10.1111/ina.12321.
- [11] S. J. Ahn, H. M. Kwon, G. H. Kim, and J. H. Yang, "Study of securing required ventilation rates and improving mechanical ventilation systems for underground parking lots," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 15, no. 3, 2016, doi: 10.3130/jaabe.15.659.

- [12] F. Ge, C. Liu, Q. Yu, C. Ma, and C. Wang, "Air pollution and ventilation rates in an underground car park," in *Fifth international workshop on energy and environment of residential buildings and Third international conference on built environment and public health, VOL I and II, Proceedings*, 2009.
- [13] J. C. Viegas, "The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, no. 1, 2010, doi: 10.1016/j.tust.2009.08.003.
- [14] J. L. Aveiro, "Smoke Control in an Underground Car Park with Impulse Ventilation," in *Viegas, J. C., Lisbon: V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2010.
- [15] J. C. Viegas, "The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks," *International Journal of Ventilation*, vol. 8, no. 1, pp. 57–74, 2009, doi: 10.1080/14733315.2006.11683832.
- [16] A. F. Elsafty and M. M. Abo Elazm, "Improving air quality in enclosed parking facilities using ventilation system design with the aid of CFD simulation," *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 6, 2009.
- [17] E. S. M. Gomaa, E. E. Khalil, M. Fouad, and A. Medhat, "Ventilation System Design for Underground Car Park," *Open Journal of Technology & Engineering Disciplines (OJTED)*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [18] M. Kmecová, P. Buday, J. Vojtaššák, and M. Krajčík, "Design of Fire Ventilation System for an Underground Car Park by CFD Simulations," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 887, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.887.459.
- [19] D. Chen, "Periodically reversible supply/exhaust ventilation strategy," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 12, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.014.
- [20] A. O. M. Said, E. E. Khalil, A. A. M. Fahim, and E. M. A. El Bialy, "Effect of using grilles in car park through reversible supply exhaust ventilation strategy," in *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2014*, 2014. doi: 10.1115/ESDA2014-20002.
- [21] M. E. Koban and D. D. Herrmann, "Dispersion modeling of leaks of low global warming potential refrigerant HFO-1234yf in an automobile garage," *Process Safety Progress*, vol. 30, no. 1, 2011, doi: 10.1002/prs.10415.
- [22] D. Brzezinska and A. S. Markowski, "Experimental investigation and CFD modelling of the internal car park environment in case of accidental LPG release," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 110, 2017, doi: 10.1016/j.psep.2016.12.001.

- [23] H. Li, L. Zhou, M. Ren, G. Sheng, J. Fu, and P. Peng, "Levels, profiles and gas-particle distribution of atmospheric PCDD/Fs in vehicle parking lots of a South China metropolitan area," *Chemosphere*, vol. 94, 2014, doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.09.061.
- [24] T. Gil-Lopez, A. Sanchez-Sanchez, and C. Gimenez-Molina, "Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages: Discrepancies with the current regulations," *Appl. Energy*, vol. 113, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.012.
- [25] E. Blazquez and C. Thorn, "Fires and explosions," 2010. doi: 10.1016/j.mpaic.2010.08.007.
- [26] T. T. Htike, F. Moriya, and S. Miyaishi, "Cyanide concentrations in blood and tissues of fire victims," *Leg. Med.*, vol. 41, p. 101628, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.LEGALMED.2019.101628.
- [27] P. Zuccarello, G. Carnazza, C. Raffino, and N. Barbera, "Diagnosis of lethal cyanide poisoning. Analysis by Anion-Exchange Chromatography with Pulsed Amperometric Detection," *J. Forensic Sci.*, vol. 67, no. 4, 2022, doi: 10.1111/1556-4029.15046.
- [28] J. Stevens, E. El-Shammaa, and F. LoVecchio, "Carbon Monoxide and Cyanide Poisoning in Smoke Inhalation Victims: A Review," *Trauma Reports*, vol. 16, no. 1, 2015.
- [29] K. Stamy, G. Thelander, L. Ernstgård, J. Ahlner, and G. Johanson, "Swedish forensic data 1992-2009 suggest hydrogen cyanide as an important cause of death in fire victims," *Inhal. Toxicol.*, vol. 24, no. 3, 2012, doi: 10.3109/08958378.2012.660285.
- [30] Y. Park, J. Ryu, and H. S. Ryou, "Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2019, doi: 10.3390/en12081465.
- [31] X. Deckers, S. Haga, B. Sette, and B. Merci, "Smoke control in case of fire in a large car park: Full-scale experiments," *Fire Saf. J.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.017.
- [32] K. Okamoto, T. Otake, H. Miyamoto, M. Honma, and N. Watanabe, "Burning behavior of minivan passenger cars," *Fire Saf. J.*, vol. 62, no. PART C, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2013.09.010.

- [33] F. Van Den Schoor, P. Middha, and E. Van Den Bulck, "Risk analysis of LPG (liquefied petroleum gas) vehicles in enclosed car parks," *Fire Saf. J.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.026.
- [34] J. Berghmans and M. Vanierschot, "Safety aspects of CNG cars," in *Procedia Engineering*, 2014. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.407.
- [35] A. Senveli, T. Dizman, A. Celen, D. Bilge, A. S. Dalkilic, and S. Wongwises, "CFD analysis of smoke and temperature control system of an indoor parking lot with jet fans," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 1, no. 2, 2015, doi: 10.18186/jte.02276.
- [36] D. Brzezinska and M. Sompolinski, "The accuracy of mapping the airstream of jet fan ventilators by fire dynamics simulator," *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 23, no. 5, 2017, doi: 10.1080/23744731.2016.1249234.
- [37] D. X., J. M., H. S., and M. B., "Numerical Simulations of Flow Fields in Case of Fire and Forced Ventilation in a Closed Car Park," 2011. doi: 10.3850/978-981-08-7724-8_16-03.
- [38] E. Annerel, L. Taerwe, B. Merci, D. Jansen, P. Bamonte, and R. Felicetti, "Thermo-mechanical analysis of an underground car park structure exposed to fire," *Fire Saf. J.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.07.006.
- [39] A. Law, J. Stern-Gottfried, M. Gillie, and G. Rein, "The influence of travelling fires on a concrete frame," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 5, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.01.034.
- [40] Y. W. Ng, Y. Huo, W. ki Chow, C. L. Chow, and F. M. Cheng, "Numerical simulations on explosion of leaked liquefied petroleum gas in a garage," *Build. Simul.*, vol. 10, no. 5, 2017, doi: 10.1007/s12273-017-0366-z.
- [41] Ž. Špiljar, M. Drakulić, and D. R. Schneider, "Analysis of jet fan ventilation system installed in an underground car park with partition walls," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 6, no. 2, 2018, doi: 10.13044/j.sdewes.d5.0180.
- [42] C. Habchi, M. Khaled, M. Ramadan, and G. Harika, "Fire management of underground car park using computational fluid dynamics," in *2014 International Conference on Efficient Building Design: Materials and HVAC Equipment Technologies, ICEBD-MET 2014*, 2014.
- [43] E. Immonen, "CFD optimization of jet fan ventilation in a car park by fractional factorial designs and response surface methodology," *Build. Simul.*, vol. 9, no. 1, 2016, doi: 10.1007/s12273-015-0249-0.

- [44] X. G. Zhang, Y. C. Guo, C. K. Chan, and W. Y. Lin, "Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.002.
- [45] P. Weisenpacher, J. Glasa, and L. Halada, "Parallel computation of smoke movement during a car park fire," *Computing and Informatics*, vol. 35, no. 6, 2016.
- [46] S. Krüger, A. Hofmann, A. Berger, and N. Gude, "Investigation of smoke gases and temperatures during car fire – large-scale and small-scale tests and numerical investigations," *Fire Mater.*, vol. 40, no. 6, 2016, doi: 10.1002/fam.2342.
- [47] X. Deckers, M. Jangi, and H. Andmerci, "Numerical Simulations of Flow Fields in Case of Fire and Forced Ventilation in a Closed Car Park," pp. 1104–1115, Jan. 2010, doi: 10.3850/978-981-08-7724-8_16-03.
- [48] P. Weisenpacher, L. Halada, J. Glasa, and J. Astalos, "Influence of parked cars on smoke propagation during car park fire," in *26th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2014*, 2014.
- [49] N. Tilley, X. Deckers, and B. Merci, "CFD study of relation between ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks," *Fire Saf. J.*, vol. 48, 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2011.12.005.
- [50] N. S. Netanel Donna, "Underground parking garages – changing perceptions on smoke control criteria and combining an integrated system for smoke control and ventilation," in *PROCEEDINGS, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*, 2011.
- [51] S. Ružić and Ž. Špiljar, "CFD analysis of fire and smoke disperision for underground parking garage Stožice Ljubljana," in *The 10th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures*, Ljubljana, Nov. 2011, pp. 238–243.
- [52] Q. Li, "Estimation of fire detection time," in *Procedia Engineering*, 2011. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.652.
- [53] S. Verstockt *et al.*, "A multi-modal video analysis approach for car park fire detection," *Fire Saf. J.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.07.005.
- [54] R. Rossi, "Fire fighting and its influence on the body," *Ergonomics*, vol. 46, no. 10, 2003, doi: 10.1080/0014013031000121968.
- [55] G. Maragkos and T. Beji, "Review of convective heat transfer modelling in cfd simulations of fire-driven flows," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/app11115240.

- [56] P. O. Mvogo *et al.*, “Investigative Study on Convective Heat Transfer inside Compartment during Fire Situation,” *Journal of Combustion*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6559812.
- [57] J. F. Sacadura, “Radiative heat transfer in fire safety science,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 93, no. 1-3 SPEC. ISS., 2005, doi: 10.1016/j.jqsrt.2004.08.011.
- [58] “<https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-fire-service/fire-dynamics>.”
- [59] F. Rego, P. Morgan, P. Fernandes, and C. Hoffman, “Heat for Pre-ignition and Flames,” 2021, pp. 63–77. doi: 10.1007/978-3-030-69815-7_4.
- [60] V. Babrauskas, “Ignition: A century of research and an assessment of our current status,” 2007. doi: 10.1177/1042391507059434.
- [61] C. Lemmertz, F. Roman Centeno, and M. Beshir, “An analysis of the influence of the fire source location on the hot gas layer temperature in a pre-flashover compartment fire,” 2019. doi: 10.26678/abcm.encit2018.cit18-0075.
- [62] C. K. Lemmertz, “Improved Correlations for Predicting Hot Gas Layer Temperature in a Pre-Flashover Compartment Fire Considering Heat Source Location,” 2019.
- [63] U. Wickström, “Pre-flashover Compartment Fires: Two-Zone Models,” in *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-30172-3_11.
- [64] N. Antoniou, G. Stavropoulos, and A. Zabaniotou, “Activation of end of life tyres pyrolytic char for enhancing viability of pyrolysis - Critical review, analysis and recommendations for a hybrid dual system,” 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.143.
- [65] W. G. Weng *et al.*, “Experimental study of back-draft in a compartment with openings of different geometries,” *Combust. Flame*, vol. 132, no. 4, 2003, doi: 10.1016/S0010-2180(02)00521-7.
- [66] G. Zhang, G. Zhu, G. Yuan, and L. Huang, “Methods for prediction of temperature distribution in flashover caused by backdraft fire,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/707423.
- [67] W. C. Tam, E. Y. Fu, J. Li, X. Huang, J. Chen, and M. X. Huang, “A spatial temporal graph neural network model for predicting flashover in arbitrary building floorplans,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 115, 2022, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105258.
- [68] M. L. Ivanov and C. L. Chow, “Fire and Rescue Services Reconfiguration for Better Dealing with Post-Flashover Building Fires,” *Fire*, vol. 6, no. 11, 2023, doi: 10.3390/fire6110439.
- [69] B. Karlsson and J.G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, 2nd ed. 2022.

- [70] N. Vinky Rahman and Elky Fernanda, "Evaluation of passive fire protection systems in supermall buildings," *Jurnal Koridor*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.32734/koridor.v10i1.1382.
- [71] J. Norén, M. Delin, and K. Fridolf, "Ascending stair evacuation: What do we know?," in *Transportation Research Procedia*, 2014. doi: 10.1016/j.trpro.2014.09.087.
- [72] N. Dewi A and V. Rahman, "Analysis of Fire-fighter Access as Protection against Fire Hazard in High-rise Building," *International Journal of Architecture and Urbanism*, vol. 3, no. 2, 2019, doi: 10.32734/ijau.v3i2.2203.
- [73] B. Yumkham, C. Shijagurumayum, and T. Suresh, "Fire Resistance of Concrete Structure- A Review," *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, vol. 14, no. 01 SPL, 2022, doi: 10.18090/samriddhi.v14spli01.12.
- [74] T. Eremina, D. Korolchenko, and D. Minaylov, "Experimental Evaluation of Fire Resistance Limits for Steel Constructions with Fire-Retardant Coatings at Various Fire Conditions," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 4, 2022, doi: 10.3390/su14041962.
- [75] M. A. Khalifa, M. A. Aziz, M. Hamza, S. Abdo, and O. A. Gaheen, "Improvement of fire door design using experimental and numerical modelling investigations," *Journal of Structural Fire Engineering*, vol. 13, no. 2, 2022, doi: 10.1108/JSFE-07-2021-0048.
- [76] A. Tripathi, C. Kumar, T. Grinnaert, and A. Kumar, "Testing a Fire Door Through Simulation," in *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, vol. Part F249, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-8468-4_18.
- [77] T. Halawa and H. Safwat, "Fire-smoke control strategies in road tunnels: The effectiveness of solid barriers," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101260.
- [78] G. Krajewski and W. Węgrzyński, "Air curtain as a barrier for smoke in case of fire: Numerical modelling," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 63, no. 1, 2015, doi: 10.1515/bpasts-2015-0016.
- [79] S. Gupta, S. Kanwar, and M. Kashyap, "Performance characteristics and assessment of fire alarm system," *Mater. Today Proc.*, vol. 57, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.184.
- [80] M. Bahrami and S. Givehchi, "Full title: A novel approach for determining the reliability of sprinkler systems: A case study," *Results in Engineering*, vol. 17, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100843.

- [81] M. Salminen, M. Malaska, T. Jokinen, and R. Ranua, "Framework to Incorporate Sprinkler System in Structural Fire Engineering," *Fire Technol.*, vol. 60, no. 4, 2024, doi: 10.1007/s10694-023-01503-7.
- [82] Y. H. Lee, M. S. Kim, and J. S. Lee, "Firefighting in vulnerable areas based on the connection between fire hydrants and fire brigade," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.3390/su13010098.
- [83] M. Pintol, "Fire and Water Curtains," Feb. 2024. doi: 10.13140/RG.2.2.36297.93287.
- [84] J. Kääriäinen, "High Pressure Water Mist Fire Protection Systems," Feb. 2007. doi: 10.1115/GT2007-27723.
- [85] Q. Dong, J. Qi, S. Lu, and L. Shi, "Synergistic effects of typical clean gaseous fire-extinguishing agents," *Fire Saf. J.*, vol. 147, p. 104206, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2024.104206.
- [86] T. Hatakeyama, E. Aida, T. Yokomori, R. Ohmura, and T. Ueda, "Fire extinction using carbon dioxide hydrate," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 8, 2009, doi: 10.1021/ie8019533.
- [87] T. Yu *et al.*, "Applicability of HFC-227ea/CO₂ for battery energy storage systems safety: Insights from explosion suppression experiments and kinetic analysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 97, pp. 1424–1439, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.12.022.
- [88] H. Xing, S. Lu, H. Yang, and H. Zhang, "Review on Research Progress of C6F12O as a Fire Extinguishing Agent," 2022. doi: 10.3390/fire5020050.
- [89] W. Węgrzyński and G. Krajewski, "Influence of wind on natural smoke and heat exhaust system performance in fire conditions," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 164, 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.01.014.
- [90] X. Zhou, Y. Xin, and S. Dorofeev, "Evaluation of Oxygen Reduction System (ORS) in Large-scale Fire Tests," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1107/6/062005.
- [91] B. Merci and M. Shipp, "Smoke and heat control for fires in large car parks: Lessons learnt from research?," *Fire Saf. J.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.05.001.
- [92] T. T. Chow, Z. Lin, and C. F. Tsang, "Applying Large Eddy Simulation in the Study of Fire and Smoke Spread At Underground Car Park," *International Journal on Architectural Science*, vol. 7, no. 2, 2006.
- [93] A. Jug, S. Petelin, and P. Bukovec, "Designing an underground car park fire scenarios on a probabilistic basis," *Acta Chim. Slov.*, vol. 57, no. 1, 2010.

- [94] I. Horvath, J. van Beeck, and B. Merci, "Car Park Fire Tests and Smoke Movements," 2012. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73663151>
- [95] H. P. Morgan, B. Vanhove, and J.-C. De Smedt, "Extending the principles of impulse ventilation in tunnels to apply to smoke control in car parks," 2004.
- [96] M. G. M. van der Heijden, M. G. L. C. Loomans, A. D. Lemaire, and J. L. M. Hensen, "Fire safety assessment of semi-open car parks based on validated CFD simulations," *Build. Simul.*, vol. 6, no. 4, 2013, doi: 10.1007/s12273-013-0118-7.
- [97] Merseyside Fire and Rescue Service, "King Dock car Park Fire," 2018.
- [98] C. Meraner, "Car Park Fires: A Review of Fire Incidents, Progress in Research and Future Challenges," in *Seventh International Conference on Fires in Vehicles*, 2023, pp. 7–23.
- [99] K. Storesund, C. Sesseng, F. Ragni Mikalsen, O. Anders Holmvaag, and A. Steen-Hansen, "Evaluation of fire in Stavanger airport car park," 2020.
- [100] "Up to 60 cars scorched in 'accidental' Cork car park blaze – The Irish Times." Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/up-to-60-cars-scorched-in-accidental-cork-car-park-blaze-1.4004015>
- [101] L. T. Noordijk L., "Modelling of fire spread in car parks," *Heron Journal*, 2005.
- [102] R. Jensen, *Sydney Olympic Park Aquatic Centre Case Study: Car Park Multiple Vehicle Fire*. . 2013.
- [103] E.-P. Lee, "Analysis of the Causes of Casualties of Jecheon Sports Center Fire - Focus on an Initial Response and Management -," *Fire science and engineering*, vol. 32, no. 5, 2018, doi: 10.7731/kifse.2018.32.5.057.
- [104] F. Markert and L. Giuliani, "Hydrogen fueled car fire spread to adjacent vehicles in car parks," *International Conference on Hydrogen Safety*, 2019.
- [105] Z. Huang, S. Cao, Z. Fang, R. Ye, Z. Wang, and X. Li, "Effect of voice alarms on temporal characteristics of the evacuation process inside metro train carriages: An experiment study," *Saf. Sci.*, vol. 142, 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105403.
- [106] H. T. Xu, R. X. Xiao, M. Yang, and Z. R. Yan, "Simulation and analysis of the impact of different Soot_Yields to the visibility in the underground carpark," *Kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 35, no. 1, 2014.
- [107] J. Chen, L. Yi, and W. Zhou, "Statistical study and cause analysis on car fires," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.409-410.1449.
- [108] B. Zhang, Z. Lu, Z. Liu, G. Liang, and Y. Chen, "Investigation of a vehicle fire caused by manufacturing defect," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 91, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.020.

- [109] Y. Lazarev, A. Bashkarev, O. Makovetskaya-Abramova, and S. Amirseyidov, "Study of technical reasons for fire-burning vehicles," in *E3S Web of Conferences*, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202338905053.
- [110] D. L. Zhang, L. Y. Xiao, Y. Wang, and G. Z. Huang, "Study on vehicle fire safety: Statistic, investigation methods and experimental analysis," *Saf. Sci.*, vol. 117, 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.03.030.
- [111] M. D. Leshner, "Forensic Investigation Of Vehicle Fires In Structures," *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, vol. 29, no. 2, 2012, doi: 10.51501/jotnafe.v29i2.776.
- [112] T. L. Bunn, S. Slavova, and M. Robertson, "Crash and burn? Vehicle, collision, and driver factors that influence motor vehicle collision fires," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 47, 2012, doi: 10.1016/j.aap.2011.10.008.
- [113] "Intentionally Set Fires," Sep. 2009.
- [114] H. Kelly, J. Clare, K. Wuschke, and L. Garis, "Opportunity and rationality as an explanation for suspicious vehicle fires: demonstrating the relevance of time, place, and economic factors," *Crime Sci.*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s40163-019-0103-2.
- [115] E.-P. Lee, "Analysis of an Arson fire of Motor Vehicle," *Fire Science and Engineering*, vol. 25, Feb. 2011.
- [116] "Does the Car Width Include the Side Mirrors?," *ML Truck*, 2023.
- [117] A. Ortego, S. Russo, M. Iglesias-Embil, A. Valero, and R. Magdalena, "Exergy Assessment of Plastic Car Parts," *Vehicles*, vol. 5, no. 3, 2023, doi: 10.3390/vehicles5030067.
- [118] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," 2018. doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [119] J. Mangs and O. Keski-Rahkonen, "Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part I: Car fire experiments," *Fire Saf. J.*, vol. 23, no. 1, 1994, doi: 10.1016/0379-7112(94)90059-0.
- [120] A. Lönnemark and P. Blomqvist, "Emissions from an automobile fire," *Chemosphere*, vol. 62, no. 7, 2006, doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.002.
- [121] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," 2012. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.038.

- [122] Z. Wang, X. Zhou, X. Zhu, and J. Liu, "Numerical Simulation of the Ventilation and Fire Conditions in an Underground Garage with an Induced Ventilation System," *Buildings*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/buildings13082074.
- [123] "https://sprinkler.nl/wp-content/uploads/2025/04/20240500-NFPA-RFCClassification-of-Modern-Vehicle-Hazards_Phase2_finalreport.pdf."
- [124] Ž. Špiljar, "Numeričko modeliranje svakodnevne ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža," in *3. Međunarodni stručni skup iz oblasti klimatizacije, grijanja i hlađenja "energija+,"* Podgorica: Inženjerska komora Crne Gore, Sep. 2018, pp. 35–45.
- [125] J. J. Fu and J. Y. Zhang, "Application of induced ventilation for smoke control in underground car parks," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.2260.
- [126] J. C. Viegas, "The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks," *International Journal of Ventilation*, vol. 8, no. 1, 2009, doi: 10.1080/14733315.2006.11683832.
- [127] R. Al-Waked, A. Yassin, A. Adwan, and D. B. Mostafa, "Effects of cross level air interaction within multilevel underground car parks on indoor air quality," *Fluids*, vol. 5, no. 4, 2020, doi: 10.3390/fluids5040177.
- [128] M. W. Hsu, S. K. Lee, L. L. Huang, Y. K. Chen, and C. M. Wu, "The simulation of fires in underground parking floors by fire dynamic simulator," *Sensors and Materials*, vol. 29, no. 4, 2017, doi: 10.18494/SAM.2017.1525.
- [129] F. H. Ge, X. J. Liu, Y. Liu, and Y. Z. Wang, "Air pollution and natural ventilation in underground car park," *Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)/Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, vol. 37, no. 3, 2007.
- [130] "<https://www.enerjivetesisat.com/tesisat/hvac/1861-kapal-otopark-havalandrmas-makale?showall=1>."
- [131] Ž. Špiljar, "Usporedba sustava odimljavanja podzemnih garaža," Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [132] P. Sittisak, T. Charinpanitkul, and B. Chalermssinsuwan, "Enhancement of carbon monoxide removal in an underground car park using ventilation system with single and twin jet fans," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 97, 2020, doi: 10.1016/j.tust.2019.103226.

- [133] S. M. Gomaa and E. E. Khalil, "Design of the ventilation system in an underground car park: The effect of jet fans configurations," in *13th International Energy Conversion Engineering Conference*, 2015. doi: 10.2514/6.2015-3798.
- [134] S. Sultansu and A. Onat, "The Cfd Analysis of Ventilation and Smoke Control System with Jet Fan in a Parking Garage," *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 2020, doi: 10.7240/jeps.522037.
- [135] J. P. Yuan, Z. Fang, Z. Tang, and J. Y. Sun, "Numerical simulations on sprinkler system and impulse ventilation in an underground car park," in *Procedia Engineering*, 2011. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.707.
- [136] J. Yuan, C. Chen, Y. Wen, Z. Tang, Z. Fang, and J. Wang, "Numerical Simulation on Smoke Control of Impulse Ventilation in a Large Underground Carpark," in *2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering, ICFSFPE 2019*, 2019. doi: 10.1109/ICFSFPE48751.2019.9055832.
- [137] S. Ali and E. E. Khalil, "Numerical investigation of impulse ventilation for smoke control in an underground car park," in *10th Annual International Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 2012*, 2012. doi: 10.2514/6.2012-4235.
- [138] S. Ali, E. E. Khalil, and M. A. Fouad, "Effect of fire locations on the performance of impulse ventilation system in an underground car park," in *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 2013*, 2013. doi: 10.2514/6.2013-1194.
- [139] P. A. Enright, "Impact of jet fan ventilation systems on sprinkler activation," *Case Studies in Fire Safety*, vol. 1, no. 1, 2014, doi: 10.1016/j.csfs.2013.11.002.
- [140] J. Pokorný and L. Brumarová, "Fire Plume characteristics and their application in assessment of a local fire," Jun. 2017.
- [141] J. Pokorný, D. Dlouhá, and P. Kucera, "Study of the necessity of use of virtual origin in assessment of selected Fire Plume characteristics," *MM Science Journal*, vol. 2016, no. NOVEMBER, 2016, doi: 10.17973/MMSJ.2016_11_2016157.
- [142] Ž. Špiljar, D.R. Schneider, and M. Drakulić, "Numerical modelling of smoke stratification in underground car parks," in *Digital Proceedings of the 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Oct. 2017, pp. 1–10.
- [143] S. Schubert-Polzin, A. Saupe, and U. Krause, "Horizontal Fire Spread in a Contemporary Apartment Based on a Real Fire," *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 09, no. 04, 2019, doi: 10.4236/ojce.2019.94025.

- [144] L. Tao, X. Yan, Y. Zhang, Y. Zeng, Y. Fang, and Y. Bai, "Experimental and numerical study on the smoke and velocity distribution in an extra-long railway tunnel fire," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 117, 2021, doi: 10.1016/j.tust.2021.104134.
- [145] J. Chen, M. Zhong, P. Qiu, Z. Long, and H. Cheng, "A study of repeatability of hot smoke test in a subway station," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 41, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2022.102666.
- [146] H. Ingason, A. Lönnemark, and Y.Z. Li, "Runehamar Tunnel Fire Tests," 2011.
- [147] W. K. Chow, "Determination of the smoke layer interface height for hot smoke tests in big halls," *J. Fire Sci.*, vol. 27, no. 2, 2009, doi: 10.1177/0734904108096852.
- [148] C. H. Su, S. C. Wang, S. W. Chien, and Y. H. Chen, "Performance verification and enhancement of mechanical smoke exhaust system in full-scale hot smoke test for a large space," *Indoor and Built Environment*, vol. 30, no. 1, 2021, doi: 10.1177/1420326X19890903.
- [149] B. Ozince, M. Tabanra, and D. Abi-Zadeh, "Verifying the performance of emergency ventilation systems by cold smoke tests," in *BHR Group - 16th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels 2015*, 2015.
- [150] M. Tabarra, D. Abi-Zadeh, and B. Ozince, "Verifying the performance of emergency ventilation systems by cold smoke tests," Feb. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.2895.5602.
- [151] W. Fung and M. David, "Verification of the smoke ventilation design using ventilation rates derived from CFD cold smoke simulation," in *Crossrail Project*, 2022. doi: 10.1680/cpidc.66502.193.
- [152] G. H. Yeoh and K. K. Yuen, *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*. 2009. doi: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.X0001-4.
- [153] H. M. T. Nguyen and T. T. Thiện, "Simulation of Naturally Ventilated Underground Car Park with CFD," *Science & Technology Development Journal - Engineering and Technology*, vol. 3, no. SI3, 2020, doi: 10.32508/stdjet.v3isi3.686.
- [154] R. F. Al-Waked, "CFD simulation of ducted mechanical ventilation for an underground car park," in *Proceedings of the 1st International Congress on Engineering Technologies*, 2021. doi: 10.1201/9781003178255-19.
- [155] L. Umamaheswararao, "Optimum Design of Impulse Ventilation System in Underground Car Parking Basement by Using CFD Simulation," *Industrial Engineering & Management*, vol. 06, no. 04, 2017, doi: 10.4172/2169-0316.1000238.

- [156] A. Celen, B. Kundu, A. S. Dalkılıç, S. O. Atayılmaz, N. Kayaci, and S. Wongwises, "Smoke control of a car park by means of CFD analyses using jet fans," in *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 2014. doi: 10.1115/FEDSM2014-21056.
- [157] J. C. F. Teixeira, S. F. C. F. Teixeira, P. Cunha, and A. M. Silva, "Thermal driven dispersion of smoke in a parking space," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2016. doi: 10.1115/IMECE201667498.
- [158] S. Lu, Y. H. Wang, R. F. Zhang, and H. P. Zhang, "Numerical study on impulse ventilation for smoke control in an underground car park," *Procedia Eng.*, vol. 11, pp. 369–378, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.671.
- [159] J. Luo, X. Zhang, J. Zhao, and Z. Xu, "Fire experiment on temperature distribution in an underground vertical car park," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 15, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100513.
- [160] M. Kmecová, M. Krajčík, and Z. Straková, "Designing jet fan ventilation for an underground car park by CFD simulations," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 1, 2019, doi: 10.3311/PPme.12529.
- [161] K. K. Haw, C. Wen Tong, and K. V. Li, "Reversible longitudinal smoke extraction system in enclosed underground parking structure," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 55, no. 2, 2019.
- [162] B. Alianto, N. Astari, D. Nareshwara, and Y. S. Nugroho, "Modeling of smoke control in underground parking-garage fires," *International Journal of Technology*, vol. 8, no. 7, 2017, doi: 10.14716/ijtech.v8i7.779.
- [163] D. E. Khalil and E. E. Khalil, "On the modeling of smoke management of sprinklers in a medium sized sprinklered car park," in *AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019*, 2019. doi: 10.2514/6.2019-4226.
- [164] G. Y. Wu and R. C. Chen, "The analysis of the natural smoke filling times in an atrium," *Journal of Combustion*, vol. 2010, 2010, doi: 10.1155/2010/687039.
- [165] Y. Zheng, B. Jia, X. G. Li, and R. Jiang, "Evacuation dynamics considering pedestrians' movement behavior change with fire and smoke spreading," *Saf. Sci.*, vol. 92, 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.10.009.
- [166] K. Yenumula, C. Kolmer, J. Pan, and X. Su, "BIM-Controlled Signage System for Building Evacuation," in *Procedia Engineering*, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.428.

- [167] G. Y. Jeon and W. H. Hong, "An experimental study on how phosphorescent guidance equipment influences on evacuation in impaired visibility," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, 2009, doi: 10.1016/j.jlp.2009.08.008.
- [168] M. D'Orazio, G. Bernardini, S. Tacconi, V. Arteconi, and E. Quagliarini, "Fire safety in Italian-style historical theatres: How photoluminescent wayfinding can improve occupants' evacuation with no architecture modifications," *J. Cult. Herit.*, vol. 19, 2016, doi: 10.1016/j.culher.2015.12.002.
- [169] G.-H. Lee, S.-G. Choi, and S.-K. Kim, "A Study on the Development of Fire Alarm System with Evacuation Lighting and Voice Alarm Functions," *Fire science and engineering*, vol. 32, no. 4, 2018, doi: 10.7731/kifse.2018.32.4.025.
- [170] J. Olander, E. Ronchi, R. Lovreglio, and D. Nilsson, "Dissuasive exit signage for building fire evacuation," *Appl. Ergon.*, vol. 59, 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.08.029.
- [171] M. W. Boyce, J. Al-Awar Smither, D. O. Fisher, and P. A. Hancock, "Design of instructions for evacuating disabled adults," *Appl. Ergon.*, vol. 58, 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.05.010.
- [172] Ž. Špiljar, D.R. Schneider, and M. Drakulić, "Analysis of smoke stratification and smoke layer thickness in underground car parks," *Thermal Science*, vol. 22, no. 5, 2018, doi: 10.2298/TSCI180120262S.
- [173] S. C. Li, D. F. Huang, N. Meng, L. F. Chen, and L. H. Hu, "Smoke spread velocity along a corridor induced by an adjacent compartment fire with outdoor wind," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.086.

ŽIVOTOPIS

Željko Špiljar rodio se 30. prosinca 1967. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je i završio u Zagrebu te 1986. godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Nakon upisa na fakultet odlazi na odsluženje vojnog roka. Diplomirao je 1993. godine na Procesno energetskom smjeru, Modul toplinske i mehaničke operacije. Tema diplomskog rada bila je *Konstrukcija sklopa za pročišćavanje zagađene vode u lakirnicama*. Mentor mu je bio prof.dr.sc. Vladimir Koharić. Iste godine podjeljena mu je Rektorova nagrada Sveučilišta u Zagrebu za najbolji studentski rad *Temperaturno polje na ekscentrično postavljenim kružnim i kvadratnim rebrima*. Stručni voditelj bio mu je prof.dr.sc. Srećko Švaić. Nakon završetka Fakulteta zapošljava se kao konstruktor armature u poduzeću TPK ARMATURA u Zagrebu. 1995. godine zapošljava se u poduzeću MONTER TERMO d.d. u Zagrebu kao voditelj građenja. Stručni ispit pred komisijom Ministarstva uređenja, graditeljstva i stanovanja Republike Hrvatske polaže u prosincu 1995. godine. Nakon tri godine, 1998. zapošljava se u poduzeću TERMOTEHNIČKE INSTALACIJE d.o.o. iz Zagreba kao tehnički direktor, a 1999. postaje članom Hrvatske komore inženjera strojarstva. Kao direktor sektora za održavanje zapošljava se u poduzeću INVENTO PRO d.o.o. iz Zagreba 2005. godine, a 2007. i 2008. godine radi u poduzeću INGRA d.d. kao voditelj strojarskih radova te od 2008. do 2020. godine kao tehnički direktor u poduzeću INVENTO PRO d.o.o.. Od 2020. godine vlasnik je poduzeća INVENTO VENTILACIJA d.o.o. Završava poslijediplomski specijalistički studij Požarnog inženjerstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2014. godine, s temom *Usporedba sustava odimljavanja podzemnih garaža* te stječe zvanje Sveučilišni specijalist požarnog inženjerstva. Mentor mu je bio doc.dr.sc. Miodrag Drakulić. Iste godine postaje članom Hrvatske udruge zaštite od požara.

Objavljeni radovi

Ružić Stanko, Špiljar Željko, *CFD analysis of fire and smoke dispersion for underground parking garage Stožice Ljubljana*, The 10th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, 2011, p.238-243.

Špiljar Željko, Drakulić Miodrag, Schneider Daniel Rolph, *Numerical modelling of jet fan ventilation system installed in an underground car park with partition walls*, Book of Abstracts 24th International symposium on heating, refrigerating and air conditioning INTERKLIMA 2017, Dović, Damir; Soldo, Vladimir; Mudrinić, Saša (ur.), Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Fakultet stojarstva i brodogradnje Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb, 2017. str. 18-18.

Špiljar Željko, Drakulić Miodrag, Schneider Daniel Rolph, *Numeričko modeliranje sustava mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža*, Zbornik radova 5. međunarodnog kongresa Dani inženjera strojarstva, Denis Puljić (ur.), Vodice: Hrvatska komora inženjera strojarstva, 2017. str. 173-178.

Špiljar Željko, Schneider Daniel Rolph, Drakulić Miodrag, *Numerical modelling of smoke stratification in underground car parks*, Digital Proceedings of the 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems SDEWES, Ban, Marko et al. (ur.). (ur.). Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture Zagreb, Dubrovnik, 4-8 October 2017. pp 1-10.

Špiljar Željko, Schneider Daniel Rolph, Drakulić Miodrag, *Comparision between numerical modelling methods to estimate mecchanical ventilation smoke extraction efficiency in underground car parks*, Proceedings of 11th International Tunneling and Underground Structures Conference, Žigon, Angelo (ur.), Ljubljana: Slovensko društvo za podzemne gradnje, 12.11.2017. pp 109-116.

Špiljar Željko, Drakulić Miodrag, Schneider Daniel Rolph, *Analysis of Jet Fan Ventilation System installed in an Underground Car Park with Partition Walls*, Journal of sustainable development of energy, water and environment systems, Volume 6, Issue 2, 2018, pp 228-239, doi:10.13044/j.sdewes.d5.0180

Špiljar Željko, Schneider Daniel Rolph, Drakulić Miodrag, *Analysis of Smoke Stratification and Smoke Layer Thickness in Underground Car Parks*, Thermal Science, Volume 22 (2018), Issue 5, pp 1963-1972, doi:10.2298/TSCI180120262S

Špiljar Željko, *Numeričko modeliranje svakodnevne ventilacije i mehaničkog odimljavanja podzemnih garaža*, Zbornik Radova III Međunarodni stručni skup "energijA+", Janković, Vuk (ur.), Podgorica, Inženjerska komora Crne Gore, 2018. str. 35-45

Špiljar Željko, *Ventilacija podzemnih garaža - Sustavi, numerička analiza, sigurnost*, Zbornik Radova 4. Stručni skup sa međunarodnim učešćem iz oblasti klimatizacije, grijanja i hlađenja, Podgorica, Crna Gora, 15-16. rujan 2022. godine

Ivanek Krešimir, Keser Robert, Drakulić Miodrag, Špiljar Željko, *Optimizing Safety In Short High-Slope Road Tunnels: Smoke Propagation And Ventilation System Response*, 12th International Conference Tunnel Safety and Ventilation (TSV 2024), Graz Austria, 16-18 April 2024.

Špiljar Željko, Špiljar Dora Helena, *Električna vozila u podzemnim garažama*, Zbornik Radova 5. Stručni Skup sa međunarodnim učešćem "energijA+ Podgorica, Crna Gora 2024.

Špiljar Željko, Špiljar Dora Helena, *Požar električnih vozila u podzemnim garažama*, Zbornik radova 9.Međunarodnog kongresa Dani inženjera strojarstva, Hrvatska komora inženjera strojarstva, Vodice, 9-12. travnja 2025.

Špiljar Željko, Špiljar Dora Helena, *Shortcoming and challenges in evacuation signs in underground car parks*, Proceedings of 15th International Tunneling and Underground Structures Conference, Arčan Simon, Povšič Nejc (ur.), Ljubljana, 19–21 November 2025., pp 32-41.