

*Kalman Žiha, FSB, I. Lučića 5, Zagreb
Domagoj Veža, AdriaWinch Put Mostina bb, Split*

ČVRSTOĆA OŠTEĆENIH PRESJEKA

Sažetak

U radu će se prikazati analitički i numerički postupci za određivanje geometrijskih karakteristika jednostavnih i složenih oblika simetrično i nesimetrično oštećenih poprečnih presjeka tipičnih elemenata brodskih konstrukcija. Cilj je odrediti nosive jezgre preostale čvrstoće oštećenih presjeka s obzirom graničnu čvrstoću pri savijanju i vlaku, što bi omogućilo brzo predviđanje posljedica i procjenu izdržljivosti u slučajevima oštećenja uslijed iznenadnih i neočekivanih lokalnih ili globalnih strukturnih oštećenja.

Ključne riječi: čvrstoća, oštećenje presjeka, popuštanje, izvijanje, preostala čvrstoća

THE STRENGTH OF DAMAGED SECTIONS

Summary

The paper will present analytical and numerical methods for calculation of geometric properties of simple and compound symmetrically and asymmetrically damaged cross sections of typical members in ship structures. The aim is to determine the resisting cores of residual strength of damaged cross sections with respect ultimate strength under yielding due to bending and tension, in order to provide an ability of forecast of consequences and assessment of load carrying capacities in case of damages due to sudden and unexpected local or global structural failures.

Key words: strength, damaged section, yielding, buckling, residual strength

1. Uvod

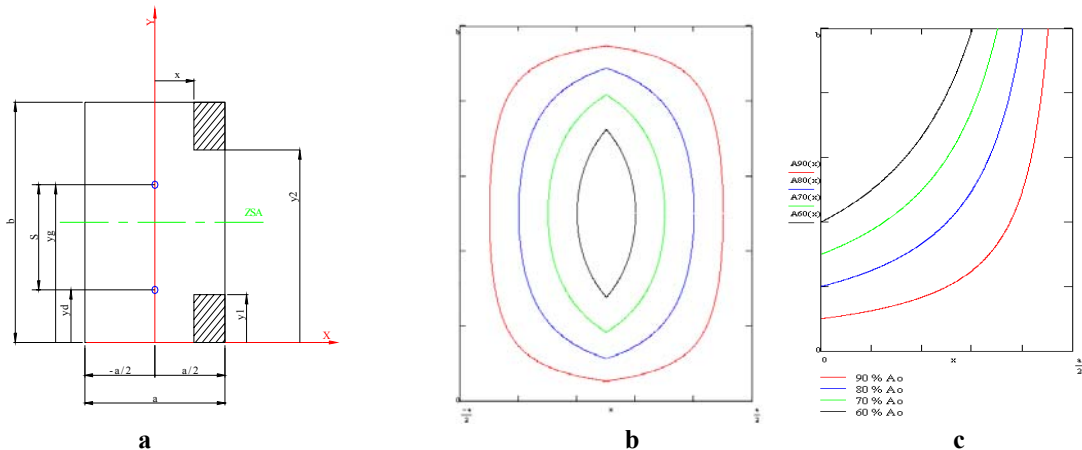
Sigurnost tehničkih objekata u projektu, u proizvodnji i pri njihovom korištenju je jedna od glavnih društvenih odgovornosti inženjerskog djelovanja. Unatoč golemim naporima i prikupljenom iskustvu mnogih generacija inženjera, nije još moguće ostvarivanje potpuno sigurnih tehničkih tvorevina koje su pri tome i gospodarski učinkovite. Poteškoće vezane za ocjene sigurnosti su još i veće kada se u razmatranja uzimaju trošenja kroz višegodišnju primjenu i zbog oštećivanja uslijed raznih predvidivih, a još gore, zbog nepredvidivih utjecaja. Čvrstoća broda je općenito s inženjerskog stajališta svojstvo broskog trupa da u cijelosti i mjestimično preuzme i izdrži globalna i lokalna statička opterećenja na mirnoj vodi od vlastite težine, tereta, zaliha i posade, te dinamička opterećenja uslijed okolišnih uvjeta neizvjesnih u naravi u cijelom predviđenom vijeku korištenja, na valovima, po vjetru, ledu i strujanjima u lukama i na moru, kao i moguća dodatna opterećenja pri dokovanju, sudarima ili nasukavanju [1]. Čvrstoću broda u najvećoj mjeri određuju materijal trupa, dimenzije, geometrija dijelova i cjeline, razmještaj i spojevi građevnih elemenata, kao rezultat tehničkih proračuna zasnovanih dijelom na iskustvu a dijelom na teoriji čvrstoće broda, pokusa u laboratorijima i naravi, te pravila i propisa međunarodnih organizacija i klasifikacijskih društava [2]. Pri tome se moraju razmotriti popuštanja uslijed premašivanja granice razvlačenja materijala, izvijanje pri visokim tlačnim naprezanjima, zamor konstrukcije pri vremenski promjenljivim naprezanjima velikog raspona promjena, krti lom pri niskim temperaturama, te u novije vrijeme i granična čvrstoća kod koje dolazi do sloma dijela ili cjeline strukture [3]. Oštećenja raznog stupnja ozbiljnosti prema posljedicama, mogu zahvatiti trup u cijelosti ili neke veće podstrukture, ali češće će se pojaviti u dijelovima opločenja, ukrepljenih panela, pojedinih ukrepa, nosača ili spojeva. Prema posljedicama oštećenja mogu izazvati gubitke ljudskih života i materijalne gubitke zbog nemogućnosti izvršavanja zadataka u službi broda. U krajnjem slučaju, može se dogoditi i potpuni gubitak nosivosti strukture odnosno slom, što za posljedicu može imati gubitak broda i posade. Općenito se stupnjevi oštećenja po posljedicama razmatraju kao visoki, ozbiljni, srednji i mali [4]. Zbog složenosti se procjena čvrstoće brodskih konstrukcija pri projektiranju uglavnom provodila za neoštećena stanja trupa za moguće uvjete službe, osim kod ratnih jedinica, kod kojih se provodi ocjenjivanje ranjivosti simulacijom. Razvoj teorije čvrstoće i procesne moći računala nalaže i omogućuje razmatranja i oštećenih struktura [5]. U radu se prikazuju utjecaji raznih oblika oštećenja na preostalu graničnu čvrstoću tehničkih objekata pravilnih presjeka [6], kakvi se susreću i kod brodskih konstrukcija, te jedan primjer tankera [6], a sve to s ciljem da se omogući što brže i po mogućnosti odgovarajuće donošenje odluke o tome što činiti u slučajevima oštećenja.

2. Jezgre preostale čvrstoće pravilnih presjeka pri zamišljenim oštećenjima

U nastavku se ispituje utjecaj promijenjene geometrije pravilnih presjeka uslijed zamišljenih oštećenja na promjene površine presjeka i modula plastičnosti [6] kao pokazatelja granične čvrstoće elemenata na aksijalna opterećenja i savijanje. Pod jezgrama preostale čvrstoće će se smatrati oblici presjeka koji nakon oštećenja posjeduju poznati iznos preostale čvrstoće izražene površinom presjeka i modulom plastičnosti u odnosu na početna svojstva neoštećenog presjeka. Jezgre preostale čvrstoće će se izražavati s eksplicitnim, implicitnim ili jednostavno numeričkim funkcijama oštećenja.

Pretpostavka o simetričnom oštećenju značajno pojednostavljuje izvode funkcija oštećenja i prikaze rezultata za jezgre preostale čvrstoće. Zbog toga su najprije razmotreni simetrično oštećeni pravokutni puni i kutijasti presjeci s jezgrama preostale čvrstoće u iznosima od 90%, 80%, 70% i 60% početne čvrstoće neoštećenih presjeka.

2.1. Pravokutni poprečni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi, Sl. 1.



Slika 1. Pravokutni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi nultog napreznja (a), Krivulje jednakih preostalih modula plastičnosti presjeka (b), Krivulje jednakih preostalih površina presjeka (c)

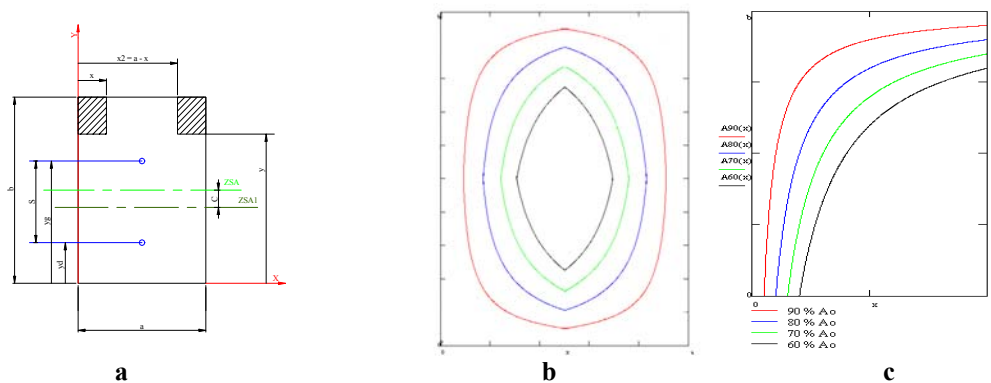
Fig. 1. Rectangular section symmetrically damaged about horizontal neutral line (a), iso-curves of residual plasticity modulus (b), iso-curves of residual sectiona area (c)

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 1a, dobiva se analitički primjenom elementarne algebre, te uz oznake $A_1 = a/2 - x$; $B_1 = bx - ab/2$; $C_1 = ab^2(1-n)/4$ i $A_2 = a/2 + x$; $B_2 = bx + ab/2$; $C_2 = ab^2(1-n)/4$, u eksplicitnom obliku u dva dijela, sl. 1b.:

$$y_1(x) = \left[-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1} \right] / 2A_1 \quad \text{za } a/2 \geq x \geq 0 \quad \text{i} \quad y_2(x) = b + \left[B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2} \right] / 2A_2 \quad \text{za } 0 \geq x \geq -a/2,$$

Funkcija oštećenja površine poprečnog presjeka je $y(x) = ab(n-1)/(2x-a)$, gdje je n parametar preostale površine, sl. 1c.

2.2. Pravokutni poprečni presjek simetrično oštećen oko vertikalne osi, Sl. 2.

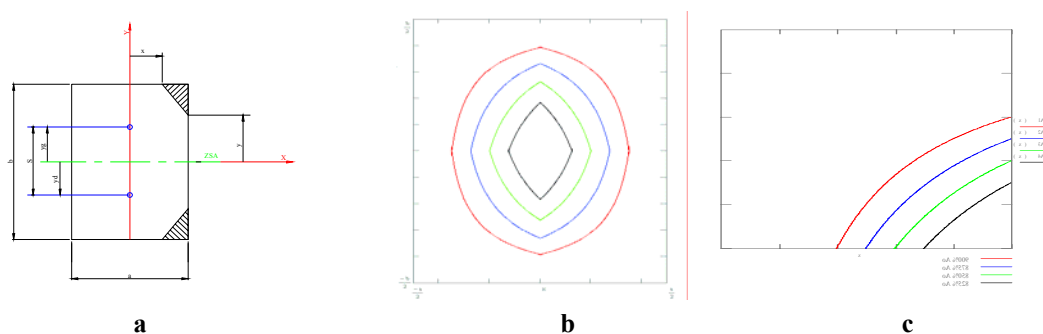


Slika 2. Pravokutni presjek simetrično oštećen oko vertikalne osi nultog napreznja (a), krivulje jednakih preostalih modula plastičnosti presjeka (b), krivulje jednakih preostalih površina presjeka (c)

Fig. 2. Rectangular section symmetrically damaged about vertical neutral line (a), iso-curves of residual plasticity modulus (b), iso-curves of residual sectiona area (c)

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 2a, dobiva se u analitički primjenom elementarne algebre i to u eksplicitnom obliku slično kao u prethodnom primjeru, a grafički je prikaz dan na sl. 2b. Funkcija oštećenja površine poprečnog presjeka prikazana je na sl. 2c.

2.3. Pravokutni poprečni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi, Sl. 3



Slika 3. Pravokutni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi nultog naprezanja (a), krivulje jednakih preostalih modula plastičnosti presjeka (b), krivulje jednakih preostalih površina presjeka (c)

Fig. 3 Rectangular section symmetrically damaged about horizontal neutral line (a), iso-curves of residual plasticity modulus (b), iso-curves of residual sectional area (c)

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 3a, dobiva se u analitički u eksplicitnom obliku od četiri dijela, sl. 3b:

$$y1(x) = \frac{-B1 + \sqrt{B1^2 - 4A1C1}}{2A1}; \quad 0 \leq x \leq a/2 \quad \text{i} \quad 0 \leq y \leq b/2$$

$$y2(x) = -y1(x); \quad 0 \leq x \leq a/2 \quad \text{i} \quad 0 \geq y \geq -b/2, \quad A1 = \left(\frac{a-x}{6}\right); \quad B1 = \left(\frac{ab}{12} - \frac{bx}{6}\right); \quad C1 = \left(\frac{ab^2}{6} - n\frac{ab^2}{4} + \frac{b^2x}{6}\right)$$

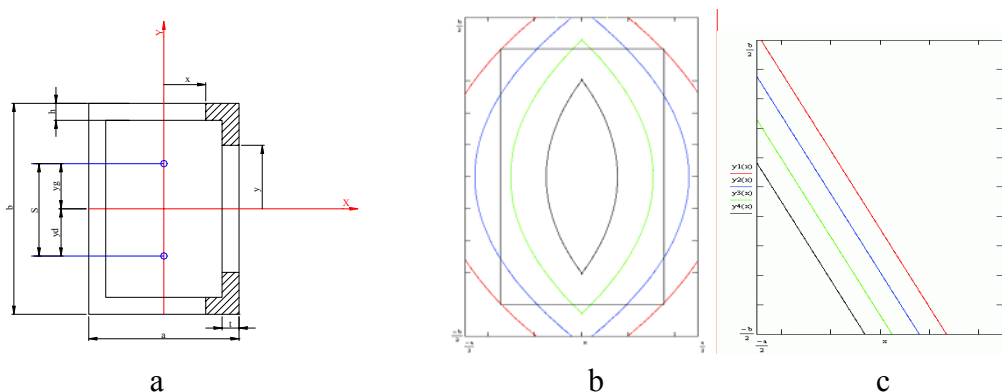
$$y3(x) = \frac{-B2 + \sqrt{B2^2 - 4A2C2}}{2A2}; \quad 0 \geq x \geq -a/2 \quad \text{i} \quad 0 \leq y \leq b/2$$

$$y4(x) = -y3(x); \quad 0 \geq x \geq -a/2 \quad \text{i} \quad 0 \geq y \geq -b/2, \quad A2 = \left(-\frac{a-x}{6}\right); \quad B2 = \left(\frac{ab}{12} + \frac{bx}{6}\right); \quad C2 = \left(-\frac{ab^2}{6} + n\frac{ab^2}{4} + \frac{b^2x}{6}\right)$$

$$\text{Funkcija oštećenja površine poprečnog presjeka je } y(x) = \left[ab \left(n - \frac{3}{4} \right) - \frac{bx}{2} \right] / \left(\frac{a}{2} - x \right),$$

gdje je n parametar preostale površine, sl. 3c.

2.4. Kutijasti poprečni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi, Sl. 4.



Slika 4. Kutijasti poprečni presjek simetrično oštećen oko horizontalne osi (a),

Krivulje jednakih preostalih modula plastičnosti (b) i Pravci jednakih preostalih površina (c)

Fig. 4 Box beam section symmetrically damaged about horizontal neutral line (a), iso-curves of residual plasticity modulus (b), iso-curves of residual sectional area (c)

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 4a, dobiva se u analitičkom obliku primjenom elementarne algebre, i prikazana je na sl. 4b.

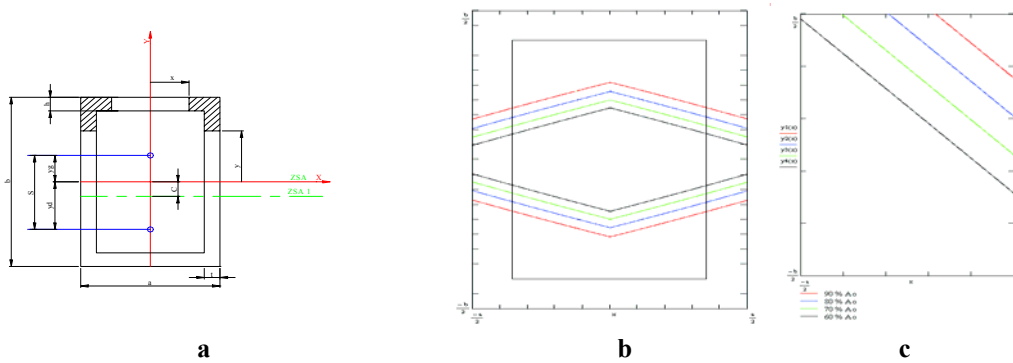
$$y1(x) = \pm \sqrt{n \left(abh - ah^2 - \frac{tb^2}{2} - 2bht + 2th^2 \right) / t - \left(\frac{abh}{2} - \frac{ah^2}{2} + \frac{tb^2}{4} - bht + th^2 + bhx - h^2x \right) / t} \quad \text{za } 0 \leq x \leq a/2$$

$$y2(x) = \pm \sqrt{n \left(abh - ah^2 - \frac{tb^2}{2} - 2bht + 2th^2 \right) / t - \left(\frac{abh}{2} - \frac{ah^2}{2} + \frac{tb^2}{4} - bht + th^2 - bhx + h^2x \right) / t} \quad \text{za } 0 \geq x \geq -a/2$$

$$\text{Funkcija oštećenja površine poprečnog presjeka je } y(x) = \frac{(2n-1)(ah+bt-2ht)+2hx}{2t},$$

gdje je n parametar preostale površine, sl. 4c.

2.5. Kutijasti poprečni presjek simetrično oštećen oko vertikalne osi, Sl. 5.



Slika 5. Kutijasti poprečni presjek simetrično oštećen oko vertikalne osi (a),

Krivulje jednakih preostalih modula plastičnosti (b) i krivulje jednakih preostalih površina (c)

Fig. 5 Box beam section symmetrically damaged about vertical neutral line (a), iso-curves of residual plasticity modulus (b), iso-curves of residual sectional area (c)

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 5a, dobiva se u analitičkom obliku primjenom elementarne algebre, sl. 5b.

$$y1(x) = \left[-B1 + \sqrt{B1^2 - 4A1C1} \right] / 2A1; \quad 0 \leq x \leq a/2, \quad 0 \leq y \leq b/2$$

$$y2(x) = \left[B1 - \sqrt{B1^2 - 4A1C1} \right] / 2A1; \quad 0 \leq x \leq a/2, \quad -b/2 \leq y < 0$$

$$y3(x) = \left[-B2 + \sqrt{B2^2 - 4A2C2} \right] / 2A2 \quad 0 \geq x \geq -a/2, \quad 0 \leq y \leq b/2$$

$$y3(x) = \left[B2 - \sqrt{B2^2 - 4A2C2} \right] / 2A2 \quad 0 \geq x \geq -a/2, \quad -b/2 \leq y \leq 0, \quad \text{gdje su}$$

$$A1 = A2 = \left(\frac{5}{2}t - a \right), \quad B1 = \left(\frac{a^2h}{4t} - th - \frac{ahx}{2t} - tb + \frac{3}{4}ab \right), \quad B2 = \left(\frac{a^2h}{4t} - th + \frac{ahx}{2t} - tb + \frac{3}{4}ab \right)$$

$$C1 = C11 + C12 + C13, \quad C2 = C21 + C22 + C23,$$

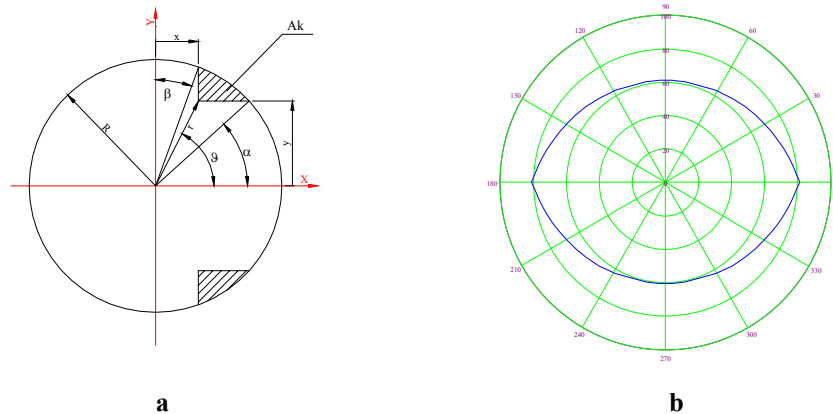
$$C11 = C21 = \left(\frac{-h^2x^2}{2t} \right), \quad C12 = x \left(-3h^2 + \frac{ah^2}{t} + \frac{3}{2}bh \right), \quad C22 = -x \left(-3h^2 + \frac{ah^2}{t} + \frac{3}{2}bh \right)$$

$$C13 = C23 = \left(\frac{-abh}{2} + \frac{3}{2}ah^2 + \frac{tb^2}{8} - \frac{3}{2}th^2 + bth - \frac{3}{8} \frac{a^2h^2}{t} \right) - n \left(abh - ah^2 + \frac{tb^2}{2} - 2bht + 2th^2 \right)$$

Funkcija oštećenja površine poprečnog presjeka je

$$y(x) = \frac{n(2ah+2bt-4th) - (ah+bt-2th+2hx)}{2t}, \quad n \text{ je parametar preostale površine, sl. 5c.}$$

2.6. Kružni poprečni presjek simetrično oštećen, Sl. 6.



Slika 6. Kružni poprečni presjek simetrično oštećen (a), Krivulja 90% modula plastičnosti oštećenog kruznog presjeka polumjera R = 100mm (b)

Fig. 6 Circular cross section symmetrically damaged (a), 90% iso-curve of residual plasticity modulus for radius R = 100mm (b)

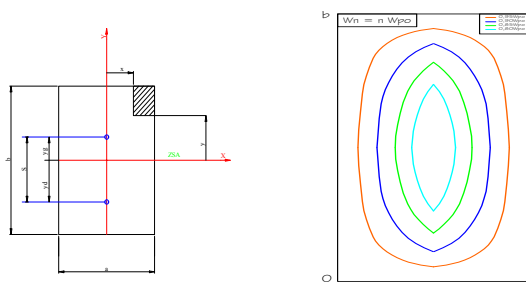
Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 6a, dobiva se u analitički u implicitnom obliku $Ay^3 + By^2 + Cy + D = 0$, gdje su

$$A = 1, \quad B = \left(\frac{9}{4}x^2 - 3R^2 \right), \quad C = \left(3R^4 - 6R^3x - \frac{9}{2}R^2x^2 + 6nR^3x + \frac{3}{2}x^4 \right)$$

$$D = \left(\frac{x^6}{4} - \frac{3}{2}R^2x^4 - 8R^6n + 2R^3nx^3 + \frac{9}{4}R^4x^2 + 4R^6n^2 - 2R^3x^3 + 6R^5x + 3R^6 - 6R^5nx \right)$$

Za rješavanje ovakvog polinoma također je prikladno primijeniti iterativan postupak ili snažan matematički alat, na primjer MathCAD 2000, sl. 6b.

2.7. Pravokutni poprečni presjek nesimetrično oštećen, Sl. 7.



Slika 7. Pravokutni poprečni presjek nesimetrično oštećen – proveden iterativni numerički postupak

Fig. 7 Rectangular section unsymmetrically damaged - iterative numerical procedure

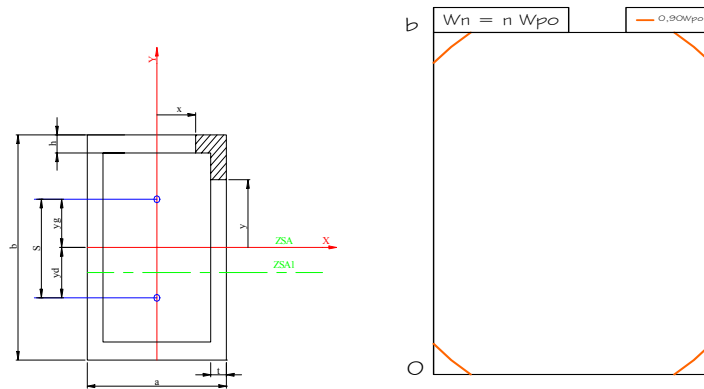
Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 7, dobiva se u analitički u implicitnom obliku, $y^8 + N_1 \cdot y^7 + N_2 \cdot y^6 + N_3 \cdot y^5 + N_4 \cdot y^4 + N_5 \cdot y^3 + N_6 \cdot y^2 + N_7 \cdot y + N_8 = 0$

Koeficijenti polinoma definirani su slijedećim izrazima :

$$\begin{aligned}
N1 &= \frac{Q2}{Q1} ; N2 = \frac{2Q3}{Q1} + \frac{Q2^2}{Q1^2} ; N3 = \frac{2Q2Q3}{Q1^2} + \frac{2Q4}{Q1} ; N4 = \frac{2Q2Q4}{Q1^2} + \frac{Q3^2}{Q1^2} + \frac{2Q5}{Q1} - \frac{T1}{Q1^2} \\
N5 &= \frac{2Q2Q5}{Q1^2} + \frac{2Q3Q4}{Q1^2} - \frac{T2}{Q1^2} ; N6 = \frac{2Q3Q5}{Q1^2} + \frac{Q4^2}{Q1^2} - \frac{T3}{Q1^2} ; N7 = \frac{2Q4Q5}{Q1^2} - \frac{T4}{Q1^2} ; N8 = \frac{Q5^2}{Q1^2} - \frac{T5}{Q1^2} \\
Q1 &= \left[\frac{35a}{256nb^2} - \frac{39x}{128nb^2} - \frac{21x^2}{64nab^2} + \frac{19x^3}{32a^2nb^2} + \frac{3x^4}{8a^3nb^2} \right], T1 = \left[\frac{5a}{32} - \frac{x}{8} + \frac{3x^2}{8a} \right]^2 \\
Q2 &= \left[\frac{3a}{256nb} - \frac{41x}{256nb} + \frac{75x^2}{128abn} - \frac{19x^3}{64a^2bn} - \frac{21x^4}{32a^3nb} \right], T2 = 2 \left[\frac{-ab}{32} - \frac{bx}{8} + \frac{3bx^2}{8a} \right] \left[\frac{5a}{32} - \frac{x}{8} + \frac{3x^2}{8a} \right] \\
Q3 &= \left[\frac{37a}{265n} + \frac{x}{512n} - \frac{115x^2}{256an} - \frac{61x^3}{128a^2n} + \frac{27x^4}{64a^3n} \right], T3 = \left[\left(\frac{a^2}{8} - \frac{x^2}{2} \right) + 2 \left(\frac{13ab^2}{128} + \frac{3b^2x}{32} - \frac{3b^2x^2}{32a} \right) \left(\frac{5a}{32} - \frac{x}{8} + \frac{3x^2}{8a} \right) + \left(\frac{-ab}{32} - \frac{bx}{8} + \frac{3bx^2}{8a} \right)^2 \right] \\
Q4 &= \left[\frac{13ab}{1024n} - \frac{9bx}{1024n} + \frac{41bx^2}{512an} + \frac{103bx^3}{256a^2n} - \frac{15bx^4}{128a^3n} \right], T4 = \left[2 \left(-\frac{a^2b}{16} + \frac{bx^2}{4} \right) \left(\frac{a^2}{8} - \frac{x^2}{2} \right) + 2 \left(\frac{13ab^2}{128} + \frac{3b^2x}{32} - \frac{3b^2x^2}{32a} \right) \left(\frac{-ab}{32} - \frac{bx}{8} + \frac{3bx^2}{8a} \right) \right] \\
Q5 &= \left[\frac{169ab^2}{4096n} + \frac{117b^2x}{1024n} + \frac{5b^2x^2}{256an} - \frac{21b^2x^3}{256a^2n} + \frac{3b^2x^4}{256a^3n} \right], T5 = \left[\left(-\frac{a^2b^2}{16} + \frac{bx^2}{4} \right)^2 + \left(\frac{13ab^2}{128} + \frac{3b^2x}{32} - \frac{3b^2x^2}{32a} \right)^2 \right]
\end{aligned}$$

Za rješavanje gornjeg izraza se preporuča iterativan numerički postupak.

2.8. Kutijasti poprečni presjek nesimetrično oštećen, Sl. 8.



Slika 8. Kutijasti poprečni presjek nesimetrično oštećen **Fig. 8** Box beam section unsymmetrically damaged

Funkcija oštećenja s obzirom na preostali modul plastičnosti presjeka u ovisnosti od preostale poluširine x i poluvisine y presjeka, sl. 8, dobiva se u analitički u implicitnom obliku koji se teško može prevesti u eksplicitni oblik:

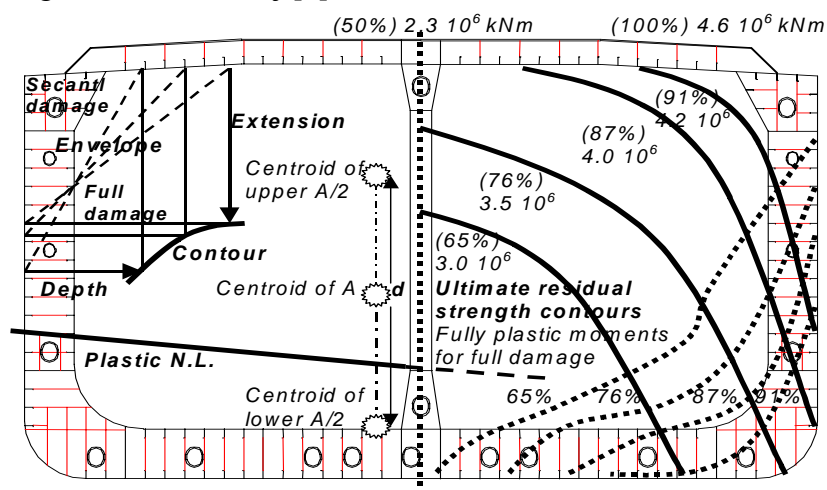
$$s_n^2 y_g^2 - (x_g^2 + y_g^2) \left[n \left(abh - ah^2 + \frac{tb^2}{2} - 2bht + 2th^2 \right) \right]^2 = 0$$

Za rješavanje ovakvog problema preporuča se iterativan pristup određivanja svih parova točaka (x, y) koji vode ka jednakom modulu plastičnosti nesimetrično oštećenog kutijastog presjeka.

3. Zaključak

U životnom su vijeku broda moguća iznenadna lokalna i globalna oštećenja i slomovi konstrukcije bilo uslijed prirodnih nepogoda (vjetar, valovi...), osobito zbog starenja i hrđanja tijekom službe, ili uslijed drugih slučajeva (sudari, nasukavanja, eksplozije, nepravilno rukovanje teretom...), koja nisu predviđena niti provjerena projektom. Ponajprije zbog sigurnosti ljudskih života, a potom tereta i samog broda, te očuvanja prirodnog okoliša važno je poznavati, osim čvrstoće broda u neoštećenom stanju, koja se u projektu konstrukcije

zbog složenosti samog postupka obično jedino i razmatra, i neke pokazatelje čvrstoće u oštećenim stanjima. Pri procjeni sposobnosti preživljavanja konstrukcije, osim popuštanja, ponašanja do premašivanja granica elastičnosti, redovito reverzibilnog karaktera, eventualno s manjim, uglavnom popravljivim posljedicama, važno je i provjeravati graničnu čvrstoću brodske konstrukcije, odnosno krajnja opterećenja konstrukcije i odzive nakon čijih premašivanja slijedi slom konstrukcije, bilo lokalno (podstrukture dna, boka, palube, osnovni sklopovi paneli i nosači, okviri, roštilji, nosači, upore, paneli) ili globalno (brodski trup). Svjesni činjenice da mnoge nezgode s posljedicama za integritet konstrukcije mogu nastupiti naglo, na krivom mjestu u krivo vrijeme, kada su potrebne brze, gotovo trenutne prosudbe i intervencije, u ovom se radu pokušao zacrtati put prema mogućnosti ocjene preostale izdržljivosti nekih osnovnih elemenata na osnovi njihove prethodne analize pri zamišljenim a mogućim oštećenjima. Jezgre preostale čvrstoće prikazane konturama konstantnog iznosa nekog svojstva izdržljivosti, kako je prikazano u radu, pružaju mogućnost da se na osnovi vizualnih opažanja ili drugih načina ustanovljavanja oštećenja, može u nekim slučajevima trenutno ocijeniti preostala čvrstoća usporedbom s prije utvrđenim i jednostavno prikazanim svojstvima oštećenog presjeka. Ispostavilo se da je razmatranje simetričnih oblika oštećenja analitičkim postupcima moguće za jednostavne pravilne presjeke, dok je problem nesimetričnih oblika oštećenja presjeka u cilju utvrđivanja jezgri preostale čvrstoće, već i za jednostavne pravilne presjeke teško izvedivo analitički, ali posve moguće numeričkim postupcima. Tako je na primjer proveden proračun jezgri preostalog modula plastičnosti, sl. 9, za jedan tanker građen u Hrvatskoj [7].



Slika 9. Konture granične čvrstoće tankera za kemikalije **Figure 9.** Ultimate residual strength contours for a product carrier

REFERENCES

- [1] ISSC: Structural Design Against Collision and Grounding, Proceedings of the 13th International Ship and Offshore Structures Congress, V. 2., Edited by Moan, T., Berge, S., Pergamon, Oxford, 1997.
- [2] IACS: Unified Requirement S11 "Longitudinal strength standard", 1989, Revision 1993, London.
- [3] ISSC: Ultimate Hull Girder Strength, Proceedings of the 14th International Ship and Offshore Structures Congress, V. 3., Edited by Ohtsubo, H., Sumi, Y., Elsevier, Amsterdam, 2001.
- [4] Hughes, O., F.: Ship Structural Design, SNAME, New Jersey, 1983.,
- [5] MAESTRO, M., MARINO, A: "An Assessment of the Structural Capability of Damaged Ships: The Plastic Approach in Longitudinal Unsymmetrical Bending and Influence of Buckling", International Shipbuilding Progress 36(1989), pp. 355-365.
- [6] BAKER, J., HEYMAN, J.: "Plastic Design of Frames", Cambridge University Press, Cambridge, 1969.
- [7] Žiha, K., Pedišić, M.: Tracing the ultimate strength of damaged ship hull girder, International Shipbuilding Progress 3(2002), pp 161-76.