

# Proračun konstrukcije roštilja dvodna broda za rasuti teret u konceptualnoj fazi projekta

---

Romić, Darjan

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:576673>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Darjan Romić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Darjan Romić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Jerolimu Andriću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se mojim roditeljima i obitelji na beskrajnom strpljenju i podršci.

Darjan Romić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	17-09-2015 Prilog
Klasa:	602-04/15-6/13
Ur.broj:	15-1703-15-352

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Darjan Romić** Mat. br.: 0036437938

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRORAČUN KONSTRUKCIJE ROŠTILJA DVODNA BRODA ZA RASUTI TERET U KONCEPTUALNOJ FAZI PROJEKTA**  
 Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL CALCULATION OF DOUBLE BOTTOM GRILLAGE OF BULK CARRIERS SHIPS IN CONCEPTUAL DESIGN STAGE**  
 Opis zadatka:

Brodove za rasuti teret karakterizira jako opterećena konstrukcija roštilja dvodna posebno u stanju alternativnog krcanja. Takvo stanje krcanja izaziva velike progibe i sekundarna naprezanja u konstrukciji roštilja dvodna posebno u praznim skladištima.

U radu je potrebno za postojeću konstrukciju roštilja dvodna broda za rasuti teret provesti proračun čvrstoće dvodna koristeći:

- metodu ortotropne ploče uz uporabu *Shade*-ovih dijagrama,
- metodu konačnih elemenata (MKE).

Usporediti rezultate dviju metoda na razini pomaka i sekundarnih naprezanja. Također je potrebno istražiti senzitivnost krutosti dvodna s obzirom na različite topologije roštilja dvodna varirajući neke od parametara konstrukcije (npr. razmak rebrenica, visina dvodna, pozicija i broj jakih uzdužnih nosača i sl.) koristeći metodu ortotropne ploče (*Shade*-ovih dijagrama).

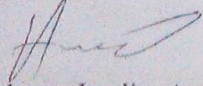
Kod proračuna metodom konačnih elemenata koristiti programski paket MAESTRO dostupan na FSB-u.

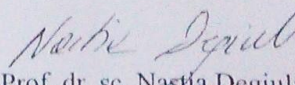
Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. ANALITIČKE METODE PRORAČUNA ORTOTROPNE PLOČE [4].....	4
2.1 Osnovne pretpostavke analitičkog proračuna ortotropnih ploča.....	5
2.2 Diferencijalna jednačina savijanja ortotropne ploče .....	6
2.3 Schadel-ova metoda .....	9
2.4 Potencijalna energija ortotropnih ploča .....	10
3. SCHADEOVA METODA PRORAČUNA ORTOTROPNE PLOČE [4] .....	12
3.1 Proračun opterećenja.....	15
3.2 Definiiranje tipa ploče i rubnih uvjeta .....	17
3.3 Proračun konstrukcije roštilja dvodna.....	19
3.4 Analiza rezultata .....	27
4. NUMERIČKI PRORAČUN ORTOTROPNE PLOČE.....	28
4.1 Izrada modela .....	29
4.2 Model sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	30
4.3 Model sa finom mrežom konačnih elemenata .....	34
4.4 Gredni model.....	38
4.5 Analiza rezultata numeričkog proračuna .....	40
4.6 Usporedba rezultata.....	40
5. ANALIZA SENZITIVNOSTI.....	42
5.1 Digitalizacija Schadeovih dijagrama .....	43
5.2 Matematička podloga [10] .....	44
5.2.1 Sume kvadrata.....	45

5.2.2	Stupnjevi slobode.....	46
5.2.3	Srednja vrijednost sume kvadrata .....	46
5.2.4	F test (F omjer).....	47
5.2.5	Analiza varijance na skupu podataka sa dva faktora .....	48
5.3	Provedba analize senzitivnosti .....	48
5.4	Optimizacija .....	57
6.	ZAKLJUČAK.....	60
	LITERATURA.....	61
	PRILOZI.....	62
	PRILOG A - Osnovni podaci o zadanoj konstrukciji .....	
	PRILOG B - Schadeovi dijagrami .....	
	PRILOG C - Proračun tlaka prema HRB-u.....	
	PRILOG D – Proračun ulaznih parametara za analizu senzitivnosti .....	
	PRILOG E - Rezultati analize varijance odzivnih varijabli .....	

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1	Prikaz konstruktivnih karakteristika skladišnog prostora [2].....	1
Slika 2.1	Diferencijalni element ortotropne ploče [4] .....	6
Slika 3.1	Tipovi ploča za Shadeovu metodu [4].....	12
Slika 3.2	Schadeov dijagram za progib u sredini[5].....	15
Slika 3.3	Stanja krcanja za proračun prema IACS-u[1] .....	16
Slika 3.4	Prvi slučaj opterećenja za proračun tlaka .....	16
Slika 3.5	Drugi slučaj opterećenja za proračun tlaka .....	17
Slika 3.6	Rubni uvjeti u uzdužnom smjeru[4].....	18
Slika 3.7	Rubni uvjeti u poprečnom smjeru [4].....	18
Slika 3.8	Matematički model ortotropne ploče .....	19
Slika 3.9	Uzdužni i poprečni presjek ortotropne ploče .....	19
Slika 3.10	Geometrijske karakteristike uzdužnih nosača .....	22
Slika 4.1	Diskretizacija modela grubom mrežom konačnih elemenata.....	30
Slika 4.2	Prikaz modela sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	30
Slika 4.3.	Prikaz rubnih uvjeta modela.....	31
Slika 4.4	Prikaz opterećenja modela.....	32
Slika 4.5	Prikaz deformacija modela sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	32
Slika 4.6	Prikaz normalnih naprezanja u uzdužnom smjeru modela sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	33
Slika 4.7	Prikaz normalnih naprezanja u poprečnom smjeru modela sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	33
Slika 4.8	Prikaz smičnih naprezanja modela sa grubom mrežom konačnih elemenata .....	34
Slika 4.9	Diskretizacija modela grubom finom konačnih elemenata .....	35
Slika 4.10	Prikaz modela sa finom mrežom konačnih elemenata .....	35
Slika 4.11	Prikaz deformacija modela sa finom mrežom konačnih elemenata .....	36



Slika 4.12	Prikaz normalnih naprezanja u uzdužnom smjeru modela sa finom mrežom konačnih elemenata .....	36
Slika 4.13	Prikaz naprezanja u poprečnom smjeru modela sa finom mrežom konačnih elemenata.....	37
Slika 4.14	Prikaz smičnih naprezanja modela sa finom mrežom konačnih elemenata .....	37
Slika 4.15	Gredni model.....	38
Slika 4.16	Prikaz deformacija grednog modela.....	38
Slika 4.17	Prikaz naprezanja u strukovima grednog elementa.....	39
Slika 4.18	Prikaz naprezanja u prirubnicama grednog elementa.....	39
Slika 5.1	Model za računalnu analizu senzitivnosti .....	49
Slika 5.2	Rezultati analize varijance pomaka .....	50
Slika 5.3	Prikaz utjecaja faktora A-A i C-C na pomak (progib) .....	51
Slika 5.4	Prikaz utjecaja faktora A-A i B-B na pomak (progib) .....	51
Slika 5.5	Rezultati analize varijance mase .....	52
Slika 5.6	Prikaz Pareto fronte kod odzivnih varijabli mase i pomaka.....	53
Slika 5.7	Rezultati analize varijance normalnih naprezanja.....	53
Slika 5.8	Rezultati analize varijance smičnih naprezanja u uzdužnom smjeru .....	54
Slika 5.9	Prikaz utjecaja faktora C-C i A-A na smično naprezanje .....	55
Slika 5.10	Prikaz utjecaja faktora B-B i A-A na smično naprezanje .....	55
Slika 5.11	Prikaz Pareto fronte za odzivne varijable mase i smičnog naprezanja.....	56
Slika 5.12	Rezultati analize varijance smičnih naprezanja u poprečnom smjeru.....	56
Slika 5.13	Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranju pomaka .....	57
Slika 5.14	Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranja mase.....	58
Slika 5.15	Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranja pomaka i mase .....	59

**POPIS TABLICA**

Tablica 3.1 Rezultati proračuna tlaka po HRB-u .....	17
Tablica 3.2 Osnovne geometrijske karakteristike opločenja .....	20
Tablica 3.3 Osnovne geometrijske karakteristike uzdužnih nosača .....	20
Tablica 3.4 Osnovne geometrijske karakteristike poprečnih nosača .....	21
Tablica 3.5 Težišta ortotropne ploče .....	23
Tablica 3.6 Izračunate geometrijske karakteristike uzdužnih nosača .....	23
Tablica 3.7 Izračunate geometrijske karakteristike poprečnih nosača .....	24
Tablica 3.8 Ulazni parametri za Shadeove dijagrame .....	24
Tablica 3.9 Volumen i masa ortotropne ploče .....	25
Tablica 3.10 Očitani koeficijenti za Shadeove dijagrame .....	26
Tablica 3.11 Rezultati proračuna dvodna kao ortotropne ploče.....	26
Tablica 4.1 Rubni uvjeti simetrije .....	31
Tablica 4.2 Usporedba rezultata analitičke i numeričke metode.....	41
Tablica 5.1 Parametri za analizu senzitivnosti .....	42
Tablica 5.2 Ullazni podaci za analizu varijance sa jednim parametrom .....	44
Tablica 5.3 Parametri za analizu varijance sa jednim faktorom.....	45
Tablica 5.4 Parametri za analizu varijance sa dva faktora .....	48

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$M_x$	Nm	Moment savijanja oko osi x
$M_y$	Nm	Moment savijanja oko osi y
$Q_x$	N	Poprečna sila u smjeru osi x
$Q_y$	N	Poprečna sila u smjeru osi y
$M_{xy}(M_{yx})$	Nm	Moment torzije
$\varepsilon_x$	/	Relativna deformacija u smjeru osi x
$\varepsilon_y$	/	Relativna deformacija u smjeru osi y
$\gamma$	/	Relativna smična deformacija
$z$	mm	Proizvoljna udaljenost od neutralne linije
$w$	mm	Progib
$e_{gx}$	mm	Udaljenost gornjeg pojasa od neutralne linije u smjeru osi x
$e_{dx}$	mm	Udaljenost donjeg pojasa od neutralne linije u smjeru osi x
$e_{gy}$	mm	Udaljenost gornjeg pojasa od neutralne linije u smjeru osi y
$e_{dy}$	mm	Udaljenost donjeg pojasa od neutralne linije u smjeru osi x
$\sigma_x$	N/mm <sup>2</sup>	Normalno naprezanje u smjeru osi x
$\sigma_y$	N/mm <sup>2</sup>	Normalno naprezanje u smjeru osi y
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$\mu$	/	Poissonov koeficijent
$G$	N/mm <sup>2</sup>	Modul smičnosti
$T_{gp}$	N	Smična sila na gornjem pojasu
$T_{dp}$	N	Smična sila u donjem pojasu
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Tlak
$a$	mm	Dulja stranica ploče
$b$	mm	Kraća stranica ploče
$s_a$	mm	Razmak uzdužnih nosača
$s_b$	mm	Razmak poprečnih nosača
$I_{na} (I_{nb})$	mm <sup>4</sup>	Moment tromosti duljih (kraćih) ukrepa uključivši nosivu širinu pojasa
$I_{pa} (I_{pb})$	mm <sup>4</sup>	Moment tromosti samo nosive širine pojasa duljih (kraćih) ukrepa
$I_a (I_b)$	mm <sup>4</sup>	Moment tromosti središnje pojačane ukrepe, uključivši nosivu širinu pojasa u smjeru dulje (kraće) stranice ploče
$A_a (A_b)$	mm <sup>2</sup>	Površina struka središnje pojačane ukrepe u smjeru dulje (kraće) stranice ploče
$e_a (e_b)$	mm	Krakovi za momente savijanja duljih (kraćih) ukrepa

		(udaljenost opločenja odnosno pojasa od neutralne linije)
$i_a$	$\text{mm}^3$	Jedinična krutost duljih nosača
$i_b$	$\text{mm}^3$	Jedinična krutost kraćih nosača
$\eta$	/	Torzioni koeficijent
$\rho$	/	Virtualni omjer stranica ploče
$m$	kg	Masa
$V$	$\text{cm}^3$	volumen
$K_1$	/	Koeficijent za progib u sredini
$K_2$	/	Koeficijent za normalno naprezanje opločenja u smjeru dulje stranice na sredini ploče
$K_3$	/	Koeficijent za normalno naprezanje struka smjeru dulje stranice na sredini ploče
$K_4$	/	Koeficijent za normalno naprezanje opločenja u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$K_5$	/	Koeficijent za normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$K_6$	/	Koeficijent za normalno naprezanje opločenja u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima
$K_7$	/	Koeficijent za normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima
$K_8$	/	Koeficijent za smično naprezanje u smjeru dulje stranice
$K_9$	/	Koeficijent za smično naprezanje u smjeru kraće stranice
$\sigma_x g$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje gornjeg opločenja u smjeru dulje stranice na sredini ploče
$\sigma_x d$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje donjeg opločenja u smjeru dulje stranice na sredini ploče
$\sigma_x g S$	$\text{N/mm}^2$	gornje normalno naprezanje struka smjeru dulje stranice na sredini ploče
$\sigma_x d S$	$\text{N/mm}^2$	donje normalno naprezanje struka smjeru dulje stranice na sredini ploče
$\sigma_y g$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje gornjeg opločenja u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$\sigma_y d$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje donjeg opločenja u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$\sigma_y g S$	$\text{N/mm}^2$	gornje normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$\sigma_y d S$	$\text{N/mm}^2$	donje normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na sredini ploče
$\sigma_y g$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje gornjeg opločenja u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima
$\sigma_y d$	$\text{N/mm}^2$	normalno naprezanje donjeg opločenja u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima

$\sigma_y$ g S	N/mm <sup>2</sup>	gornje normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima
$\sigma_y$ d S	N/mm <sup>2</sup>	donje normalno naprezanje struka u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima
$\tau_a$	N/mm <sup>2</sup>	smično naprezanje u smjeru dulje stranice
$\tau_b$	N/mm <sup>2</sup>	smično naprezanje u smjeru dulje stranice

## **SAŽETAK**

Završni rad se bavi problematikom sekundarne čvrstoće strukture dvodna odnosno konstrukcije roštilja dvodna, broda za rasuti teret pri nepovoljnim stanjima krcanja kao što je alternativno stanje krcanja.

U radu su kratko izneseni najosnovnije značajke brodova za rasuti teret, te je dana kratka teoretska osnova analitičkih metoda proračuna konstrukcije dvodna.

Tokom ovog rada napravljen je proračun konstrukcije roštilja dvodna broda za rasuti teret kao i analiza senzitivnosti parametara koji utječu na odzivne varijable konstrukcije dobivene proračunom. Proračun konstrukcije roštilja dvodna je proveden analitički metodom proračuna dvodna kao ortotropne ploče te numerički uz upotrebu metode konačnih elemenata pomoću programskog paketa MAESTRO.

Analiza senzitivnosti se temeljila na upotrebi statističke metode analize varijance koja je primijenjena upotrebom programskog paketa Design expert.

Ključne riječi:

- Čvrstoća dvodna
- Ortotropna ploča
- Shadeovi dijagrami
- Metoda konačnih elemenata
- Analiza senzitivnosti

## **SUMMARY**

The Bachelor paper deals with the issue of secondary strength of the bulk carrier's double bottom structure (double bottom grillage) when subjected to adverse loading conditions such as alternative loading condition.

This paper briefly presents the basic features of bulk carriers, and gives a short theoretical basis of analytical methods for structural analysis of double bottom.

During this work, structural analysis calculations of bulk carrier's double bottom grillage structure were carried out as well as the sensitivity analysis of parameters that influence the response variables obtained by the structure analysis calculations. The structural analysis calculations of double bottom structure were performed both analytically and numerically. The analytical calculations were performed by using an analytical method for structural analysis of orthotropic plates, while the numerical calculations were carried out using the finite element method with the use of the software package MAESTRO.

Sensitivity analysis was based on the use of statistical method of analysis of variance, which was applied using a software package Design expert.

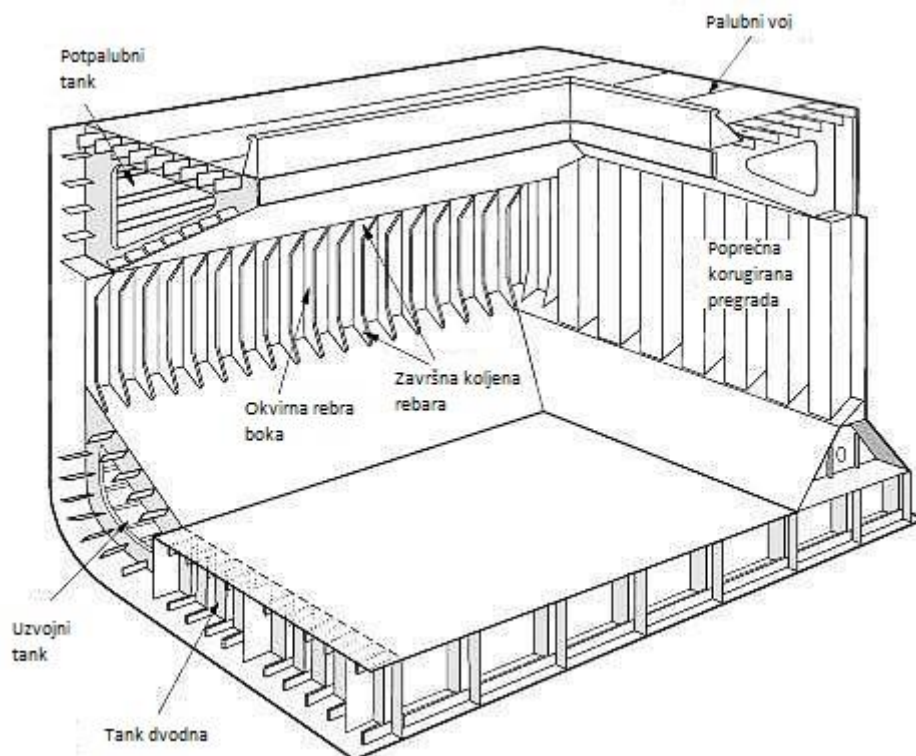
Key words:

- Double bottom strength
- Ortotropic plate
- Shade diagrams
- Finite element method
- Sensitivity analysis

## 1. UVOD

U današnje vrijeme za projektiranje i gradnju brodova za rasuti teret mjerodavna su IACS-ova (International Association of Classification Societies) Usuglašena zajednička pravila, Common structure rules for Bulk Carriers (CSR BC). Tako da su brodovi za rasuti teret (eng. Bulk Carrier) prema IACS-ovoj definiciji[1] pomorski, obično jedno palubni brodovi sa vlastitom propulzijom, čija se konstrukcija duljinom teretnog prostora sastoji od dvodna, uzvojnih tankova, pod palubnih (eng. wing) tankova te jednostruke ili dvostruke konstrukcije oplata, te su namijenjeni primarno za prijevoz različitog rasutog tereta u skladištima.

Ove su značajke tipične za brodove za prijevoz rasutog tereta te su uglavnom neovisne bez obzira na veličinu broda. Prikaz tipičnih konstruktivnih karakteristika skladišnog prostora broda za rasuti teret sa jednostrukom oplatom može se vidjeti na slici 1.1.



**Slika 1.1 Prikaz konstruktivnih karakteristika skladišnog prostora [2]**

Veličine brodova za rasuti teret ovise o zahtjevima brodovlasnika u pogledu nosivosti, te glavnih izmjera broda kao što su duljina, širina i visina. One su često ograničene raznim faktorima kao što su ruta plovidbe (ograničenja dimenzija luka u koje brod pristaje), analizom ekonomske isplativosti itd. Uobičajena nosivost se kreće između 30 000 i 150 000 tona.



S obzirom na nosivost brodovi za rasuti teret se mogu svrstati u šest kategorija:

- Mali - ispod 10 000 DWT
- Handysize - 10 000 - 35 000 DWT
- Handymax - 35 000 - 59 000 DWT
- Panamax - 60 000 - 80 000 DWT
- Capesize - 80 000 - 150 000 DWT
- Vrlo veliki - iznad 150 000 DWT

Tereti koji se uglavnom prevoze u rasutom stanju su ruda, ugljen, boksiti, šećer i žito. Gustoća tereta se koji se prevozi se kreće od 0.6 t/m<sup>3</sup> za žito pa sve do 3 t/m<sup>3</sup> za željeznu rudu. Tako da brodovi za prijevoz rasutog tereta moraju biti veoma fleksibilni u pogledu gustoće različitih tereta koje prevoze. U slučaju žita, cijeli volumen skladišta je potrebno ispuniti kako bi se brod doveo na projektni gaz. Međutim kad je riječ o željeznoj rudi manji volumen skladišta će biti potreban kako bi se brod doveo na projektni gaz. Tako da je razumno tada upotrijebiti koncept izmjeničnog krcanja, što znači da se teretom puni svako drugo skladište. S obzirom da brodovi za rasuti teret u pravilu imaju neparan broj skladišta, to bi značilo da se pri krcanju skladišta sa parnim brojem ostavljaju prazna.

Takav način krcanja ima svojih prednosti i mana. Prednosti su da će plovidba sa izmjenično nakrcanim skladištima donijeti bolje ponašanje broda pri plovidbi, radi smanjivanja metacentarske visine te izbjegavanja pretvrđog stabiliteta tj. kad je period ljuljanja broda kraći od 10 sekundi. Nadalje iskrcavanje i čišćenje skladišta je dakako jeftinije i jednostavnije kada su samo neka od skladišta u upotrebi. [3]

Nedostatci takvog načina krcanja očituju se u problemima sa sekundarnom čvrstoćom koji se javljaju u vidu većeg opterećenja dvodna u neparnim (praznim) skladištima, većih smičnih sila u blizini poprečnih pregrada te generalno većih strukturnih naprezanja.[3]

Ovaj rad se bavi proračunom konstrukcije roštilja dvodna za zadanu konstrukciju s obzirom na iznese probleme sa sekundarnom čvrstoćom pri alternativnom ili naizmjeničnom krcanju, te analizom senzitivnosti parametara koji utječu na odziv konstrukcije dobiven proračunom.

Proračun konstrukcije je proveden analitički i numerički. Proračuni su provedeni za zadanu konstrukciju broskog dvodna broda za prijevoz rasutog tereta. Nacrta konstrukcije i osnovni podatci se nalaze u prilogu A.

Završni rad je koncipiran kroz šest poglavlja:

1. Uvod
2. Analitičke metode proračuna ortotropne ploče
3. Schadeova metoda proračuna ortotropne ploče
4. Numerički proračun ortotropne ploče
5. Analiza senzitivnosti
6. Zaključak

Kroz prvo poglavlje je iznesen kratak opis brodova za rasuti teret i njihovih karakteristika, te iznesen problem na kojem se ovaj rad temelji.

U drugom poglavlju ovog rada dana je kratka teoretska osnova analitičkih metoda koje se koriste za proračun ortotropnih ploča.

U trećem poglavlju je prikazana Shadeova metoda proračuna broskog dvodna kao ortotropne ploče te je proveden proračun za zadanu strukturu.

U četvrtom poglavlju je proveden numerički proračun zadane strukture, prikazana je izrada modela, dobiveni rezultati, te konačno usporedba sa Shadeovom metodom.

Peto poglavlje ovog rada bavi se analizom senzitivnosti za proračun zadane strukture. U poglavlju je dana kratka matematička podloga metode analiza varijance kojom je provedena analiza senzitivnosti te rezultati analize.

U šestom poglavlju sumirani su zaključci dobiveni kroz ovaj rad.

## 2. ANALITIČKE METODE PRORAČUNA ORTOTROPNE PLOČE [4]

S obzirom na probleme sa sekundarnom čvrstoćom istaknute u uvodu ovog rada, jedan od zadataka ovog rada je prikazati proračun konstrukcije roštilja dvodna. Analitički proračun konstrukcije roštilja dvodna će biti proveden na principu proračuna ortotropne ploče. Ploče su površinski element što znači da su njene dvije dimenzije, duljina i širina znatno veće od treće, debljine. U brodskim konstrukcijama nailazimo na izotropne i ortotropne ploče. Izotropne ploče su one kod kojih je krutost u svim smjerovima jednaka. Ortotropne ploče imaju različitu krutost u dva međusobno okomita smjera. Kod čeličnih konstrukcija takvim se smatraju ploče ukrepljene ukrepama, koje se savijaju zajedno sa pločom, a imaju u dva međusobno okomita smjera različitu krutost na savijanje. Tako ako se promatra struktura broskog dvodna, točnije konstrukcija roštilja dvodna, može se uvidjeti analogija sa ortotropnom pločom. Uzdužni i poprečni nosači smješteni između oplata dna i pokrova dvodna, svaki sa svojom krutošću u uzdužnom i poprečnom smjeru čine ortotropnu ploču.

Rješavanje problema savijanja ortotropne ploče provodi se analogno kao i kod izotropnih ploča, postavljanjem diferencijalne jednačbe za savijanje ploče te nalaženjem njenog rješenja. Parcijalna diferencijalna jednačba ploče ne može se naći u zatvorenom obliku tako da se primjenjuju beskonačni redovi. Navier je 1820. godine ponudio rješenje koristeći dvostruke redove, dok je Levy 1899. godine ponudio rješenje koristeći jednostruke redove. Druga mogućnost dolaska do rješenja je koristeći poučak o minimumu totalne potencijalne energije.

Za proračun ortotropnih ploča u ovom radu će ukratko biti prikazana dva pristupa. Prvi je Schendelov postupak koji se bazira na rješavanju diferencijalnih jednačbi savijanja ortotropne ploče pomoću matematičkih redova kao što je primjerice dvostruki Fourierov red. Drugi pristup je energetski pristup koji se bazira na poučku o minimumu ukupne potencijalne energije, na kojoj se bazira i Shadeova metoda koja će se koristiti u ovom radu. Temelj ove

metode je iskazan sljedećom jednačbom: 
$$U_{\min} = \frac{\partial U_{\text{tot}}}{\partial w} = 0 \quad (2.1)$$

Izvodi su prikazani u sažetom obliku, neki koraci nisu prikazani jednačbama, već samo ukratko opisani, dok se detaljan izvod metoda može pronaći u [4].

## 2.1 Osnovne pretpostavke analitičkog proračuna ortotropnih ploča

Ploče mogu biti opterećene na jedan od sljedeća tri načina:

- 1) u vlastitoj ravnini
- 2) okomito na vlastitu ravninu
- 3) složeno opterećenje

U ovom radu će se dalje detaljnije prikazati slučaj kada su ploče opterećene okomito na vlastitu ravninu, odnosno razmatrati će se savijanje ploča. Razlog tome je način opterećenja brodskog dvodna. Okomito na brodsko dno, od ispod djeluje tlak od tekućine u kojoj se brod giba, dok od iznad, okomito na pokrov dvodna, djeluje sila od tereta koji se prevozi u skladištu. Kod slučaja alternativnog krcanja na prazno skladište djeluje samo sila tekućine okomito na dno te ga savija.

G. Kirchoff je 1850. godine razvio teoriju savijanja tankih ploča sa malim progibima. Teorija se razvila na osnovi sljedećih pretpostavki:

1. U središnjoj ravnini ploče nema deformacija. Ta ravnina smatra se zbog toga kod savijanja kao neutralna ravnina.
2. Točke koje su prije savijanja ploče bile na normali na središnju ravninu, ostaju na normali i na središnju ravninu savijene ploče
3. Normalna naprezanja okomita na ravninu ploče mogu se zanemariti.

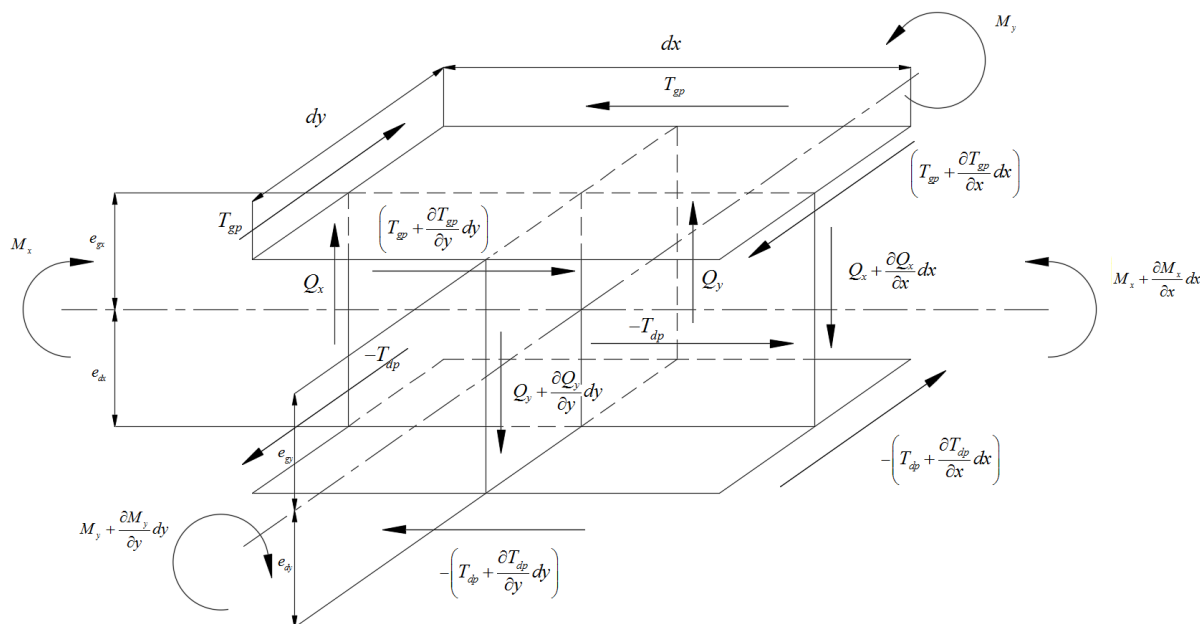
Koristeći gore navedene pretpostavke se mogu odrediti sve karakteristike savijanja krutih ploča u ovisnosti o progibu ploče  $w$ .

Karakteristike savijanja krute ploče:

- Momenti savijanja  $M_x$ ,  $M_y$
- Poprečne sile  $Q_x$  i  $Q_y$
- Torzioni momenti  $M_{xy}$ ,  $M_{yx}$
- Normalna naprezanja
- Smična naprezanja

## 2.2 Diferencijalna jednačba savijanja ortotropne ploče

Za izvođenje diferencijalne jednačbe savijanja ortotropne ploče nužno je promotriti ravnotežu sila na jednom diferencijalnom elementu ortotropne ploče. Diferencijalni element ortotropne ploče sastoji se od donjeg opločenja (brodskog dna) i gornjeg opločenja (pokrova dvodna) dimenzija  $dx \times dy$ , te strukova u uzdužnom smjeru (smjer osi  $x$ ) i poprečnom smjeru (smjer osi  $y$ ). Na slici 2.1 su prikazane sile na diferencijalnom elementu.



Slika 2.1 Diferencijalni element ortotropne ploče [4]

Polazi se od relativnih deformacija.

$$\text{U smjeru osi } x: \varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

$$\text{U smjeru osi } y: \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

$$\text{Smična deformacija: } \gamma = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.4)$$

U izraze za relativne deformacije (2.2) do (2.4) se uvrštava udaljenost gornjeg i donjeg pojasa od neutralne linije  $e_{gx}$  i  $e_{dx}$  u smjeru osi  $x$  te  $e_{gy}$  i  $e_{dy}$  smjeru osi  $y$ , te proizvoljna udaljenost  $z$  za relativne deformacije strukova u smjeru osi  $x$  i  $y$ , dok je smična deformacija strukova jednaka nuli. Uvrštavanjem tih vrijednosti dobiva se pripadna relativna deformacija gornjeg odnosno donjeg pojasa opločenja u smjerovima koordinatnih osi te pripadne linearne relativne deformacije struka u smjeru koordinatnih osi.

Zatim primjenom Hookeovog zakona za dvodimenzionalno stanje naprezanja:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) = -\frac{E}{1-\mu^2}z\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \quad (2.5)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) = -\frac{E}{1-\mu^2}z\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \quad (2.6)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \gamma G = \gamma \frac{E}{2(1+\mu)} = -\frac{E}{1+\mu}z\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y} \quad (2.7)$$

Gdje su:

- $E$  Youngov modul elastičnosti materijala
- $G$  modul smika
- $\mu$  Poissonov koeficijent kontrakcije

Mogu se dobiti izrazi za naprezanja opločenja u gornjem i donjem pojasu u smjerovima koordinatnih osi  $x$  i  $y$ , te izrazi za normalna naprezanja u strukovima.

Definicijske jednadžbe za momente savijanja:

$$M_x = \int_A \sigma_x z dA \quad (2.8)$$

$$M_y = \int_A \sigma_y z dA \quad (2.9)$$

$$M_{xy} = M_{yx} = \int_A \tau_{xy} z dA \quad (2.10)$$

S obzirom na definicijske jednadžbe za momente savijanja (2.8)-(2.10) mogu se izraziti jednadžbe za momente savijanja opločenja po jedinici duljine stranice elementa ploče:

$$M_{px} = -\frac{E}{1-\mu^2}\left(i_{px}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu i_{pxy}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \quad (2.11)$$

$$M_{py} = -\frac{E}{1-\mu^2}\left(i_{py}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu i_{pxy}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \quad (2.12)$$

Gdje su:

$$i_{px} = t_{gp}e_{gx}^2 + t_{dp}e_{dx}^2 \quad (2.13)$$

$$i_{py} = t_{gp}e_{gy}^2 + t_{dp}e_{dy}^2 \quad (2.14)$$

$$i_{pxy} = t_{gp} e_{gx} e_{gy} + t_{dp} e_{dx} e_{dy} \quad (2.15)$$

Također se mogu izraziti jednadžbe za momente savijanja u strukovima:

$$M_{sx} = -Ei_{sx} \frac{\partial^2 w}{dx^2} \quad (2.16)$$

$$M_{sy} = -Ei_{sy} \frac{\partial^2 w}{dy^2} \quad (2.17)$$

Gdje su:

$$i_{sx} = \frac{t_{sx}}{dx} \left( \frac{e_{gx}^3}{3} + \frac{e_{dx}^3}{3} \right) \quad (2.18)$$

$$i_{sy} = \frac{t_{sy}}{dy} \left( \frac{e_{gy}^3}{3} + \frac{e_{dy}^3}{3} \right) \quad (2.19)$$

Tako da je sveukupni moment savijanja jednak zbroju momenata savijanja opločenja (2.11),(2.12) i momenta savijanja struka (2.16),(2.17) po odgovarajućim koordinatnim osima:

$$M_x = M_{px} + M_{sx} = -E \left( i_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\mu}{1-\mu^2} i_{pxy} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.20)$$

$$M_y = M_{py} + M_{sy} = -E \left( i_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\mu}{1-\mu^2} i_{pxy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.21)$$

Gdje su:

$$i_x = i_{sx} + \frac{i_{px}}{1-\mu^2} = \frac{I_x}{dy} \quad (2.22)$$

$$i_y = i_{sy} + \frac{i_{py}}{1-\mu^2} = \frac{I_y}{dx} \quad (2.23)$$

Dok je smična sila jednaka po jedinici duljine stranice elementa ploče:

$$T_{gp} = \tau_{gp} t_{gp} = t_{gp} G(e_{gx} + e_{gy}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.24)$$

$$T_{dp} = \tau_{dp} t_{dp} = t_{dp} G(e_{dx} + e_{dy}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.25)$$

Kada su poznati izrazi za momente savijanja i smične sile mogu se izračunati poprečne sile iz uvjeta ravnoteže momenata koji zakreću oko osi x odnosno y. Izrazi za ravnotežu oko osi ovdje nisu prikazani, već samo sređeni izrazi za poprečne sile koji se dobiju iz tih jednadžbi:

$$Q_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} - e_{gx} \frac{\partial T_{gp}}{\partial y} + e_{dx} \frac{\partial T_{dp}}{\partial y} \quad (2.26)$$

$$Q_y = \frac{\partial M_y}{\partial x} - e_{gy} \frac{\partial T_{gp}}{\partial x} + e_{dy} \frac{\partial T_{dp}}{\partial x} \quad (2.27)$$

Pojedine derivacije iz gornjih izraza ovdje nisu prikazane već je samo dan konačni sređeni

izraz za poprečne sile uz napomenu da je modul smika  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  :

$$Q_x = -Ei_x \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - G(i_{px} + \frac{1+\mu}{1-\mu} i_{pxy}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \quad (2.28)$$

$$Q_y = -Ei_y \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} - G(i_{py} + \frac{1+\mu}{1-\mu} i_{pxy}) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \quad (2.29)$$

Uvjet ravnoteže poprečnih sila diferencijalnog elementa ploče glasi:

$$p dx dy + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dx dy = 0 \quad (2.30)$$

Odakle slijedi jednakost:

$$p = -\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (2.31)$$

Iz uvjeta ravnoteže poprečnih sila slijedi diferencijalna jednačba savijanja ortotropne ploče:

$$i_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + i_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2i_p \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{p}{E} \quad (2.32)$$

Gdje je:

$$i_p = \frac{1}{4(1+\mu)} (i_{px} + i_{py} + 2 \frac{1+\mu}{1-\mu} i_{pxy}) \quad (2.33)$$

### 2.3 Schnadel-ova metoda

Schnadelova metoda se temelji na rješavanju diferencijalne jednačbe ortotropne ploče (2.32) upotrebom matematičkih redova. Ako se za kontinuirano opterećenje koje djeluje na ortotropnu ploču, odnosno tlak, uzme izraz u obliku dvostrukog Fourierovog reda:



$$p(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{n\pi y}{b} \quad (2.34)$$

Može se izraziti rješenje za progib ortotropne ploče koja je učvršćena zglobno sljedećem obliku :

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 E} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{n\pi y}{b}}{i_x \left(\frac{m}{a}\right)^4 + i_y \left(\frac{n}{b}\right)^4 + 2i_p \frac{m^2}{a^2} \frac{n^2}{b^2}} \quad (2.35)$$

Ako je poznat izraz za progib onda se posljedično mogu i izračunati sve ostale karakteristike savijanja ortotropne ploče kao što su momenti savijanja, smične i poprečne sile te dakako normalna i tangencijalna naprezanja.

## 2.4 Potencijalna energija ortotropnih ploča

Kako bi se mogao primijeniti teorem o minimumu totalne potencijalne energije treba prvo izvesti izraz za potencijalnu energiju ortotropnih ploča. Potencijalna energija ortotropnih ploča se sastoji od dva dijela, od rada kojeg vrše momenti savijanja, te od rada kojeg vrše momenti torzije. Kada je poznat izraz za ukupnu potencijalnu energiju u ovisnosti o progibu može se naći i minimum energije prema formuli (2.1) koji odgovara ravnotežnom stanju za zadano opterećenje.

Udio od momenata savijanja:

$$dU_s = -\frac{1}{2} \left( M_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + M_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (2.36)$$

Ako se u tu formulu uvrste izrazi za momente (2.20) i (2.21) dobije se:

$$dU_s = \frac{1}{2} E \left[ i_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + i_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \frac{\mu}{1-\mu^2} i_{pxy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] dx dy \quad (2.37)$$

Udio od momenata torzije:

$$dU_t = \frac{1}{2} \left[ T_{gp} (e_{gx} + e_{gy}) \gamma_g - T_{dp} (e_{dx} + e_{dy}) \gamma_d \right] dx dy \quad (2.38)$$

Ako se u gornji izraz uvrste izrazi (2.24) i (2.25) dobije se:

$$dU_t = \frac{1}{2} \left[ G (e_{gx} + e_{gy})^2 t_{gp} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + G (e_{dx} + e_{dy})^2 t_{dp} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (2.39)$$

Odnosno:

$$dU_t = \frac{1}{2} \frac{E}{2(1+\mu)} (i_{px} + i_{py} + 2i_{pxy}) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy \quad (2.40)$$

Gdje su  $i_{px}$ ,  $i_{py}$ ,  $i_{pxy}$  dani formulama (2.13), (2.14) i (2.15)

Onda je ukupna potencijalna energija jednog diferencijalnog elementa ortotropne ploče jednaka zbroju potencijalne energije savijanja (2.37) i potencijalne energije torzije (2.40):

$$dU = dU_s + dU_t = \frac{1}{2} E \left[ i_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + i_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \frac{\mu}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} i_{pxy} + \frac{1}{2(1+\mu)} (i_{px} + i_{py} + 2i_{pxy}) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy \right] \quad (2.41)$$

Izraz za ukupnu potencijalnu energiju ortotropne ploče se dobije integriranjem po površini ploče:

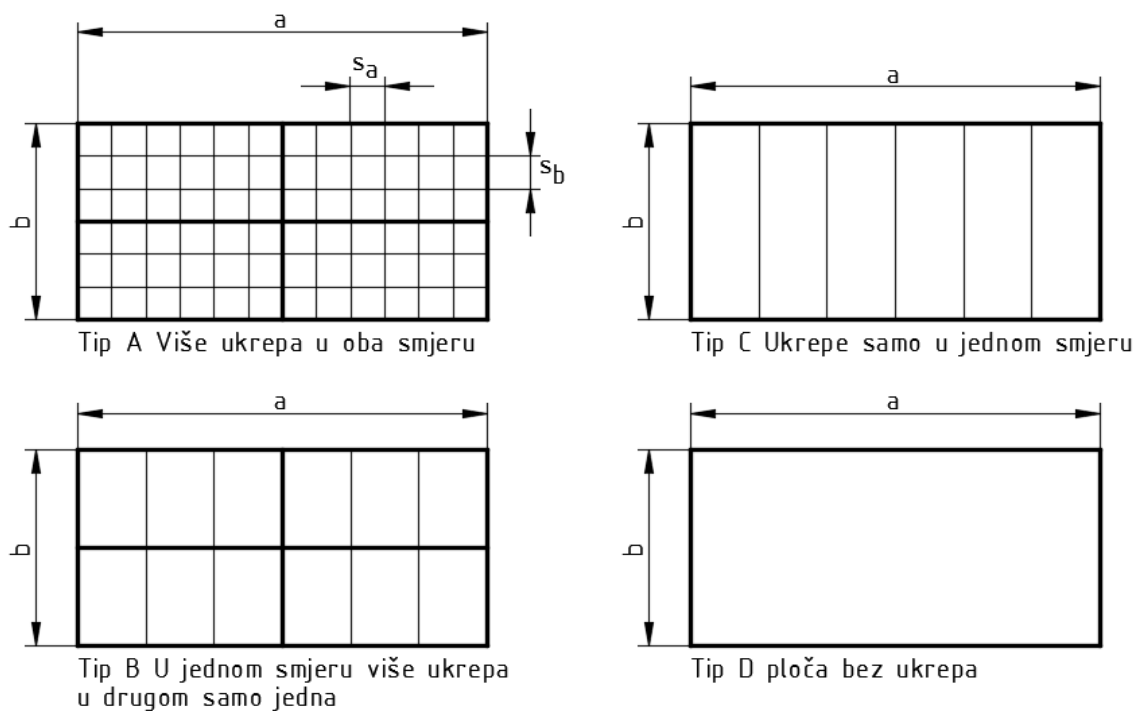
$$U = \frac{1}{2} E \int_0^a \int_0^b \left[ i_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + i_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \frac{\mu}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} i_{pxy} + \frac{1}{2(1+\mu)} (i_{px} + i_{py} + 2i_{pxy}) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy \right] \quad (2.42)$$

### 3. SCHADEOVA METODA PRORAČUNA ORTOTROPNE PLOČE [4]

H.A.Schade je na osnovi teorije ortotropnih ploča i minimumu totalnog potencija proračunao i konstruirao niz dijagrama za praktični proračun ortotropnih ploča pod kontinuiranim opterećenjem. Schade je imajući na vidu tipove brodskih konstrukcija proračun proveo za četiri različita tipa ortotropnih ploča prikazanih na slici 3.1 te za četiri različita slučaja učvršćenja tih istih.

Tipovi ortotropnih ploča:

- Tip A – Ukrepe su u oba smjera, središnja ukrepa jednog ili oba smjera može imati veću krutost od ostalih
- Tip B – U jednom smjeru je više ukrepa, od kojih središnja može biti pojačana, a u drugom samo jedna
- Tip C – Ukrepe samo u jednom smjeru
- Tip D – Ploča bez ukrepa ( izotropna ploča)



Slika 3.1 Tipovi ploča za Shadeovu metodu [4]

Slučajevi učvršćenja stranica ploče:

1. slučaj: Sve četiri stranice ortotropne ploče su zglobno učvršćene.
2. slučaj: Kraće stranice su potpuno upete, a dulje zglobno učvršćene.
3. slučaj: Dulje stranice su potpuno upete, a kraće zglobno učvršćene.
4. slučaj: Sve četiri stranice su potpuno upete.

Za očitavanje iz Schadeovih dijagrama su potrebna dva ulazna parametra:

- Za os apscisu  $\rho$  – virtualni omjer stranica  $\rho = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{i_b}{i_a}}$  (3.1)

- Za os ordinatu  $\eta$  – torzioni koeficijent  $\eta = \sqrt{\frac{I_{pa}}{I_{na}} \cdot \frac{I_{pb}}{I_{nb}}}$  (3.2)

Ulazni parametri za Schade-ove dijagrame se računaju iz geometrijskih karakteristika ortotropne ploče, gdje su:

- a - dulja stranica ploče
- b - kraća stranica ploče
- $s_a$  - razmak ukrepa paralelnih sa stranicom a
- $s_b$  - razmak ukrepa paralelnih sa stranicom b
- $I_{na}$  ( $I_{nb}$ ) - moment tromosti duljih (kraćih) ukrepa uključivši nosivu širinu pojasa
- $I_{pa}$  ( $I_{pb}$ ) - moment tromosti samo nosive širine pojasa duljih (kraćih) ukrepa
- $I_a$  ( $I_b$ ) - moment tromosti središnje pojačane ukrepe, uključivši nosivu širinu pojasa u smjeru dulje (kraće) stranice ploče
- $A_a$  ( $A_b$ ) - površina struka središnje pojačane ukrepe u smjeru dulje (kraće) stranice ploče
- $e_a$  ( $e_b$ ) - krakovi za momente savijanja duljih (kraćih) ukrepa (udaljenost opločenja odnosno pojasa od neutralne linije)

$$\bullet \quad i_a - \text{jedinična krutost duljih nosača} \quad i_a = \frac{I_{na}}{s_a} + 2 \frac{I_a - I_{na}}{b} \quad (3.3)$$

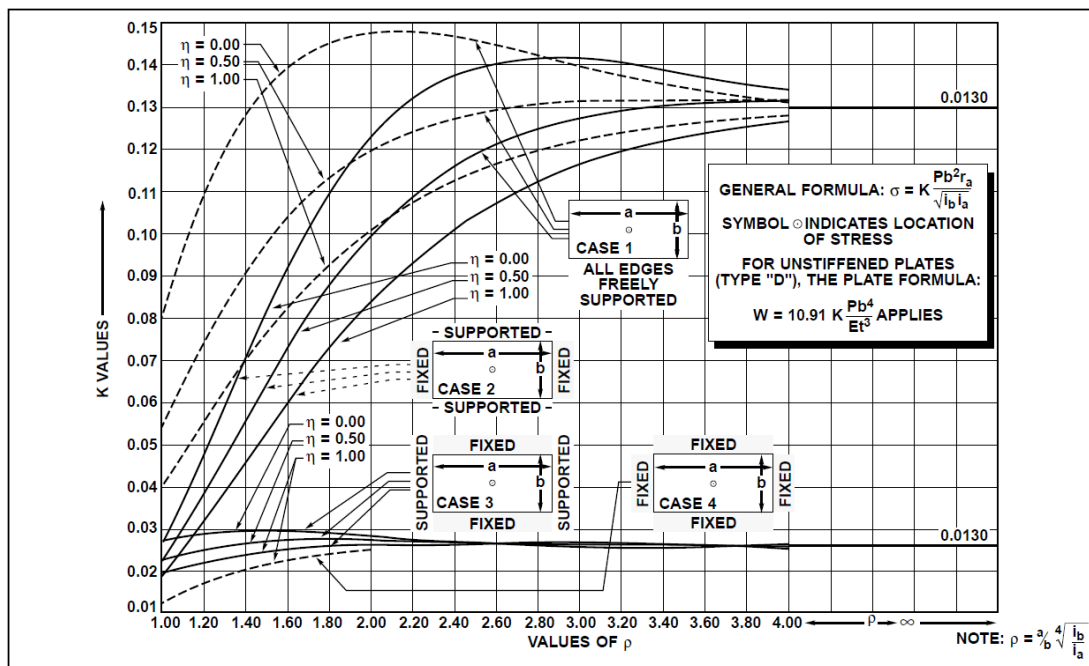
$$\bullet \quad i_b - \text{jedinična krutost kraćih nosača} \quad i_b = \frac{I_{nb}}{s_b} + 2 \frac{I_b - I_{nb}}{a} \quad (3.4)$$

Schade je konstruirao devet različitih dijagrama za izračun sljedećih karakteristika:

1. progib u sredini ploče
2. naprezanja savijanja u polju opločenja u smjeru dulje stranice
3. naprezanja savijanja u struku u smjeru dulje stranice
4. naprezanja savijanja u polju opločenja u smjeru kraće stranice
5. naprezanja savijanja u struku u smjeru kraće stranice
6. naprezanja savijanja opločenja na potpuno upetim rubovima
7. naprezanja savijanja struka na potpuno upetim rubovima
8. smična naprezanja u duljim ukrepama
9. smična naprezanja u kraćim ukrepama

Primjer Schadeovog dijagrama nalazi se na slici 3.2 gdje je prikazan dijagram za izračun progiba u sredini ploče, ostali dijagrami mogu se naći u prilogu B.

Za proračun gornjih karakteristika treba odrediti tip ploče i slučaj učvršćenja odnosno rubne uvjete. Pomoću geometrijskih karakteristika ploče treba izračunati ulazne parametre za dijagram, te očitati vrijednosti koeficijenta K za određeni slučaj učvršćenja. Koeficijent K se uvrsti u danu formulu za određeni tip ploče. Parametri u formulama za karakteristike savijanja koje je Shade izveo su koeficijent K, različite geometrijske karakteristike ploče te opterećenje u obliku tlaka.



Slika 3.2 Schadev dijagram za progib u sredini[5]

### 3.1 Proračun opterećenja

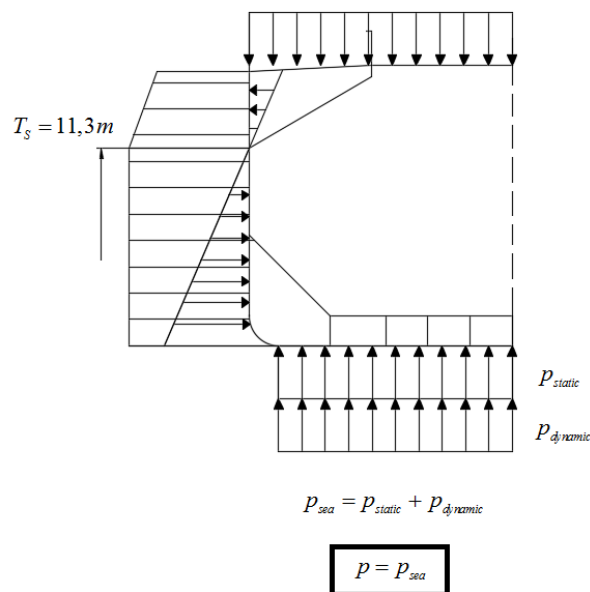
Kako bi se mogao provesti proračun potrebno je definirati opterećenje tj. tlak koje djeluje na konstrukciju. Prilikom proračuna broda za rasuti teret prema IACS-ovim pravilima definiran je cijeli niz stanja krcanja koja treba provjeriti. Dio tih stanja je prikazan na slici 3.3. Za potrebe ovog proračuna izračunat je tlak za samo dva stanja krcanja koja su najnepogodnija za sekundarnu čvrstoću dvodna broda za rasuti teret. To je stanje alternativnog krcanja kada su skladišta naizmjenično punjena teretom, stanje krcanja je označeno crvenom bojom na slici 3.3. Drugo stanje je stanje „teškog“ balasta kada je brod na minimalnom balastnom gazu a neka od skladišta su ispunjena morskom vodom kako bi se to postiglo, stanje krcanja je označeno plavom bojom na slici 3.3. Veće opterećenje dobiveno razmatrajući ta dva slučaja krcanja uzima se kao mjerodavno te se koristi prilikom proračuna konstrukcije roštilja dvodna.

Slučajevi opterećenja u odabranim stanjima krcanjima prikazani su na slikama 3.4 i 3.5.

No.	Description <sup>a)</sup>	Draught	Loading Pattern	Aft	Mid	Fore	Load Case (Design Wave)			Remarks (see below)
							Still water vertical bending moment <sup>b)</sup>			
8	Multi Port -4 ([3.3.4])	0.75T <sub>s</sub>					F2	P1		3), 6)
							M <sub>SW,H</sub>	M <sub>SW,S</sub>		
9	Multi Port -4 ([3.3.4])	0.75T <sub>s</sub>					F2	P1		3), 6)
							M <sub>SW,H</sub>	M <sub>SW,S</sub>		
10	Alternate Load ([3.4.1])	T <sub>s</sub>					F2	P1		2)
							M <sub>SW,H</sub>	0		
11	Alt-Block Load ([3.4.3])	T <sub>s</sub>					H1	F2	P1	2), 8), 9), 10)
							M <sub>SW,S</sub>	M <sub>SW,H</sub>	M <sub>SW,S</sub>	
12	Alt-Block Load ([3.4.3])	T <sub>s</sub>					H1	F2	P1	2), 8), 9), 10)
							M <sub>SW,S</sub>	M <sub>SW,H</sub>	M <sub>SW,S</sub>	
13	Heavy Ballast ([3.5.1])	T <sub>HB(min)</sub>					H1	R1	R1	11), 12)
							M <sub>SW,S</sub>	0	M <sub>SW,S</sub>	
14	Heavy Ballast	T <sub>HB(min)</sub>					R1	R1		11), 12), 13)
							0	M <sub>SW,S</sub>		
15	Harbour Condition -2 ([3.6.2])	0.67T <sub>s</sub>					—	—		3), 14), 15)
							M <sub>SW,P,H</sub>	M <sub>SW,P,S</sub>		

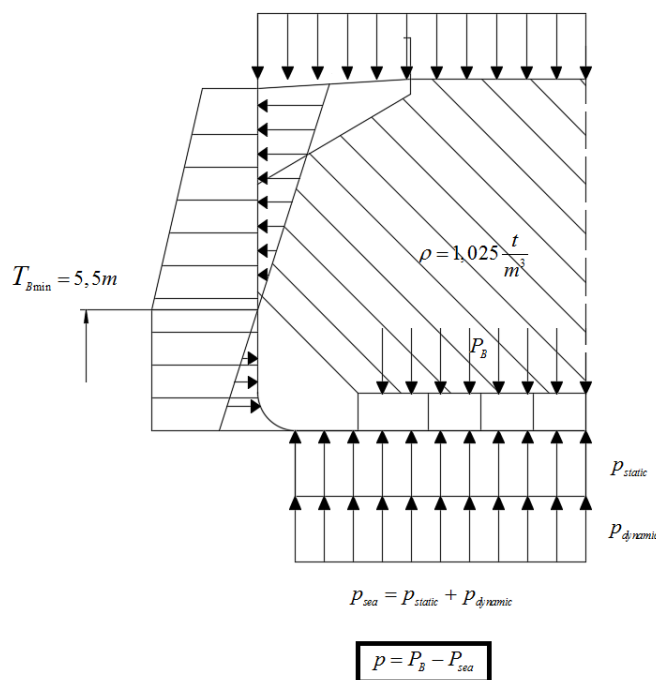
Slika 3.3 Stanja krcanja za proračun prema IACS-u[1]

Prvi slučaj opterećenja (stanje alternativnog krcanja):



Slika 3.4 Prvi slučaj opterećenja za proračun tlaka

Drugi slučaj opterećenja (balastno stanje):



**Slika 3.5 Drugi slučaj opterećenja za proračun tlaka**

Proračun tlaka je proveden prema pravilima HRB [6] za odabrane slučajeve opterećenja, te su rezultati prikazani u tablici 3.1. Cjelokupni proračun tlakova se nalazi u prilogu C.

**Tablica 3.1 Rezultati proračuna tlaka po HRB-u**

SLUČAJ OPTEREĆENJA	TLAK [kN/m <sup>2</sup> ]
I slučaj – alternativno krcanje	142,52
II slučaj – teški balast	93,68

Može se primijetiti kako je tlak koji djeluje na strukturu veći kod stanja alternativnog krcanja, te će se koristiti u daljnjem proračunu.

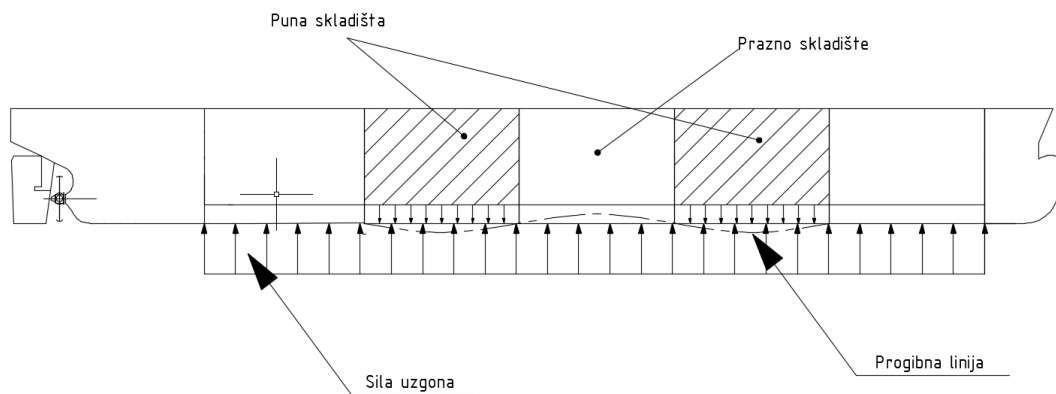
### 3.2 Definiranje tipa ploče i rubnih uvjeta

Struktura dvodna se sastoji od dna, pokrova dvodna te uzdužnih i poprečnih nosača, tako da je očito da tip A (više ukrepa u oba smjera) najbolje odgovara kod pretpostavljanja dvodna kao ortotropne ploče. No međutim treba imati na umu ograničenja metode, koja propisuje da razmak između ukrepa mora biti uniforman što nije slučaj kod zadane konstrukcije. Tako da

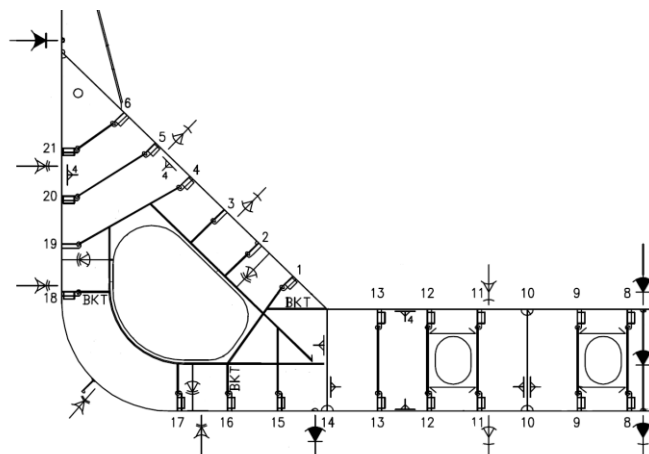


se u proračun ulazi sa srednjom vrijednosti razmaka uzdužnih ukrepa koja je dobivena dijeljenjem širine sa brojem ukrepa. Drugo pojednostavljenje je to da se uzela srednja vrijednost debljina ukrepa s obzirom da i njihove karakteristike trebaju biti uniformne. No međutim iskoristila se mogućnost koji nudi tip A ortotropne ploče da se definiraju centralne ukrepe u uzdužnom i poprečnom smjeru koje imaju različite karakteristike od ostalih.

Što se tiče rubnih uvjeta, pretpostavka je da su uzdužne stranice, tj. dulje ukrepljene dok su poprečne, tj. kraće zglobno oslonjene. S obzirom da je uzet najnepovoljniji slučaj opterećenja broda za rasuti teret, naizmjenično krcanje skladišta, onda elastična linija uzdužnih nosača dna ima na poprečnim pregradama točku infleksije, kao što je prikazano na slici 3.6, pa se može smatrati da su ti nosači na svojim krajevima zglobno učvršćeni. Zbog spoja s jakim koljenima na bokove broda, kao što je prikazano na slici 3.7, može se smatrati da su rebrenice upete na svojim krajevima.[4]

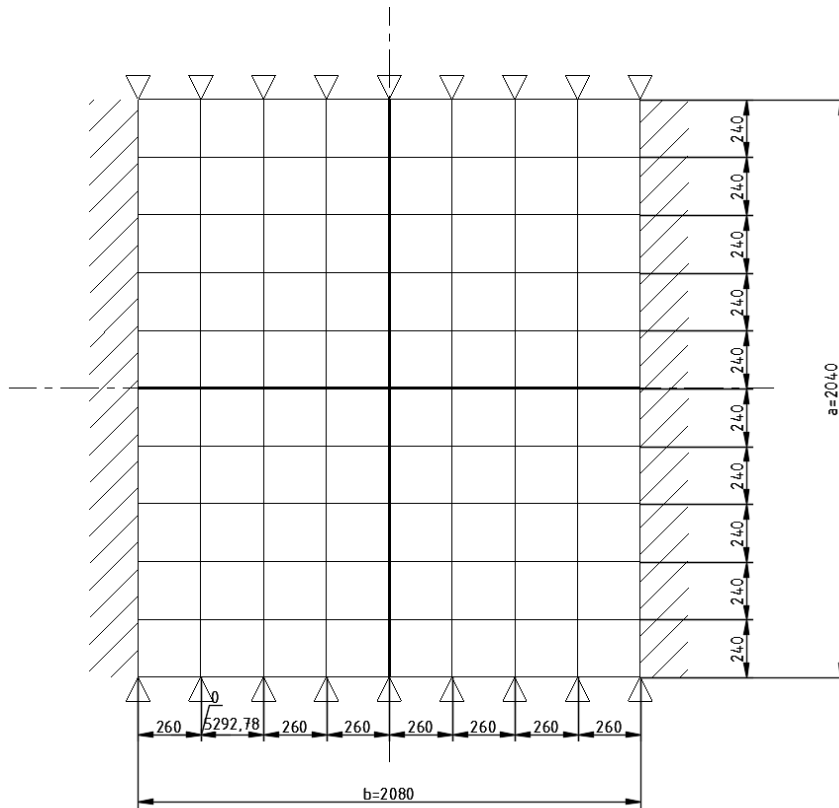


**Slika 3.6 Rubni uvjeti u uzdužnom smjeru[4]**



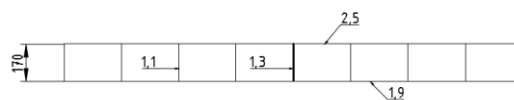
**Slika 3.7 Rubni uvjeti u poprečnom smjeru [4]**

Tako da matematički model koji se koristi za ovaj proračun prikazan na slikama 3.8 i 3.9. Sve mjere su dane u centimetrima.

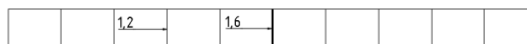


**Slika 3.8 Matematički model ortotropne ploče**

Poprečni presjek



Uzdužni presjek



**Slika 3.9 Uzdužni i poprečni presjek ortotropne ploče**

### 3.3 Proračun konstrukcije roštilja dvodna

Proračun pomoću Shadeove metode napravljen je uporabom programskog paketa Excel tako da se napravio tablični kalkulator u koji su unesene sve geometrijske karakteristike koje su zadane samom geometrijom konstrukcije i mogu se iščitati iz matematičkog modela. One su prikazane u tablicama 3.2, 3.3 i 3.4

**Tablica 3.2 Osnovne geometrijske karakteristike opločenja**

OSNOVNE GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE OPLOČENJA		
dulja stranica [cm]	$a$	2400
kraća stranica [cm]	$b$	2080
ukupna visina dvodna [cm].	$h$	174,4
debljina oplata dna [cm]	$t_d$	1,9
površina uzdužnjaka dna [cm <sup>2</sup> ]	$A_u^d$	36,1
broj uzdužnjaka u donjem pojasu (dno)	$n_d$	2
debljina pokrova dvodna [cm]	$t_g$	2,5
površina uzdužnjaka pokrova dna [cm <sup>2</sup> ]	$A_u^g$	49,7
broj uzdužnjaka u donjem pojasu (pokrov dvodna)	$n_g$	2

U tablici 3.2 može se primijetiti kako su također i uzdužnjaci gornjeg i donjeg opločenja dvodna uključeni u geometrijske karakteristike ploče. Razlog tome je što oni pridonose na krutosti na savijanje pa je njihova površina uzeta u obzir kod izračuna momenata tromosti uzdužnih nosača.

**Tablica 3.3 Osnovne geometrijske karakteristike uzdužnih nosača**

OSNOVNE GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE NOSAČA		
UZDUŽNI NOSAČI		
broj uzdužnih nosača	$n_a$	7
širina pojasa uzdužnog nosača [cm]	$s_a$	260
CENTRALNI UZDUŽNI NOSAČ		
debljina struka centralnog nosača [cm]	$t_{sa}$	1,3
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	$A_a$	226,72
OSTALI UZDUŽNI NOSAČI		
debljina struka ostalih nosača [cm]	$t_{sna}$	1,1

Tablica 3.4 Osnovne geometrijske karakteristike poprečnih nosača

REBRENICE		
broj rebrenica	$n_b$	11
širina pojasa rebrenice [cm]	$s_b$	240
CENTRALNA REBRENICA		
debljina struka centralne rebrenice [cm]	$t_{sb}$	1,6
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	$A_b$	279,04
OSTALE REBRENICE		
debljina struka ostalih rebrenica [cm]	$t_{snb}$	1,2
TLAK [N/cm <sup>2</sup> ]	$p$	14,252
modul elastičnosti [N/cm]	$E$	21.000.000,00

Zatim su izračunate ostale geometrijske karakteristike koje se ne mogu direktno iščitati iz matematičkog modela kao što su težišta, površine i momenti inercije, već se računaju iz osnovnih geometrijskih karakteristika. Izrazi koji se koriste za proračun karakteristika koje su vezane za uzdužne nosače su dane u nastavku, dok jednadžbe vezane za poprečne nosače nisu prikazane jer su potpuno analogne. Jednadžbe za težišta su dane izrazima (3.5), zatim jednadžbe za površine su dane izrazima (3.6):

$$z_d = \frac{t_d}{2}, z_s = t_d + \frac{h_s}{2}, z_g = t_d + h_s + \frac{t_g}{2} \quad (3.5)$$

$$A_{pa}^d = s_a t_d, A_{pa}^g = s_a t_g, A_{sa} = h_s t_{sa}, A_{sna} = h_s t_{sna} \quad (3.6)$$

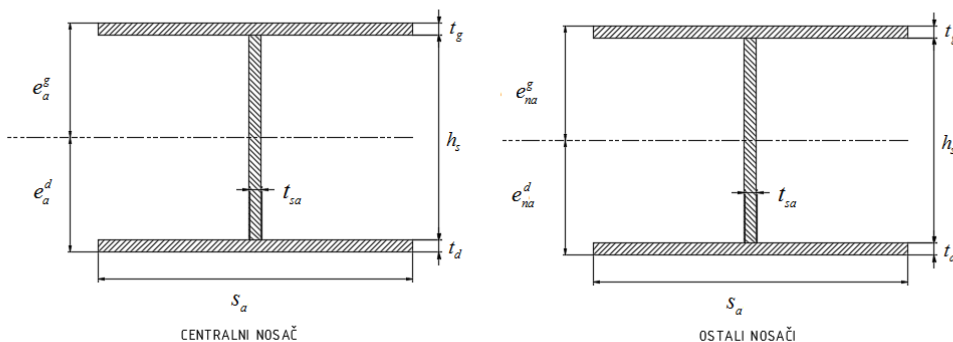
Jednadžbe za udaljenosti pojaseva od težišta su dane izrazima (3.7) i (3.8):

$$e_a(e_a^d) = \frac{z_d A_{pa}^d + z_g A_{pa}^g + z_s A_{sa}}{A_{pa}^d + A_{pa}^g + A_{sa}}, e_a^g = h_s - e_a^d \quad (3.7)$$

$$e_{na}(e_{na}^d) = \frac{z_d A_{pa}^d + z_g A_{pa}^g + z_s A_{sna}}{A_{pa}^d + A_{pa}^g + A_{sna}}, \quad e_{na}^g = h_s - e_{na}^d \quad (3.8)$$

Udaljenosti pojasa opločenja od težišta i geometrijske karakteristike uzdužnih nosača su prikazani na slici 3.10, prikaz za poprečne nosače nije prikazan s obzirom da je analogan sa uzdužnim nosačima.

## UZDUŽNI NOSAČI



Slika 3.10 Geometrijske karakteristike uzdužnih nosača

Jednadžba za moment inercije samo nosive širine centralnog uzdužnog nosača je dana izrazom (3.9), dok je moment inercije cijelog centralnog nosača dan izrazom (3.10), za ostale uzdužne nosače vrijede izrazi (3.11) i (3.12). Jednadžbe za poprečne nosače su analogne ovima uz iznimku da se ne uzima površina uzdužnjaka u obzir.

$$I_a' = \left[ \frac{(s_a t_d^3)}{12} + (A_{pa}^d + (A_u^d n_d))(e_a^d - z_d) \right] + \left[ \frac{(s_a t_g^3)}{12} + (A_{pa}^g + (A_u^g n_g))(e_a^d - \frac{t_d}{2}) \right] \quad (3.9)$$

$$I_a = I_a' + \left[ \frac{h^3 t_s}{12} + (A_{sa} (e_a^d - z_s)^2) \right] \quad (3.10)$$

$$I_{pa} = \left[ \frac{(s_a t_d^3)}{12} + (A_{pa}^d + (A_u^d n_d))(e_{na}^d - z_d) \right] + \left[ \frac{(s_a t_g^3)}{12} + (A_{pa}^g + (A_u^g n_g))(e_{na}^d - \frac{t_d}{2}) \right] \quad (3.11)$$

$$I_{pa} = I_{na} + \left[ \frac{h^3 t_s}{12} + (A_{sna} (e_{na}^d - z_s)^2) \right] \quad (3.12)$$

Prikaz rezultata izračunatih geometrijskih karakteristika je dan u tablici 3.5, 3.6 i 3.7

Tablica 3.5 Težišta ortotropne ploče

PRORAČUN GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA		
TEŽIŠTA		
težište donjeg pojasa lima [cm]	$z_d$	0,95
težište struka [cm]	$z_s$	86,9
težište gornjeg pojasa lima [cm]	$z_g$	173,15

Tablica 3.6 Izračunate geometrijske karakteristike uzdužnih nosača

UZDUŽNI NOSAČI		
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pa}^d$	494
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pa}^g$	650
površina struka centralnog uzdužnog nosača [cm <sup>2</sup> ]	$A_{sa}$	221
površina struka ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>2</sup> ]	$A_{sna}$	187
težište centralnog uzdužnog nosača [cm]	$e_a (e_a^d)$	96,87
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_a^g$	77,53
težište ostalih uzdužnih nosača [cm]	$e_{na} (e_{na}^d)$	97,12
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_{na}^g$	77,28
moment tromosti samo nosive širine cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{a'}$	9570405
moment tromosti poprečnog presjeka cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_a$	10124596
moment tromosti nosive širine ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{pa}$	9569034
krutost u uzdužnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	$I_{na}$	10038926
jedinična krutost duljih nosača [cm <sup>3</sup> ]	$i_a$	38693,63

**Tablica 3.7 Izračunate geometrijske karakteristike poprečnih nosača**

POPREČNI NOSAČI		
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pb}^d$	456
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pb}^g$	600
površina struka centralne rebrenice [cm <sup>2</sup> ]	$A_b^s$	272
površina struka ostalih rebrenica [cm <sup>2</sup> ]	$A_{nb}^s$	204
težište centralnog poprečnog nosača [cm]	$e_b (e_b^d)$	96,36
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_b^g$	78,04
težište ostalih poprečnih nosača [cm]	$e_{ba} (e_{ba}^d)$	96,87
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_{nb}^g$	77,53
moment tromosti nosive širine cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{b'}$	8932875
moment tromosti poprečnog presjeka cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_b$	9612260
moment tromosti poprečnog presjeka poprečnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{pb}$	8929810
krutost u poprečnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	$I_{nb}$	9441370
jedinična krutost kraćih nosača [cm <sup>3</sup> ]	$i_b$	39481,45

Kada su bile poznate sve geometrijske karakteristike izračunali su se parametri za očitavanje iz Shadeovih dijagrama. Podaci za očitavanje su prikazani u tablici 3.8.

**Tablica 3.8 Ulazni parametri za Shadeove dijagrame**

PODACI ZA OČITANJE		
torzioni koeficijent	$\eta$	0,95
virtualni omjer stranica	$q$	1,16

Nakon toga su se očitani potrebni koeficijenti potrebni za proračun progiba, normalnih i smičnih naprezanja uslijed savijanja koja su definirana Shadeovim dijagramima. Očitani koeficijenti su prikazani u tablici 3.10. Ti koeficijenti su se uvrstili u jednadžbe (3.13) do (3.21), te su rezultati proračuna prikazani u tablici 3.11. Osim navedenih karakteristika se izračunao i volumen ploče te masa, s obzirom da je to jedna od važnijih projektnih varijabli u brodogradnji, te ima značajnu ulogu u procesu odlučivanja pri projektiranju. Prikaz volumena i mase se može naći u tablici 3.9.

**Tablica 3.9** Volumen i masa ortotropne ploče

VOLUMEN[cm <sup>3</sup> ]	V	29996960
MASA [kg]	m	235476,10

$$\text{Progib u sredini: } w = K_1 \frac{pb^4}{Ei_b} \quad (3.13)$$

$$\text{Naprezanje u polju opločenja u smjeru dulje stranice: } \sigma = K_2 \frac{pb^2e_a}{\sqrt{i_a i_b}} \quad (3.14)$$

$$\text{Naprezanje savijanja u polju opločenja u smjeru kraće stranice: } \sigma = K_3 \frac{pb^2e_b}{i_b} \quad (3.15)$$

$$\text{Naprezanje u polju opločenja u smjeru dulje stranice: } \sigma = K_4 \frac{pb^2e_a}{\sqrt{i_a i_b}} \quad (3.16)$$

$$\text{Naprezanje savijanja u polju opločenja u smjeru kraće stranice: } \sigma = K_5 \frac{pb^2e_b}{i_b} \quad (3.17)$$

$$\text{Naprezanje savijanja opločenja na potpuno upetim mjestima } \sigma = K_6 \frac{pb^2e_b}{i_b} \quad (3.18)$$

$$\text{Naprezanje savijanja strukova na potpuno upetim mjestima } \sigma = K_7 \frac{pb^2e_b}{i_b} \quad (3.19)$$

$$\text{Smično naprezanje u duljim ukrepama: } \tau = K_8 \frac{pbI_a}{A_a^4 \sqrt{i_a^3 i_b}} \quad (3.20)$$

$$\text{Smično naprezanje u duljim ukrepama: } \tau = K_9 \frac{pbI_b}{A_b i_b} \quad (3.21)$$



Tablica 3.10 Očitani koeficijenti za Shadeove dijagrame

KOEFICIJENTI za:		
progib u sredini	$K_1$	0,00209
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče	$K_2$	0,0248
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče	$K_3$	0,0130
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	$K_4$	0,0406
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	$K_5$	0,0326
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	$K_6$	0,0820
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	$K_7$	0,0748
smično naprezanje u smjeru dulje stranice	$K_8$	0,204
smično naprezanje u smjeru kraće stranice	$K_9$	0,506

Tablica 3.11 Rezultati proračuna dvodna kao ortotropne ploče

progib u sredini ploče [cm]	w	0,67
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x g$	3033,41
	$\sigma_x d$	3789,73
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x g S$	1588,81
	$\sigma_x d S$	1984,94
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y g$	4944,96
	$\sigma_y d$	6105,15
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y g S$	3968,40
	$\sigma_y d S$	4899,47
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y g$	9989,89
	$\sigma_y d$	12333,72
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y g S$	9117,49
	$\sigma_y d S$	11256,63
smično naprezanje u smjeru dulje stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_a$	6942,59
smično naprezanje u smjeru kraće stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_b$	13097,09

### **3.4 Analiza rezultata**

Kada se promotre rezultati vide se da su u skladu sa očekivanjima. Naprezanja savijanja na sredini dvodna u donjem opločenju su veća nego u gornjem. Razlog tome je pomak neutralne linije prema gore zbog same geometrije konstrukcije roštilja. Naprezanja savijanja u struku su manja od onih u opločenju, što je isto logično s obzirom na raspored naprezanja prilikom savijanja. Smično naprezanje je veće u smjeru kraće stranice, što je isto bilo za očekivati sa obzirom da se rebrenice ponašaju kao glavne grede koje preuzimaju većinu opterećenja, dok se jaki uzdužni nosači ponašaju kao ukrižane grede, kao što je opisano u [7] kod proračuna roštilja.

#### 4. NUMERIČKI PRORAČUN ORTOTROPNE PLOČE

Osim analitičkog proračuna konstrukcije roštilja dvodna u ovom radu je proveden i numerički proračun primjenom metode konačnih elemenata, korištenjem programskog paketa MAESTRO. Metoda konačnih elemenata (MKE) je najčešće korištena metoda za numeričke proračune konstrukcija.

Metoda se temelji na fizičkoj diskreditaciji kontinuuma. Za kontinuum se smatra kako je to cjelina koja je beskonačno djeljiva te se kao takva ima beskonačni broj stupnjeva slobode. U inženjerskoj primjeni metode kontinuum je zapravo struktura koja se razmatra i želi proračunati. Tako da se struktura sa beskonačnim brojem stupnjeva slobode zamjenjuje se diskretnim modelom ograničenim brojem stupnjeva slobode. Diskretizacija se vrši podjelom strukture na konačan broj područja (elemenata) međusobno povezanih u zajedničkim točkama (čvorovima). Karakteristike elementa koje su od značaja za proračun strukture kao što su polje pomaka, deformacija, naprezanja opisuju se pomoću interpolacijskih funkcija. Interpolacijske funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete kako bi se model što više približio ponašanju razmatrane strukture u stvarnosti. Također treba paziti na pravilnu formulaciju konačnog elementa s obzirom na dio strukture koji zamjenjuje i na njeno ponašanje u fizikalnom svijetu, kako bi se postigla odgovarajuća točnost. Za svaki element zasebno se postavlja niz algebarskih jednadžbi čije su nepoznanice čvorne vrijednosti elemenata. Nakon toga se odgovarajućim postupcima formira globalni sustav jednadžbi čije su nepoznanice čvorne veličine svih elemenata diskretiziranog područja. [8]

S obzirom da realne strukture treba diskretizirati sa velikim brojem elemenata, dobije se veliki broj jednadžbi koje je potrebno riješiti tako da je neophodno koristiti računalne programe za realne probleme. U ovom radu je korišten računalni program MAESTRO koji je prvenstveno namijenjen za proračun brodskih konstrukcija.

Provedbom numeričkog proračuna dobila se mogućnost za usporedbu rezultata analitičkog i numeričkog proračuna, te samim time i mogućnost evaluacije praktičnog proračuna pomoću Shadeovih dijagrama. S obzirom na raširenu primjenu i dobru pouzdanost MKE može se ocijeniti Shadeova metoda u usporedbi sa MKE. Naravno pritom je uvijek potrebna određena količina opreza. Treba paziti da li su rezultati koji se dobivaju u skladu sa očekivanjima koja su temeljena na teoriji i prijašnjem iskustvu. U nastavku je opisan postupak modeliranja i

proračuna konstrukcije roštilja dvodna za zadano opterećenje tj. tlak koji je dan u prethodnom poglavlju.

#### 4.1 Izrada modela

Za izradu modela je prvenstveno potrebno odrediti čvorove pomoću kojih će struktura biti diskretizirana. Za određivanje čvorova potrebno je prvo strukturu koja se želi modelirati podijeliti na logičan način. Tako da se čvorovi obavezno postavljaju na spoju jakih nosača sa pripadajućim opločenjem, mjestima promjene debljine opločenja i promjene vrste ukrepa. Između obaveznih čvorova se može postaviti još proizvoljan broj čvorova te se na taj način utječe na gustoću mreže konačnih elemenata. Sa većom gustoćom se naravno postiže i veća preciznost, no gustoća mreže treba biti određena racionalno.

Zatim je potrebno čvorove sa strukture u obliku prostornih koordinata (x,y,z) prenijeti u računalni program MAESTRO, za to je potrebno poznavati kako je definiran koordinatni sustav unutar samog programa, odnosno položaj ishodišta i orijentacije globalnih osi. Razlog tome je da MAESTRO ne koristi uobičajeni desni Kartezijev koordinatni sustav.[9]

Unutar računalnog programa MAESTRO globalni koordinatni sustav je definiran na sljedeći način:

- ishodište koordinatnog sustava nalazi se u sjecištu centralne ravnine i osnovice
- globalna os X proteže se u smjeru uzdužne ravnine broda i pozitivna je prema naprijed
- globalna os Z proteže se u poprečnom smislu i pozitivna je prema desno od osi X
- globalna os Y proteže se u vertikalnom smjeru, okomita je na XZ ravninu, prolazi kroz sjecište osi X i osi Z te je pozitivna prema gore

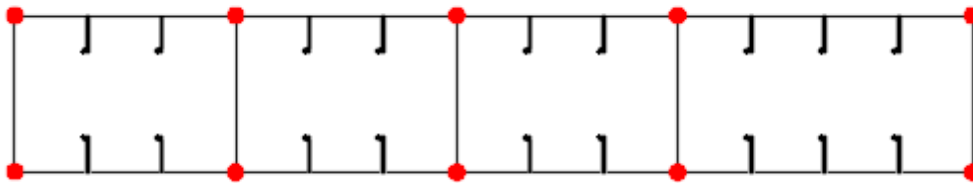
Nakon definiranja čvorova se definiraju i konačni elementi između čvorova koji će tvoriti strukturu. Njima se pridodaju svojstva poput debljine, materijala itd. Sljedeći korak je definiranje rubnih uvjeta, te opterećenja koje djeluje na model. Nakon toga je moguće napraviti proračun modela.

U ovom radu izrađena su tri različita parcijalna (simetrična) modela dvodna. Što znači da je modelirana samo polovica dvodna simetrična oko uzdužne osi upravo zbog uvjeta simetrije. Prva dva modela su izrađeni povezivanjem odgovarajućih čvorova konačnim elementima u obliku vojevima (eng. Strakes). Razlika između prva dva modela je u gustoći mreže konačnih elemenata. Prvi model ima rjeđe definiranu mrežu tzv. grubu mrežu, dok drugi model ima

gušće definiranu mrežu tzv. finu mrežu. S druge strane treći model izrađen je koristeći gredne konačne elemente.

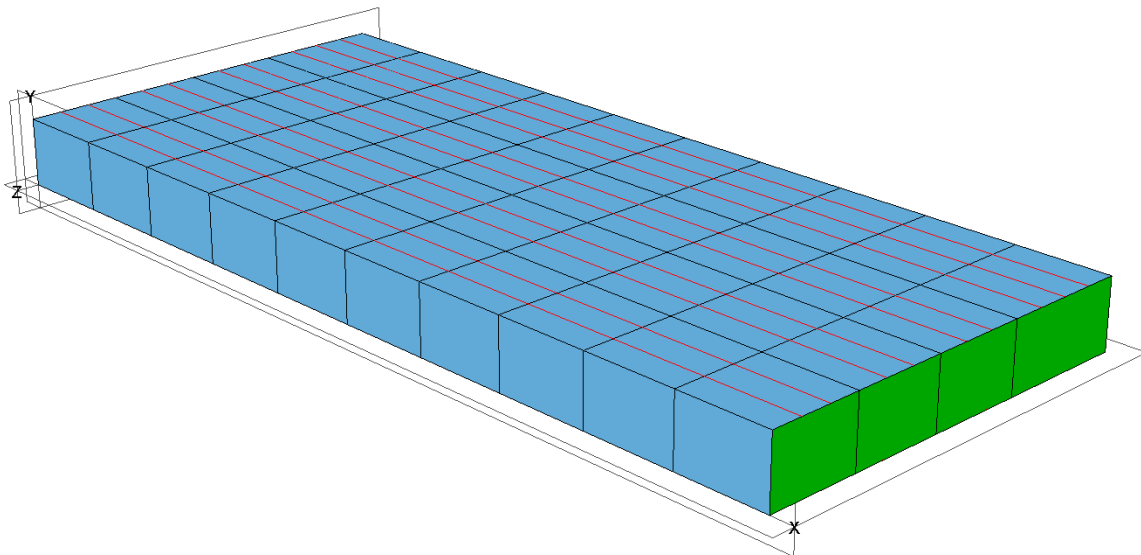
#### 4.2 Model sa grubom mrežom konačnih elemenata

Prvi model je modeliran grubom mrežom elemenata. Gledajući u Y ravnini čvorovi na strukturi su postavljeni samo na mjesta spoja jakih nosača sa pripadnim opločenjem kao što je prikazano na slici. 4.1. Dok je razmak paralelnih čvorova po uzdužnoj osi postavljen da bude jednak razmaku okvira. Gornje i donje opločenje su modelirani ortotropnim elementima ukrepljenog panela, tako da su kroz te elementi modelirani i uzdužnjaci.



Slika 4.1 Diskretizacija modela grubom mrežom konačnih elemenata

Tako da konačni modela poprima izgled kao što je prikazano na slici 4.2.



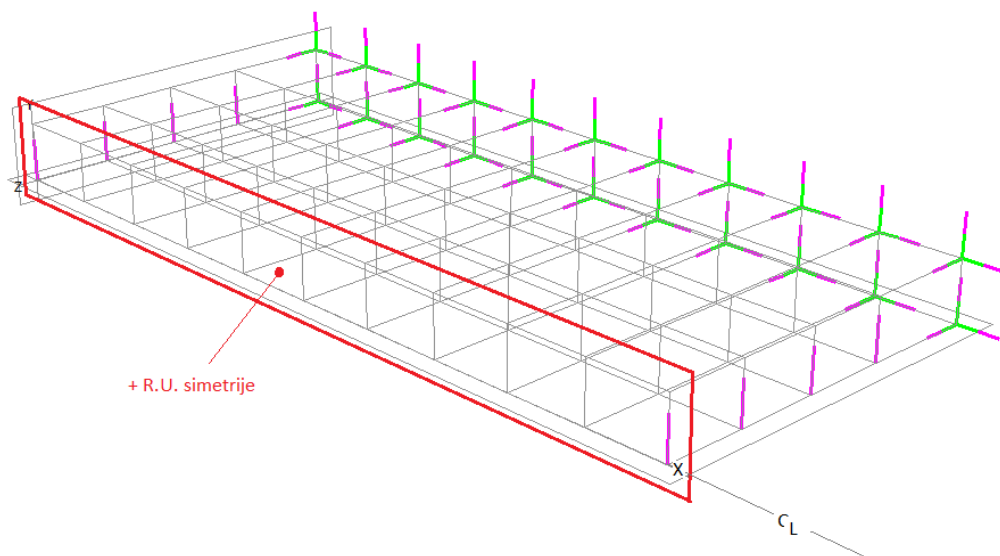
Slika 4.2 Prikaz modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

Rubni uvjeti su postavljeni identično kao kod Shadeove metode. Dulja stranica modela je upeta što znači da joj je spriječen pomak i rotacija po sve tri koordinatne osi, dok je kraća stranica zglobno oslonjena što znači da joj je spriječen pomak po osi  $y$ , kao što je vidljivo na slici 4.3. U ravnini simetrije  $XY$  koja leži na centralnoj liniji ( $C_L$ ) modela implementirani su rubni uvjeti simetrije prikazani u tablici 4.1 gdje su:

- 0 - slobodan pomak
- 1 - spriječen pomak

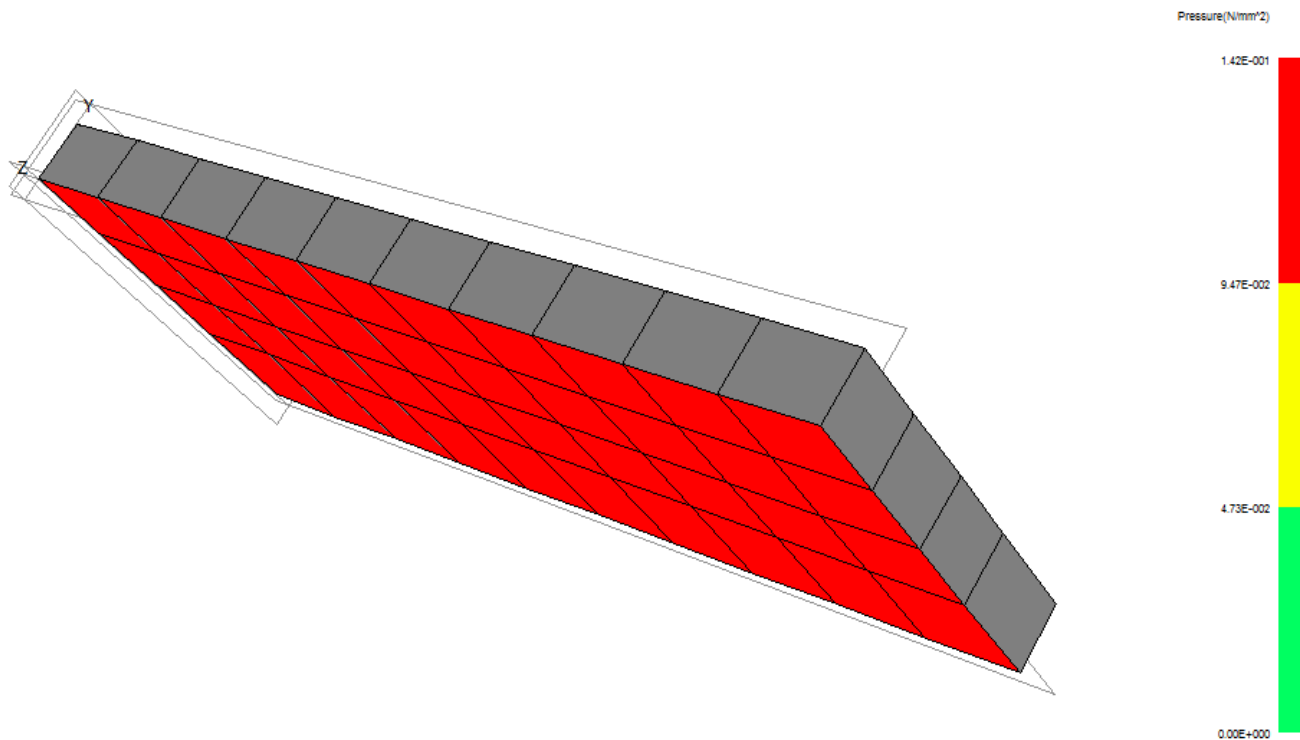
**Tablica 4.1 Rubni uvjeti simetrije**

$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
0	0	1	1	1	0



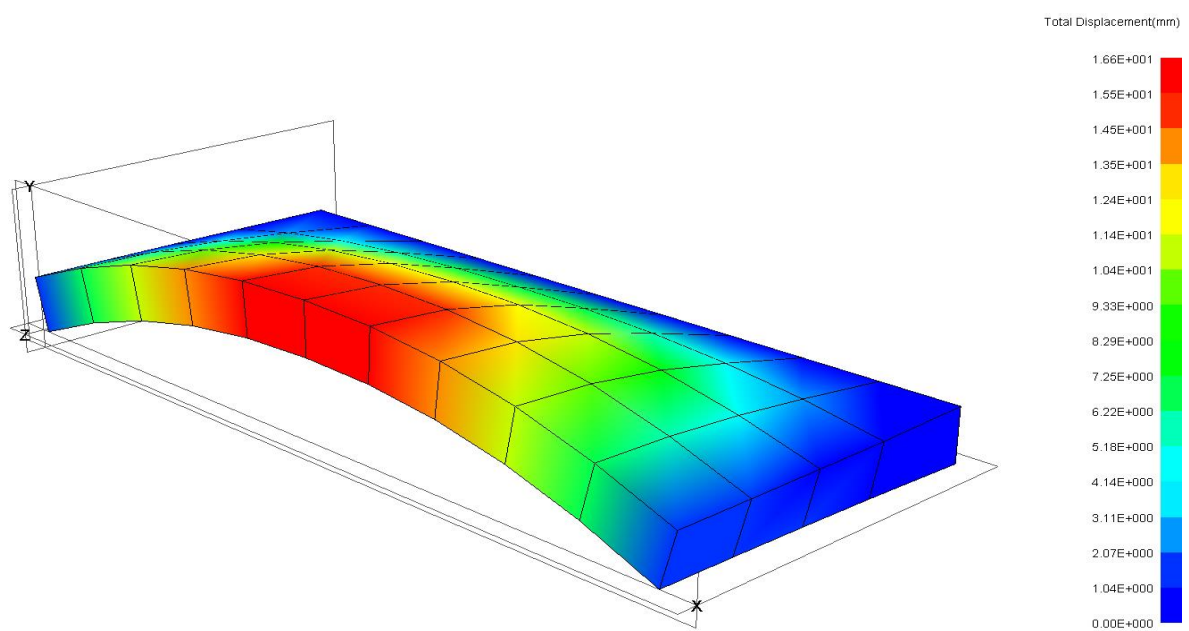
**Slika 4.3. Prikaz rubnih uvjeta modela**

Opterećenje je identično kao kod proračuna Shadeovom metodom, točnije tlak koji se proračunao po pravilima HRB-a za stanje alternativnog krcanja. Na slici 4.4 se može vidjeti kako je ono zadano na samom modelu u obliku tlaka.

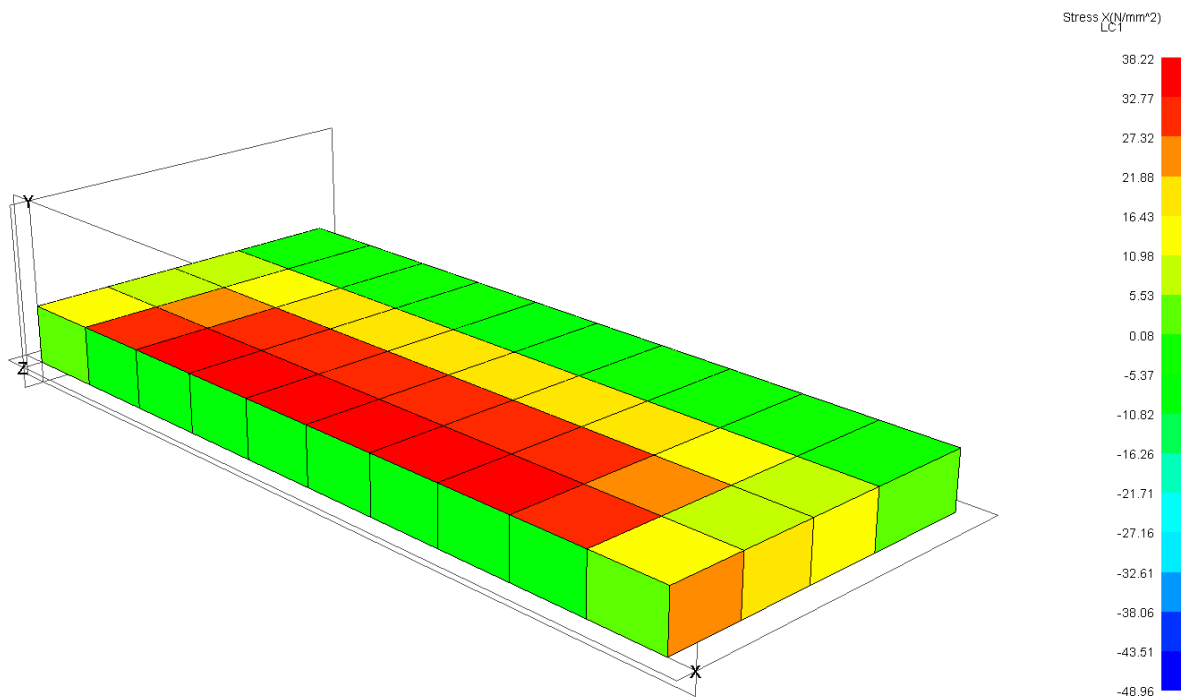


**Slika 4.4** Prikaz opterećenja modela

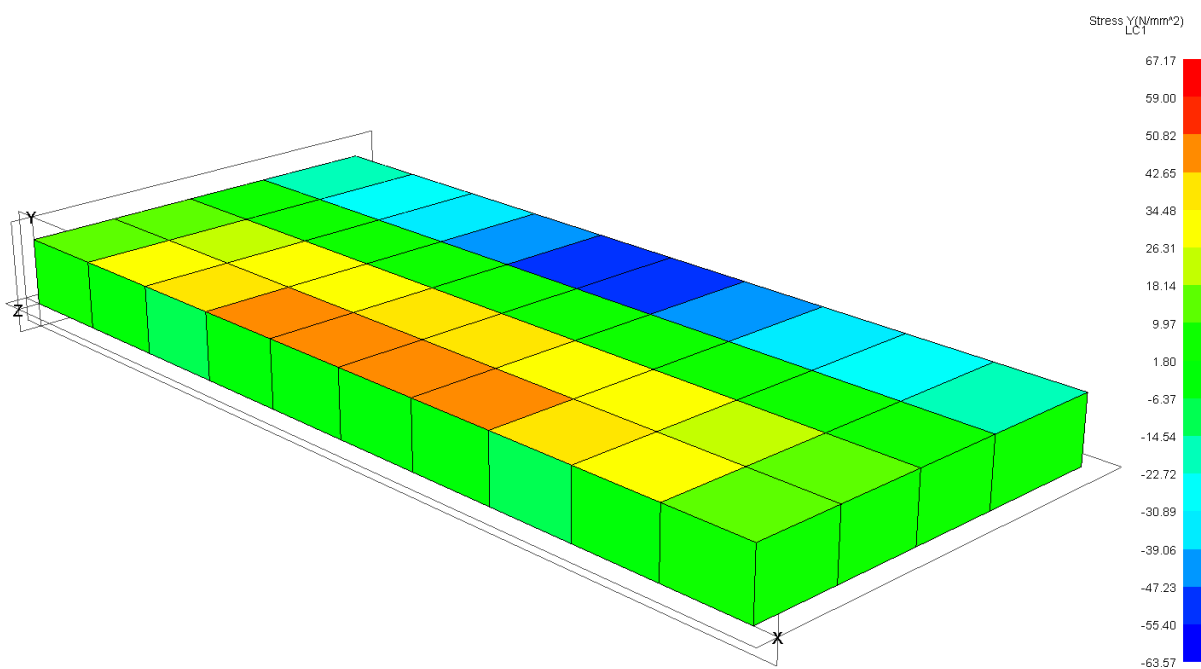
Na sljedećim slikama su prikazani rezultati proračuna.



**Slika 4.5** Prikaz deformacija modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

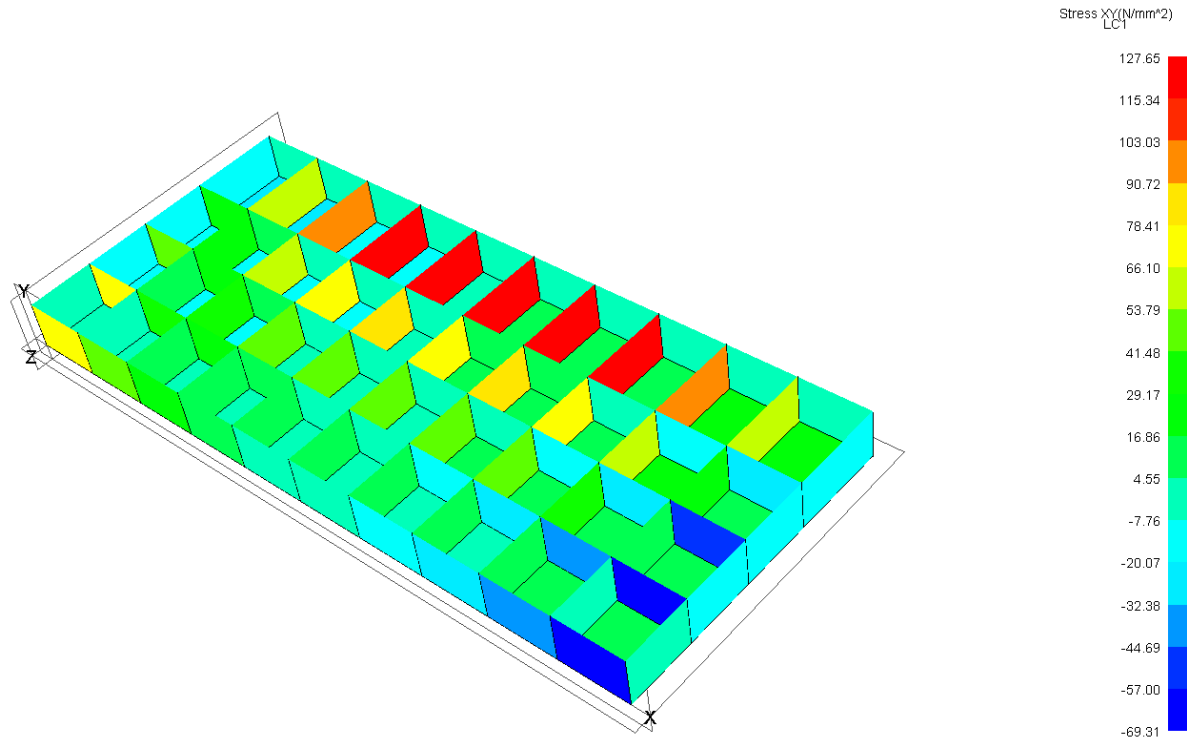


**Slika 4.6** Prikaz normalnih napreznja u uzdužnom smjeru modela sa grubom mrežom konačnih elemenata



**Slika 4.7** Prikaz normalnih napreznja u poprečnom smjeru modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

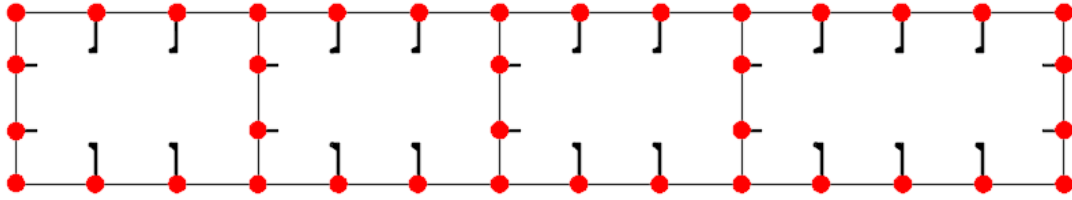




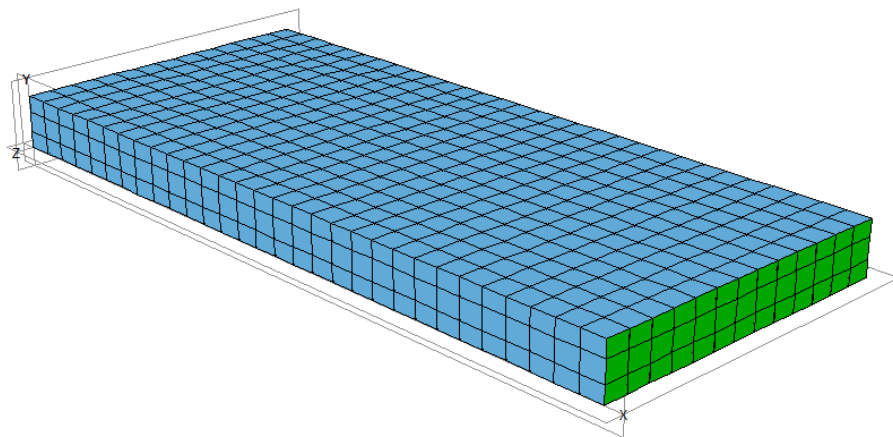
**Slika 4.8** Prikaz smičnih napreznja modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

### 4.3 Model sa finom mrežom konačnih elemenata

Ovaj model je izrađen sa finom mrežom elemenata. Što znači da je diskretizacija strukture dvodna provedena sa većim brojem elemenata. Osim na spojeve jakih nosača sa pripadnim opločenjem, čvorovi su stavljeni na pozicije svakog uzdušnjaka te na mjesta ukrepa uzdužnih nosača kao što je prikazano na slici 4.9. Tako da su po visini dvodna raspoređena tri konačna elementa. Što se tiče čvorova u uzdužnom smjeru, oni su razmaknuti za trećinu razmaka rebara za razliku od prijašnjeg modela gdje je taj razmak bio jednak razmaku rebara. Model sa takvim postavljanjem čvorova je prikazan na slici 4.10. Uzdužnjaci su modelirani grednim elementima.

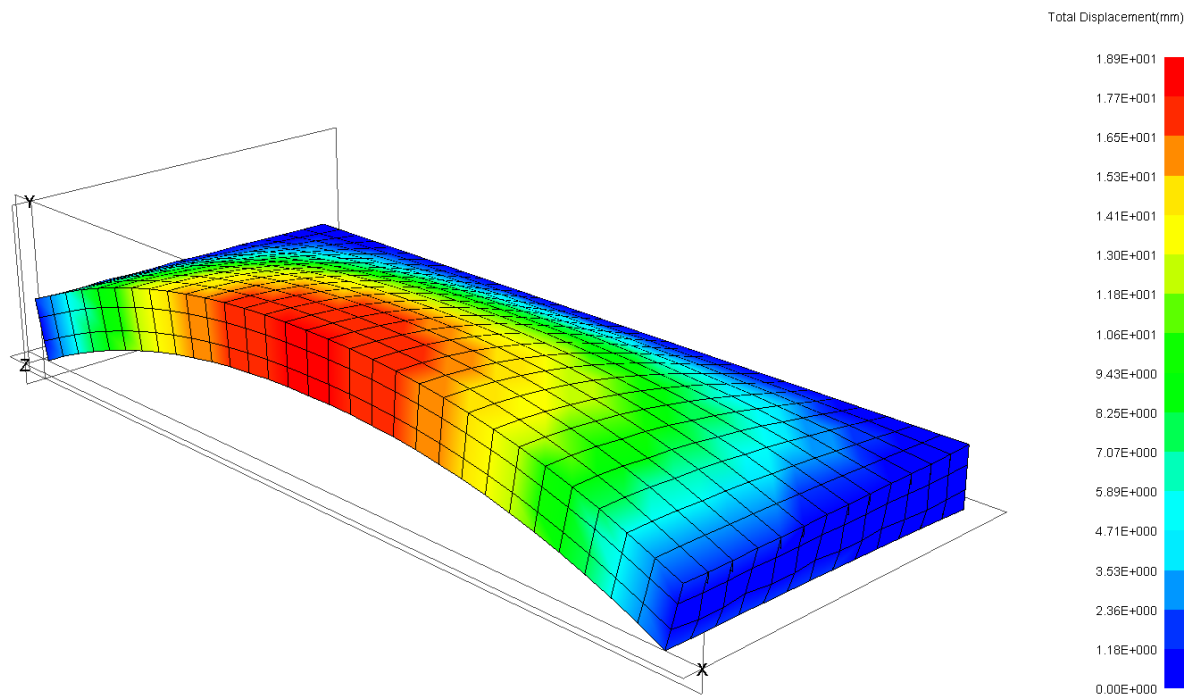


**Slika 4.9** Diskretizacija modela grubom finom konačnih elemenata

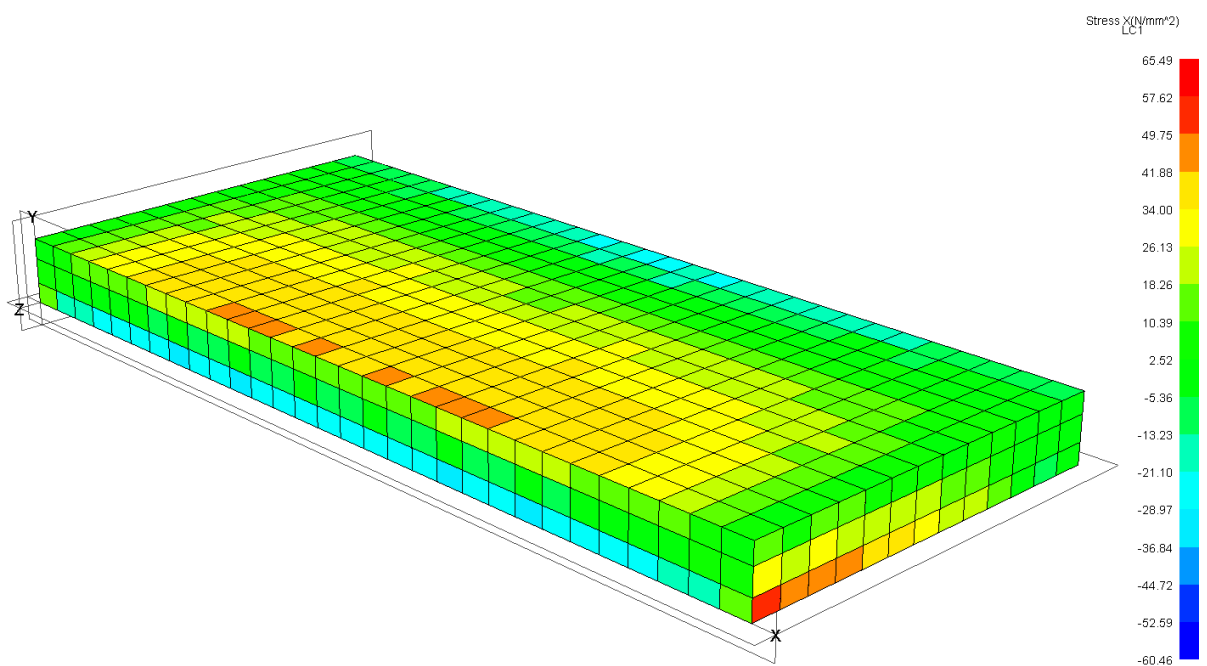


**Slika 4.10** Prikaz modela sa finom mrežom konačnih elemenata

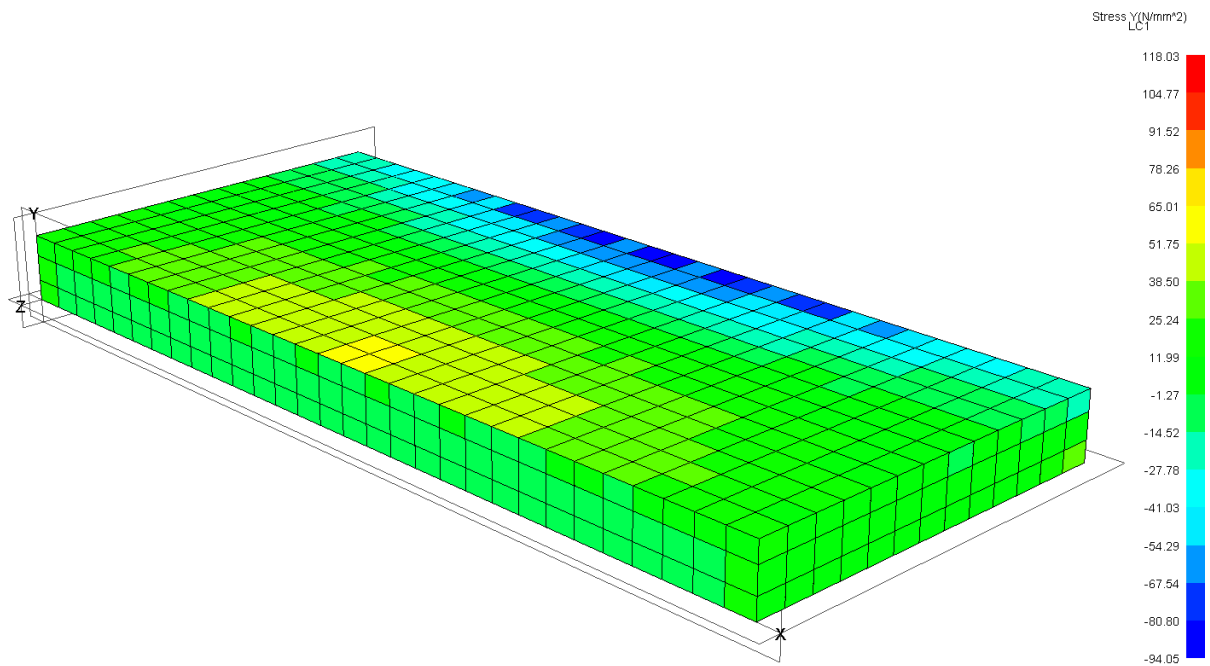
Na slikama 4.11 i 4.12 je prikazan dio rezultata proračuna.



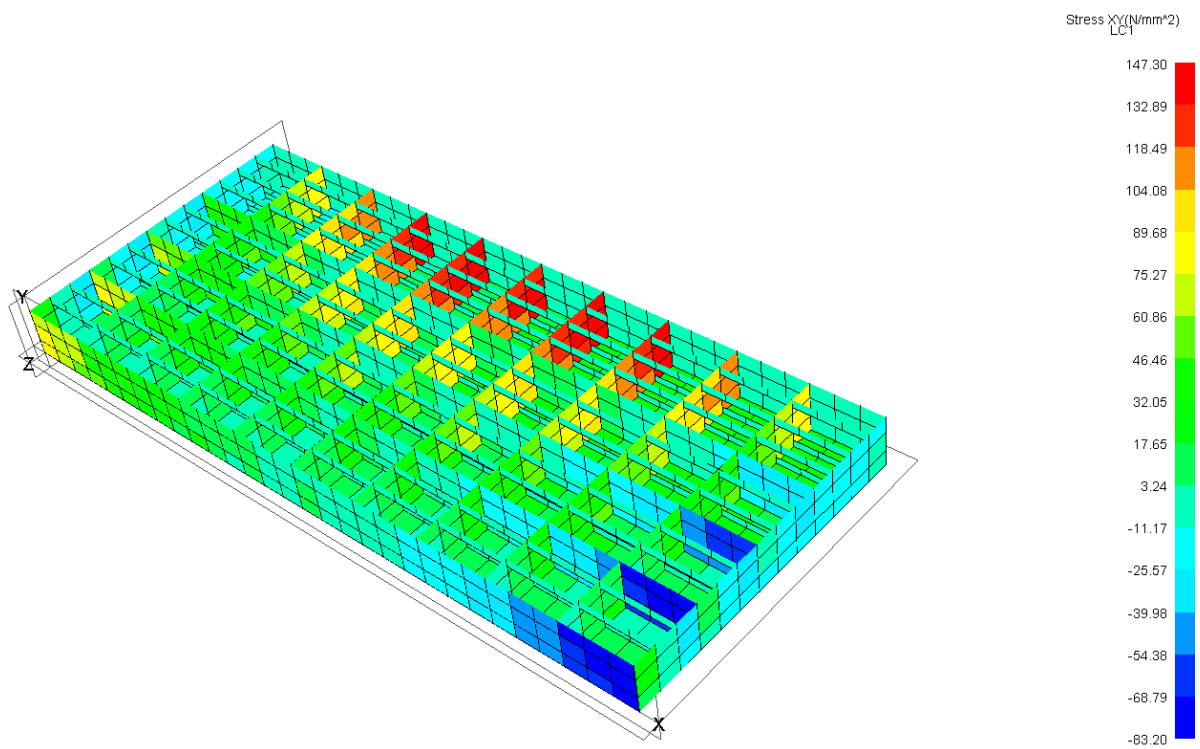
**Slika 4.11 Prikaz deformacija modela sa finom mrežom konačnih elemenata**



**Slika 4.12 Prikaz normalnih naprežanja u uzdužnom smjeru modela sa finom mrežom konačnih elemenata**



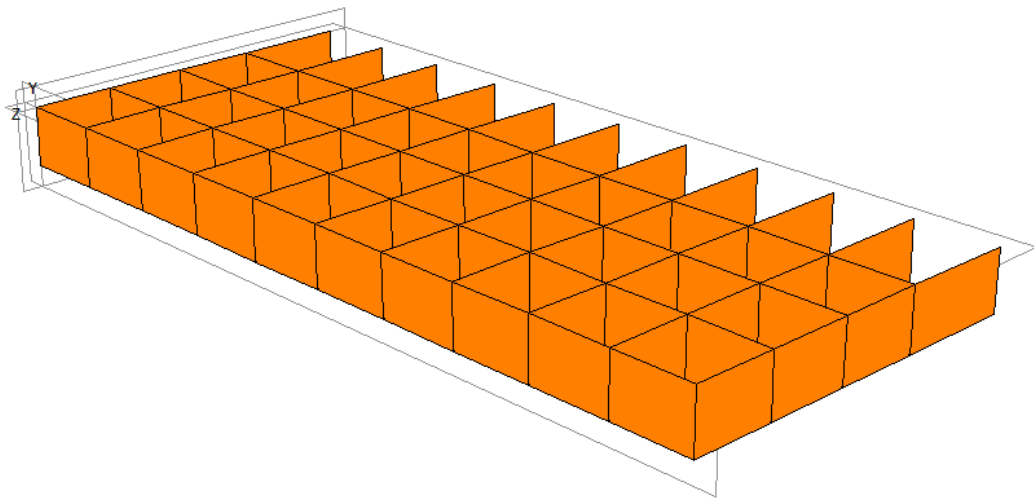
**Slika 4.13** Prikaz naprezanja u poprečnom smjeru modela sa finom mrežom konačnih elemenata



**Slika 4.14** Prikaz smičnih naprezanja modela sa finom mrežom konačnih elemenata

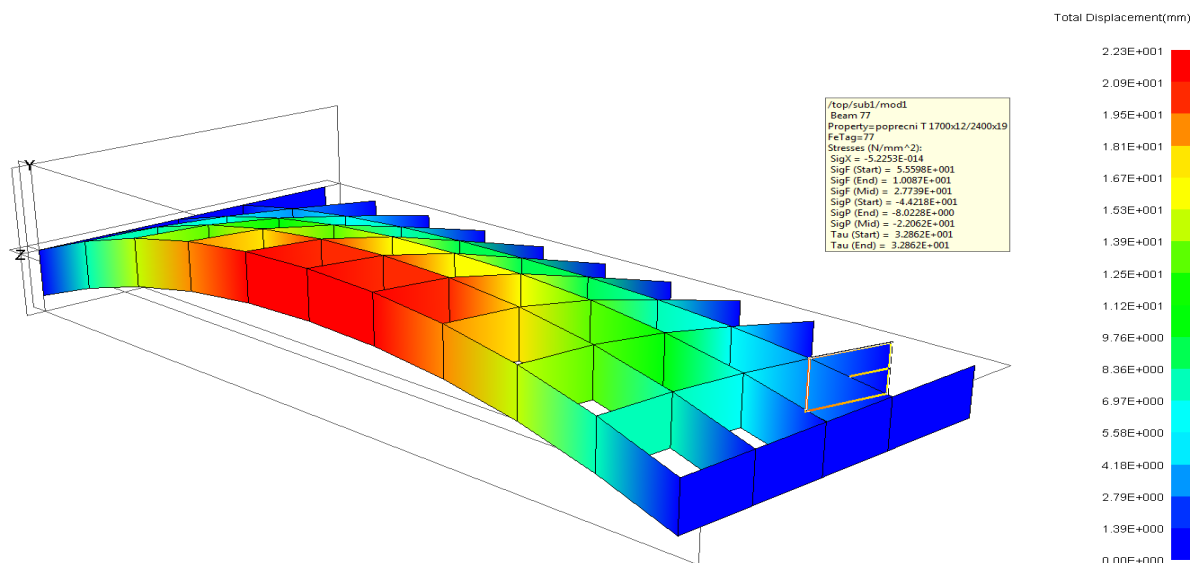
#### 4.4 Gredni model

Gredni model je umjesto sa pločastim konačnim elementima modeliran kao što samo ime kaže sa grednim konačnim elementima. Na mjestima spoja jakih nosača sa opločenjem je u čvorovima definirani su gredni konačni elementi. Korišten je hibridni model grede koji je razvijen za modeliranje greda pričvršćenih na oplatu. Oplata sa svojom sunosivom širinom djeluje kao jedna od prirubnica grede. Tako da je definiran profil grede, dakle struk i pojas te sunosiva širina opločenja.

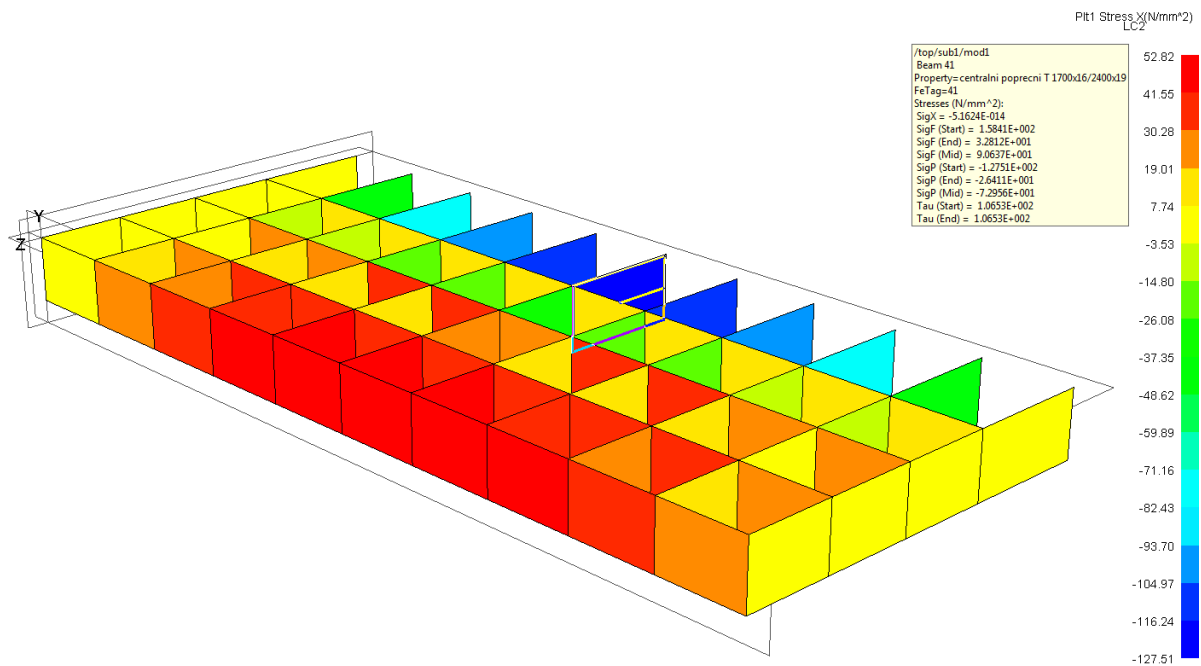


Slika 4.15 Gredni model

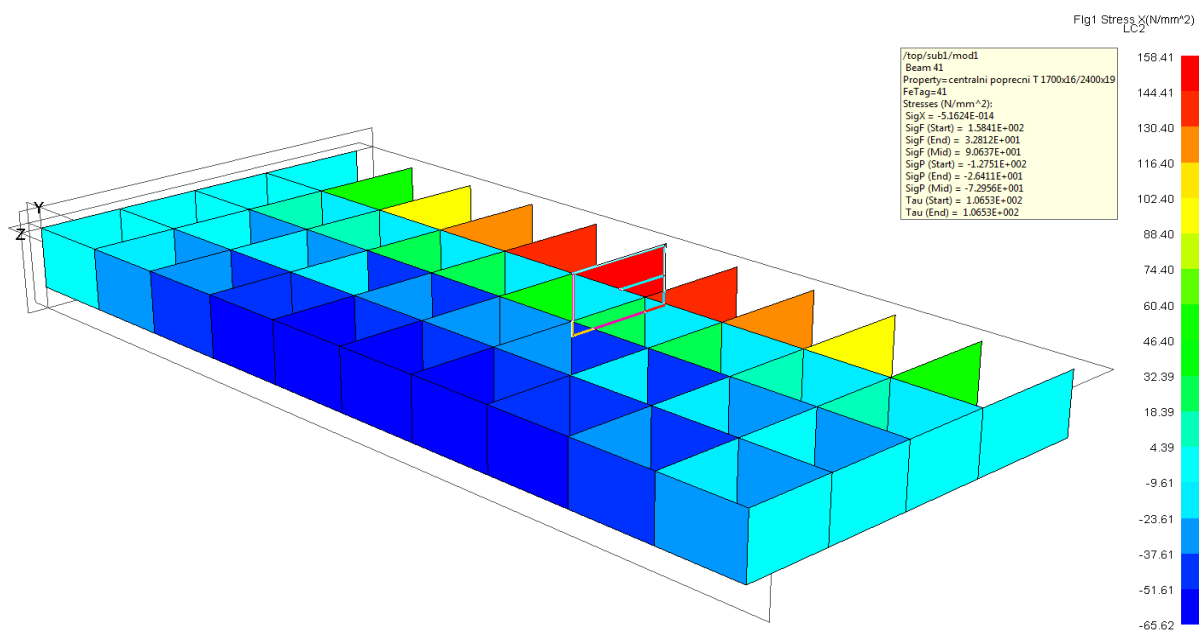
Dio rezultati proračuna je prikazan na slikama 4.16, 4.17 i 4.18



Slika 4.16 Prikaz deformacija grednog modela



Slika 4.17 Prikaz napreznanja u strukovima grednog elementa



Slika 4.18 Prikaz napreznanja u prirubnicama grednog elementa

#### 4.5 Analiza rezultata numeričkog proračuna

Promatrajući rezultate dobivene korištenjem maestra može se zaključiti da su u skladu sa očekivanjima. Deformacija modela je u skladu sa deformacijom kod savijanja, dvodno se pod djelovanjem tlaka savija prema unutra, te je najveći progib u sredini. Naprezanja savijanja na sredini modela su veća u gornjem opločenju nego donjem. Zatim naprezanja u poprečnom smjeru su veća na krajevima nego na sredini što se slaže sa teorijom savijanje upete grede. Smična naprezanja su veća na poprečnim nosačima jer se oni ponašaju kao glavne grede dok se jaki uzdužni nosači ponašaju kao ukrižane grede, što je detaljno opisano u [7], proračun roštilja . Naprezanja su općenito veća u poprečnim nosačima s obzirom da gusto postavljene rebrenice na sebe preuzimaju glavninu opterećenja koje prenose na oplatu ,a uzdužni nosači djeluju kao „opruge“ koje vraćaju rebrenice na mjesto. S druge strukovi na sebe preuzimaju smična naprezanja zbog toga što imaju najveću smičnu površinu.

Može se primijetiti da se rezultati razlikuju u ovisnosti koji je model korišten. Tako da su naprezanja veća kod modela sa finom mrežom konačnih elemenata. Razlog tome je da se kod uporabe gušće mreže mogu pokupiti i tercijarna naprezanja kao što je npr. lokalno savijanje uzdužnjaka između rebrenica što povećava naprezanja u oplati za razliku od grube mreže konačnih elemenata. Model sa grubom mrežom konačnih elemenata je također krući tako da je i progib koji se dobiva manji.

#### 4.6 Usporedba rezultata

U tablici 4.2 su prikazani rezultati dobiveni analitičkim i numeričkim proračunom. Može se primijetiti da se rezultati Shadeove metode dobro poklapaju sa rezultatima numeričkim proračunima. Što govori kako je Shadeova metoda prikladna za uporabu, pogotovo za nekakvu preliminarnu brzu procjenu naprezanja različitih varijanti dvodna.

Tablica 4.2 Usporedba rezultata analitičke i numeričke metode

REZULTATI		schade	gruba mreža	fina mreža	gredni
progib u sredini ploče [mm]	w	6,72	16,60	18,90	22,30
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ g	30,33	37,66	41,20	43,47
	$\sigma_x$ d	-37,90	-48,49	-53,63	-54,65
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ g S	15,89	-	15,37	-
	$\sigma_x$ d S	19,85	-	24,69	-
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g	49,45	50,26	51,76	62,48
	$\sigma_y$ d	-61,05	-63,57	-65,76	-77,62
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g S	39,68	-	28,09	-
	$\sigma_y$ d S	48,99	-	42,21	-
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g	-99,90	-53,93	-98,76	-127,51
	$\sigma_y$ d	123,34	67,17	118,03	158,41
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g S	91,18	-	74,54	-
	$\sigma_y$ d S	112,57	-	96,24	-
smično naprezanje u smjeru dulje stranice [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ uzd	69,43	69,32	77,04	56,07
smično naprezanje u smjeru kraće stranice [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ pop	130,97	122,79	134,60	106,53



## 5. ANALIZA SENZITIVNOSTI

Drugi dio zadatka ovog rada je bio provesti analizu senzitivnosti za zadani slučaj opterećenja konstrukcije roštilja dvodna. Analiza senzitivnosti je proces variranja ulaznih parametara modela unutar dopuštenog područja i promatranje zavisnih promjena u rješenju modela. Na osnovu ove analize samo se ispituje kako pojedini projekt podnosi promjene određenih parametara. Ona proučava kako se promjene u izlaznim (odzivnim) varijablama modela mogu kvalitativno i kvantitativno dodijeliti različitim izvorima promjena tj. različitim ulaznim parametrima.

Model u ovom slučaju jest konstrukcija roštilja dvodna sa svim svojim geometrijskim karakteristikama kao što su duljina, širina, visina dvodna. Nadalje tu su debljina opločenja dna te pokrova dvodna, debljine uzdužnih i poprečnih nosača te njihov broj. Dok su izlazni rezultati proračuna modela odnosno odzivne varijable, progib u sredini, te normalna i smična naprezanja. Parametri koji su se varirali u analizi senzitivnosti su visina dvodna, broj jakih uzdužnih nosača (uzet je broj ostalih uzdužnih nosača na polovini modela) i razmak poprečnih nosača.

Prema teoriji eksperimenata, maksimalan broj pokusa u eksperimentu sa tri parametra iznosi  $3^3$ , odnosno 27 pokusa ili 27 različitih scenarija. Tako da zapravo imamo slučaj eksperimenta sa 3 parametra na 3 različita nivoa kao što pokazuje tablica 5.1.

**Tablica 5.1 Parametri za analizu senzitivnosti**

PARAMETRI	NIVO		
	1	2	3
visina dvodna [mm]	1600	1700	1800
razmak rebrenica $s_b$ [mm] (broj rebrenica)	2181,82 (11 rebrenica)	2400 (10 rebrenica)	2666,6 (9 rebrenica)
	broj jakih uzdužnih nosača (razmak nosača $s_a$ ) [mm]	2 (3466,66)	3 (2600)

## 5.1 Digitalizacija Schadeovih dijagrama

Ulazni parametri za analizu senzitivnosti su generirani koristeći Schadeovu metodu te se mogu naći u prilogu D. Iako broj scenarija nije bio relativno velik, ulazni parametri se nisu baš bitno razlikovali. Kako bi se poboljšala točnost očitavanja iz Schadeovih dijagrama i ubrzao sami postupak, ovaj dio postupka je u ovom radu automatiziran digitalizacijom Schadeovih dijagrama, te nalaženjem aproksimacijskih polinoma koji bi za ulazne parametre virtualnog omjera stranica  $\rho$  i torzionog koeficijenta  $\eta$  automatski dali koeficijent  $K$  potreban za ulazak u formule.

Prvi korak digitalizacije je bio uzimanje Schadeovih dijagrama u digitalnom obliku iz [5]. To je bio nužan preduvjet kako bi se velik broj točaka moga brzo i točno očitati te kasnije iskoristiti za pronalaženje interpolacijskih polinoma. Koristeći programski alat *Img2cad*, Schadeovi dijagrami su pretvoreni iz PDF formata u Autocad format koji je onda pogodan za brzo očitavanje velikog broja točaka. Pomoću Autocad lisp skripte izlistane su točke za svaku krivulju iz Schadeovih devet dijagrama u lokalnom Autocadovom koordinatnom sustavu.

Nakon očitavanja koordinata krivulja, točke su prenesene u računalni program Excel, gdje su onda svedene na pravo mjerilo koje se moglo iskoristiti. Uz svaku krivulju je pridodana lokalna koordinata ishodišta grafa te njezina vrijednost. Zatim je izvedeno mjerilo za os apscisu i ordinatu. To je učinjeno na taj način da se u Autocadu izmjerila dužina u lokalnom koordinatnom sustavu te zatim svela na mjeru koja je prikazana na grafu. Koristeći ishodište grafa u lokalnom koordinatnom sustavu, udaljenosti točaka i mjerilo sve su točke svedene na pravu vrijednost prikazanu na grafu.

Nakon što su točke svedene na pravu vrijednost u Excelu je napravljeni istovjetni grafovi kako ih je Schade prikazao. Koristeći Excelovu mogućnost aproksimiranja funkcije polinomom sve su krivulje aproksimirane polinomom koji ih najbolje opisuje, petog ili šestog reda ovisno o krivulji. Ulazni parametar za aproksimirane krivulje je  $\rho$  virtualni omjer stranica, dok se parametar  $\eta$  torzioni omjer uzima u obzir koristeći linearnu interpolaciju između dvije krivulje za istu vrijednost  $\rho$ .

Na ovaj način nije potrebno očitavati vrijednosti koeficijenta  $K$  iz grafova već je njegov izračun uključen direktno u Excelov tablični kalkulator pomoću kojeg su različiti scenariji kasnije korišteni za analizu senzitivnosti napravljeni.

## 5.2 Matematička podloga [10]

Varijanca je u statistici, mjera disperzije mjerenih veličina; prosječna suma kvadrata odstupanja vrijednosti numeričkog obilježja od aritmetičke sredine. Za niz vrijednosti  $x_1, x_2, \dots, x_N$  kojima je aritmetička sredina:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (5.1)$$

varijanca ( $\sigma^2$ ) je definirana sljedećom jednačbom: 
$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.2)$$

Pozitivni drugi korijen iz varijance mjera je odstupanja, a naziva se standardna devijacija ( $\sigma$ ).

Analiza varijance ANOVA (Analysis of Variance) jest računski postupak pomoću kojega se ispituju podaci određenoga pokusa, kroz procjenu otklona pojedinih srednjih vrijednosti od prosječne vrijednosti uzoraka uzetih iz nekog osnovnog skupa. ANOVA se može primijeniti na bilo koji skup podataka koji se može grupirati po određenim faktorima. Metoda uključuje proračuna te interpretaciju i evaluaciju niza parametara.

Tipični skup podataka za analizu varijance na skupu podataka sa jednim parametrom je prikazan u tablici

**Tablica 5.2** Ulazni podaci za analizu varijance sa jednim parametrom

odzivne varijable	NIVO				
	<i>l</i>	...	<i>i</i>	...	<i>p</i>
<i>l</i>	$x_{ll}$		$x_{il}$		$x_{pl}$
.					
.					
.					
<i>k</i>	$x_{lk}$		$x_{ik}$		$x_{pk}$
.					
.					
.					
<i>n</i>	$x_{ln}$		$x_{in}$		$x_{pn}$

Za dani skup podataka kako bi se provela analiza varijance treba kreirati tablicu sa parametrima za analizu. Parametri za analizu varijance su prikazani u tablici 5.3.

Postupak izračuna parametara za analizu varijance uključuje:

1. Izračun sume kvadrata  $SS$
2. Definiranje stupnjeva slobode
3. Izračun srednje vrijednosti kvadrata i  $F$  vrijednosti

**Tablica 5.3 Parametri za analizu varijance sa jednim faktorom**

Izvor varijacije	Suma kvadrata	Stupanj slobode	Srednja vrijednost sume kvadrata	$F_0$
Efekt nivoa	$S_N$	$p-1$	$M_N = \frac{S_N}{p-1}$	$\frac{M_N}{M_E}$
Efekt greške	$S_E$	$N-p$	$M_E = \frac{S_E}{N-p}$	
Ukupno	$S_{tot} = S_N + S_E$	$N-1$		

### 5.2.1 Sume kvadrata

Suma kvadrata je statistička mjera varijabilnosti podataka. Kod upotrebe metode analize varijance upotrebljavaju se tri različite sume kvadrata:

- Ukupna suma kvadrata  $S_{tot}$
- Suma kvadrata unutar pojedinog nivoa (efekt greške)  $S_E$
- Suma kvadrata između nivoa (efekt nivoa)  $S_N$

Ukupna suma kvadrata je razlika između vrijednosti pojedinačnih točaka opažanja te srednje vrijednosti cijelog skupa točaka opažanja:

$$S_{tot} = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x})^2 \quad (5.3)$$

Kod sume kvadrata unutar pojedinog nivoa ili kako se još ponekad naziva suma kvadrata članova greške tj. efekt greške, nas zanima razlika vrijednosti pojedinačnih opažanja i srednje vrijednosti opažanja nivoa kojoj opažanja pripadaju:

$$S_E = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \quad (5.4)$$

Suma kvadrata između nivoa jest razlika ukupne sume kvadrata te sume kvadrata unutar nivoa:

$$S_N = S_{tot} - S_E \quad (5.5)$$

### 5.2.2 Stupnjevi slobode

Kod analize varijance sa jednim faktorom ukupan broj opažanja je jednak  $N$ , dok je broj nivoa jednak  $p$ . Tako da je ukupan broj stupnjeva slobode jednak  $N-1$ , kao što bi i bio u slučaju jednostavnog skupa podataka veličine  $N$ . Postoji  $p$  različitih nivoa, tako da je stupanj slobode za sumu kvadrata između nivoa tj. efekt nivoa jednak  $p-1$ . Stupnjevi slobode koji odgovaraju sumi kvadrata unutar nivoa tj. efektu greške, razlika između ukupnog broja opažanja i broja grupa  $N-p$ . Treba primijetiti da ukoliko je broj opažanja u svim grupama jednak i iznosi  $n$ , onda stupanj slobode iznosi  $p(n-1)$ , dok je ukupni broj opažanja jednak  $N=pn$ .

### 5.2.3 Srednja vrijednost sume kvadrata

Srednje vrijednosti sume kvadrata su ključne kod analize varijance. To su zapravo varijance koje se računaju tako da sume kvadrata unutar nivoa i između nivoa tj. efekt nivoa i efekt greške podijele sa odgovarajućim stupnjevima slobode. Srednje vrijednosti kvadratu su vrijednosti koje se primjenjuju u F testovima koji su kasnije opisani, a oni služe za procjenu da li su razlike između srednjih vrijednosti različitih nivoa značajne. One također omogućuju procjenu komponenti varijacije, odnosno koliko pojedini efekt pridonosi sveukupnoj varijaciji podataka.

Kako bi se razumjelo kako koji efekt pridonosi pojedinom opažanju pogodno je iskoristiti sljedeću jednadžbu:

$$x_{ij} = \mu + \delta_i + e_{ij} \quad (5.6)$$

Gdje je  $x_{ij}$  ( $j$ -to opažanje u  $i$ -tom nivou) suma ukupne srednje vrijednosti populacije, devijacije koju daje nivo  $i$  te nasumične greške  $e_{ij}$ .

Gornja jednadžba sa pripadnom definicijom čini statistički model. Ta jednadžba izražava da je varijacija svih opažanja dijelom zbog devijacija različitih nivoa, a dijelom zbog varijacije unutar nivoa povezanog sa nasumičnom greškom.

Koristeći gornju jednadžbu i definicije suma kvadrata moguće je izračunati očekivane vrijednosti srednjih vrijednosti pojedinih suma kvadrata:

$$M_E = \sigma_E^2 \quad (5.7)$$

$$M_N = n\sigma_N^2 + \sigma_E^2 \quad (5.8)$$

Ovi izrazi omogućuju zasebnu procjenu dvaju različitih varijacija koje pridonose sveukupnom rasipanju podataka.

#### 5.2.4 F test (F omjer)

F test se koristi za usporedbu dvije eksperimentalno dobivene varijance što je korisno za usporedbu preciznosti analitičkih metoda te je ključno kod statističkog alata kao što je ANOVA. Koristi se za utvrđivanje da li postoji značajna razlika između srednjih vrijednosti skupova podataka te za određivanje da li se varijacija srednjih vrijednosti može pripisati samo varijabilnosti koja proizlazi iz samih mjerenja.

Postupak za određivanje značajnosti razlika se sastoji od:

- Postavljanja statističkih hipoteza
- Provjere distribucije skupa podataka
- Odabira testa za provjeru
- Odabira nivoa pouzdanosti
- Izračuna

Kad se provjera značajnosti vrši F testom koristi se F slučajna distribucija koja opisuje distribuciju omjera procijenjenih (očekivanih) varijanci. Budući da je F slučajna distribucija omjer dvaju varijanci, determinirana je stupnjem slobode svake od njih. Za očitavanje podataka iz F distribucije su potrebna tri parametra, uz stupnjeve slobode je potrebno odabrati i prag pouzdanosti, koji za svaku kombinaciju tih parametara daje neku vrijednost  $F_{krit}$ . Kako bi se testirala statistička hipoteza kod F testa potrebno je postaviti F omjer koji predstavlja statistički test postavljenih hipoteza, te je definiran kao omjer varijance pojedinog faktora i omjer varijance greške. Postavljene statističke hipoteze za analizu varijance glase:

$$H_0 : M_N = M_E$$

$$H_1 : M_N > M_E$$

Moguća su dva ishoda F testa:

1. F omjer za zadani parametar je veći od vrijednosti  $F_{krit}$  nulta hipoteza se odbacuje te se zaključuje da parametar ima jak utjecaj na srednju vrijednost podataka
2. F omjer za zadani parametar je manji od vrijednosti  $F_{krit}$  nulta hipoteza se prihvaća te se zaključuje da parametar nema utjecaj na srednju vrijednost podataka

### 5.2.5 Analiza varijance na skupu podataka sa dva faktora

Kako u realnim slučajevima postoji više od jednog faktora koji utječe na odzivne varijable nekog eksperimenta u tablici 5.4 su prikazani faktori za analizu varijance sa dva faktora.

**Tablica 5.4 Parametri za analizu varijance sa dva faktora**

Izvor varijacije	Suma kvadrata	Stupanj slobode	Srednja vrijednost sume kvadrata	F <sub>0</sub>
Efekt nivoa	$S_3$	$p-1$	$M_3 = \frac{S_3}{p-1}$	$\frac{M_3}{M_0}$
Efekt nivoa	$S_2$	$q-1$	$M_2 = \frac{S_2}{q-1}$	$\frac{M_2}{M_0}$
Efekt interakcije	$S_1$	$(p-1)(q-1)$	$M_1 = \frac{S_1}{(p-1)(q-1)}$	$\frac{M_1}{M_0}$
Efekt greške	$S_0$	$N-pq$	$M_0 = \frac{S_0}{N-pq}$	
Ukupno	$S_{tot}$	$N-1$		

### 5.3 Provedba analize senzitivnosti

Analiza senzitivnosti u ovom radu je provedena koristeći programski paketa Design expert, kako bi se utvrdilo koji faktor najviše utječe na odzivne varijable proračuna konstrukcije roštilja dvodna. Design expert je statistički alat koji omogućava računalnu primjenu metode analize varijance, te nudi i opcije poput grafičkog prikaza rezultata te optimizacije. Za početak korištenja programa i provedbu same analize potrebno je kreirati model za analizu unutar samog programa. Na slici 5.1 je prikazan model koji je korišten za analizu senzitivnosti kada su odzivne varijable pomak i masa. Faktori koji su uzeti u obzir su:

- A-A visina dvodna
- B-B razmak rebrenica
- C-C broj uzdužnih nosača

Std	Run	Block	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Factor 3 C:C	Response 1 deflection mm	Response 2 masa kg
1	1	Block 1	1600.00	2400.00	3.00	7.6	231767
2	2	Block 1	1700.00	2182.00	4.00	6.6	245853
3	3	Block 1	1600.00	2182.00	3.00	7.5	234902
4	4	Block 1	1700.00	2667.00	4.00	6.79	239191
5	5	Block 1	1800.00	2400.00	4.00	5.96	246646
6	6	Block 1	1600.00	2667.00	4.00	7.66	235264
7	7	Block 1	1600.00	2182.00	2.00	7.54	228270
8	8	Block 1	1700.00	2400.00	3.00	6.73	235476
9	9	Block 1	1800.00	2667.00	4.00	6.05	243119
10	10	Block 1	1800.00	2182.00	4.00	5.88	250173
11	11	Block 1	1800.00	2400.00	3.00	6	239185
12	12	Block 1	1600.00	2667.00	3.00	7.71	228632
13	13	Block 1	1600.00	2667.00	2.00	7.76	222001
14	14	Block 1	1800.00	2667.00	3.00	6.08	235658
15	15	Block 1	1600.00	2182.00	4.00	7.45	241534
16	16	Block 1	1800.00	2182.00	3.00	5.91	242712
17	17	Block 1	1700.00	2182.00	2.00	6.67	231761
18	18	Block 1	1800.00	2400.00	2.00	6.03	231724
19	19	Block 1	1700.00	2400.00	2.00	6.77	228430
20	20	Block 1	1700.00	2667.00	3.00	6.83	232145
21	21	Block 1	1600.00	2400.00	2.00	7.65	225135
22	22	Block 1	1800.00	2667.00	2.00	6.12	228198
23	23	Block 1	1600.00	2400.00	4.00	7.56	238399
24	24	Block 1	1700.00	2182.00	3.00	6.63	238807
25	25	Block 1	1700.00	2667.00	2.00	6.87	225099
26	26	Block 1	1700.00	2400.00	4.00	6.69	242522
27	27	Block 1	1800.00	2182.00	2.00	5.95	235251

Slika 5.1 Model za računalnu analizu senzitivnosti

Analiza senzitivnosti je provedena za sljedeće odzivne varijable u kombinaciji sa masom:

1. Progib u sredini panela.
2. Naprezanje savijanja opločenja (gornjeg i donjeg) na sredini dvodna u smjeru osi x.
3. Naprezanje savijanja opločenja (gornjeg i donjeg) na sredini dvodna u smjeru osi y.
4. Naprezanja savijanja opločenja na potpuno upetim mjestima u smjeru osi y.
5. Smična naprezanja u smjeru dulje i kraće stranice.



Za svaki od modela su faktori koji su se varirali isti dok se mijenja samo jedna odzivna varijabla. Provedbom proračuna analize varijance može se ustvrditi koji je najutjecajniji faktor za pojedinu odzivnu varijablu. Prikaz rezultata ANOVE za odzivnu varijable pomaka prikazan je na slici 5.2

Response	1	deflection				
ANOVA for Response Surface Reduced Cubic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F
Model	11.83	10	1.18	1.060E+005	< 0.0001	significant
A-A	11.59	1	11.59	1.039E+006	< 0.0001	
B-B	0.17	1	0.17	15079.30	< 0.0001	
C-C	0.029	1	0.029	2584.79	< 0.0001	
AB	1.396E-003	1	1.396E-003	125.18	< 0.0001	
AC	4.137E-004	1	4.137E-004	37.09	< 0.0001	
BC	3.322E-005	1	3.322E-005	2.98	0.1036	
A <sup>2</sup>	0.029	1	0.029	2594.07	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	4.480E-004	1	4.480E-004	40.16	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	7.407E-006	1	7.407E-006	0.66	0.4271	
ABC	1.331E-005	1	1.331E-005	1.19	0.2908	
Residual	1.785E-004	16	1.115E-005			
Cor Total	11.83	26				

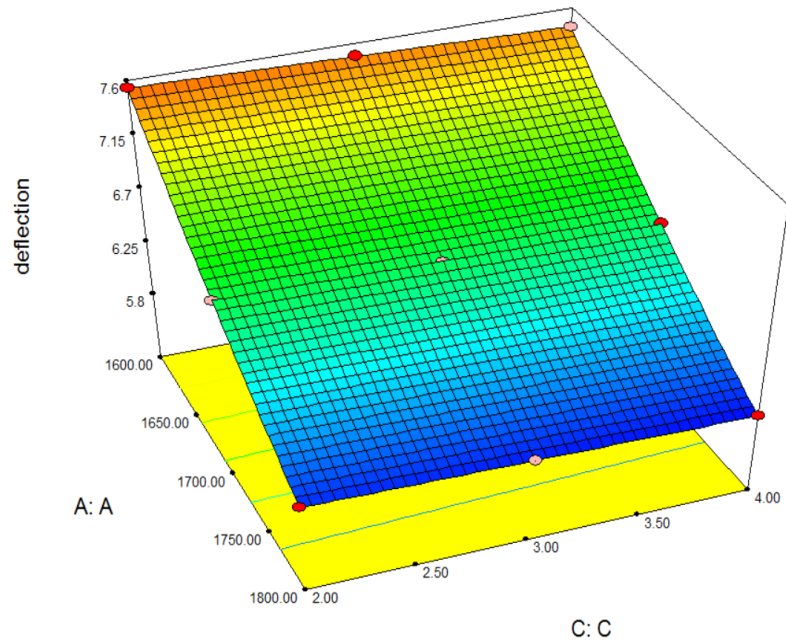
**Slika 5.2 Rezultati analize varijance pomaka**

Iz dobivenih rezultata promatrajući vrijednosti sume kvadrata modela i pojedinih faktora zasebno, te srednje vrijednosti sume kvadrata i F vrijednosti može se zaključiti kako je najutjecajniji faktor koji djeluje na pomak A-A. Faktor A-A odnosno visina dvodna je faktor koji najviše utječe na progib u sredini dvodna. Takav zaključak je u skladu sa očekivanjima s obzirom da pomak najviše ovisi o krutosti dvodna EI. Kako je E, modul elastičnosti, karakteristika materijala te je konstantan, mijenjati se jedino može I, moment inercije. S obzirom da na moment inercije najviše utječe udaljenost od težišta nosača, logično je da je visina dvodna najutjecajniji faktor. Prikaz utjecaja faktora se može vidjeti i grafički na slici 5.3. Na slici se vidi dominacija faktora A-A u odnosu na C-C pri nekoj određenoj vrijednosti faktora C-C. Ta tendencija se nastavlja pri svim vrijednostima C-C.

deflection  
 7.76  
 5.88

X1 = A: A  
 X2 = C: C

Actual Factor  
 B: B = 2182.00



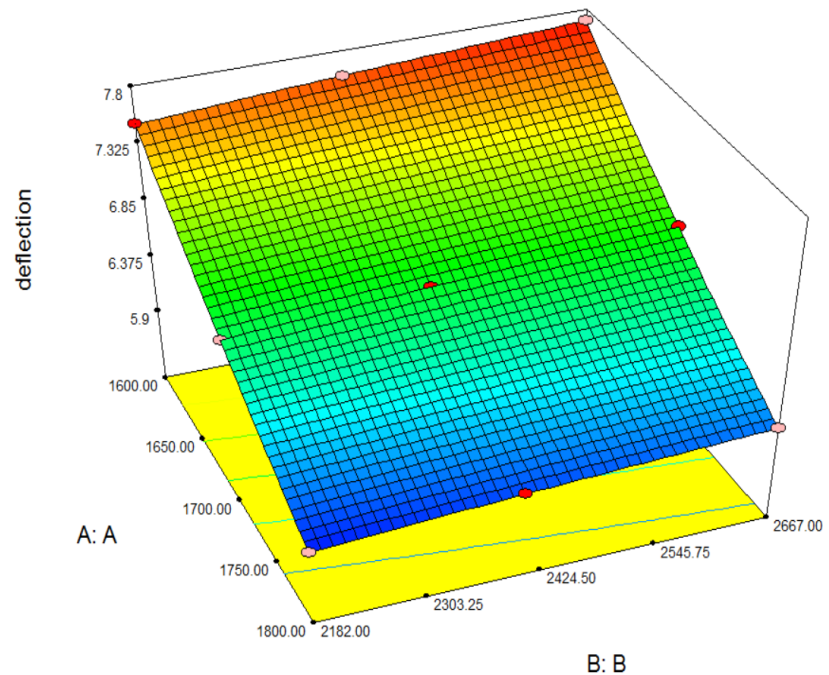
**Slika 5.3 Prikaz utjecaja faktora A-A i C-C na pomak (progib)**

Na slici 5.4 se može vidjeti dominacija utjecaja na pomak (progib) faktora A-A u odnosu na faktor B-B pri određenoj vrijednosti faktora C-C. Kao i u prošlom slučaju ta tendencija se nastavlja kroz sve vrijednosti faktora C-C. Kada se usporede slike 5.3 i 5.4 jasno je vidljivo da je faktor B-B utjecajniji od faktora C-C što se i slaže sa rezultatima dobivenim analizom varijance.

deflection  
 7.76  
 5.88

X1 = A: A  
 X2 = B: B

Actual Factor  
 C: C = 3.00



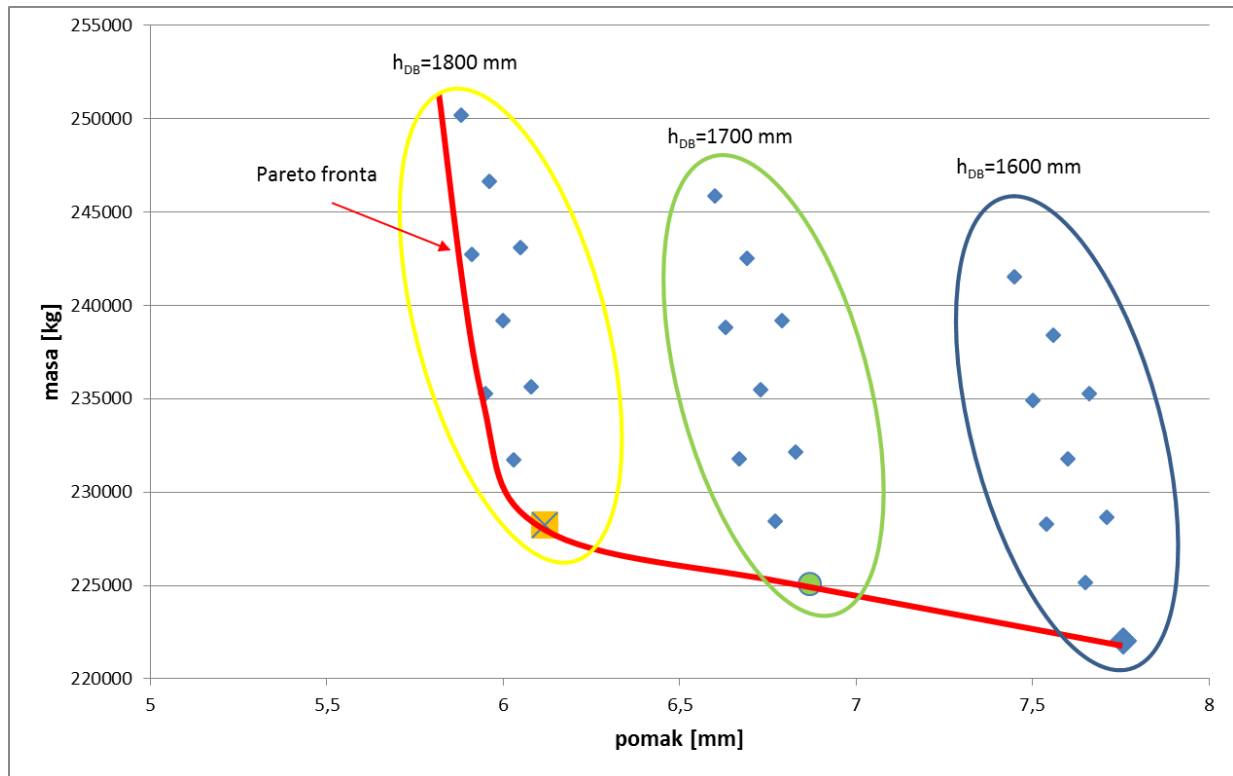
**Slika 5.4 Prikaz utjecaja faktora A-A i B-B na pomak (progib)**

Za drugu odzivnu varijablu masu je također provedena analiza varijance prikazana na slici 5.5. Iz dobivenih rezultata može se vidjeti da je najutjecajniji faktor C-C, odnosno broj uzdužnih nosača. Što je opet logično s obzirom da su dimenzije uzdužnih nosača da se promjenom njihovog broja, masa povećava više nego promjenom visine ili promjenom razmak rebrenica.

Response 2 masa						
ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1.344E+009	9	1.493E+008	1.625E+006	< 0.0001	significant
A-A	2.463E+008	1	2.463E+008	2.681E+006	< 0.0001	
B-B	1.997E+008	1	1.997E+008	2.173E+006	< 0.0001	
C-C	8.922E+008	1	8.922E+008	9.709E+006	< 0.0001	
AB	4.591E+005	1	4.591E+005	4996.44	< 0.0001	
AC	2.062E+006	1	2.062E+006	22434.41	< 0.0001	
BC	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
A <sup>2</sup>	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
B <sup>2</sup>	6.772E+005	1	6.772E+005	7369.35	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
Residual	1562.15	17	91.89			
Cor Total	1.344E+009	26				

**Slika 5.5** Rezultati analize varijance mase

Na slici 5.6 je prikazan dijagram na čijim su koordinatnim osima obje odzivne varijable masa i pomak. Jasno se vidi grupacija podataka po visini dvodna. Krajnja lijeva skupina ima najveću visinu dvodna, dok krajnja desna ima najmanju visinu dvodna. Označene točke u kojima je najmanja masa za pojedinu skupinu ima najmanji broj uzdužnih nosača. Tako da zapravo dijagram prikazuje Pareto frontu. Odnosno liniju na kojoj leže ne dominirani projekti, tako da primjerice niti jedan projekt sa nekom zadanom masom nema manji pomak od projekta koji leži na Pareto fronti.



Slika 5.6 Prikaz Pareto fronte kod odzivnih varijabli mase i pomaka

Sve varijable na kojima je provedena analiza senzitivnosti osim smika se ponašaju po istom obrascu koji je prikazan za odzivnu varijablu progiba. Dakle najveći utjecaj na normalna naprezanja u gornjem i donjem opločenju u smjeru obje koordinatne osi ima visina dvodna. To je logično s obzirom da su sve te varijable u ovisnosti o krutosti EI. Prikaz rezultata analize varijance je prikazan na slici 5.7 dok su za ostala normalna naprezanja rezultati dani u prilogu E.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	significant
Model	63.79	9	7.09	5.950E+006	< 0.0001	significant
A-A	60.51	1	60.51	5.079E+007	< 0.0001	
B-B	2.55	1	2.55	2.138E+006	< 0.0001	
C-C	0.59	1	0.59	4.991E+005	< 0.0001	
AB	3.800E-003	1	3.800E-003	3190.03	< 0.0001	
AC	2.735E-003	1	2.735E-003	2295.97	< 0.0001	
BC	7.280E-005	1	7.280E-005	61.11	< 0.0001	
A <sup>2</sup>	0.070	1	0.070	58719.40	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	6.401E-003	1	6.401E-003	5372.95	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	7.059E-006	1	7.059E-006	5.93	0.0262	
Residual	2.025E-005	17	1.191E-006			
Cor Total	63.79	26				

Slika 5.7 Rezultati analize varijance normalnih naprezanja

Smik s druge strane ovisi o smičnoj krutosti  $G$ , za koju je najvažnija smična površina. Tako da je za očekivati da je faktor koji najviše utječe na smičnu površinu presudan.

Za smično naprezanje u uzdužnom smjeru to je broj uzdužnih nosača. Što je veći broj uzdužnih nosača to je veća i smična površina. S obzirom da je opterećenje koje djeluje na dvodno konstantno, veći broj uzdužnih nosača znači da se opterećenje može raspodijeliti na više smičnih površina. To se i pokazalo rezultatima analize varijance prikazanim na slici 5.8.

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6077.04	9	675.23	40083.29	< 0.0001	significant
A-A	318.08	1	318.08	18881.94	< 0.0001	
B-B	2.86	1	2.86	169.97	< 0.0001	
C-C	5618.26	1	5618.26	3.335E+005	< 0.0001	
AB	2.912E-003	1	2.912E-003	0.17	0.6828	
AC	12.95	1	12.95	768.70	< 0.0001	
BC	0.11	1	0.11	6.73	0.0189	
A <sup>2</sup>	0.35	1	0.35	20.75	0.0003	
B <sup>2</sup>	7.424E-003	1	7.424E-003	0.44	0.5157	
C <sup>2</sup>	116.52	1	116.52	6916.98	< 0.0001	
Residual	0.29	17	0.017			
Cor Total	6077.33	26				

**Slika 5.8** Rezultati analize varijance smičnih naprezanja u uzdužnom smjeru

Dominantan utjecaj broja uzdužnih nosača se može vidjeti na slici 5.9, gdje je prikazan utjecaj faktora C-C i faktora A-A pri određenoj vrijednosti faktora B-B.

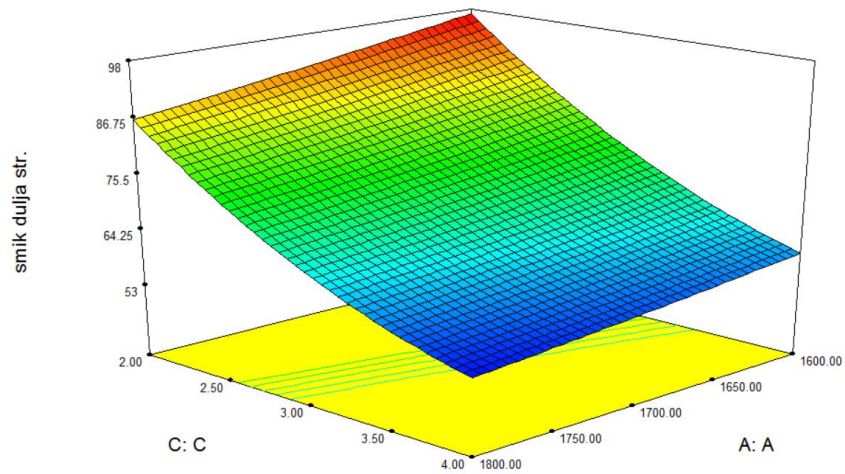
Iz provedene analize se također vidi da određeni utjecaj na smična naprezanja u uzdužnom smjeru ima i visina dvodna. To se također može vidjeti na slici 5.10 gdje je prikazan utjecaj faktora B-B i faktora A-A pri određenoj vrijednosti faktora C-C.

Kada se usporede slike 5.9 i 5.10 se može zaključiti može se zaključiti da je faktor C-C najdominantniji, te da je faktor A-A dominantniji u odnosu na B-B. Također se može vidjeti da je doprinos faktora B-B minimalan.



Design-Expert® Software

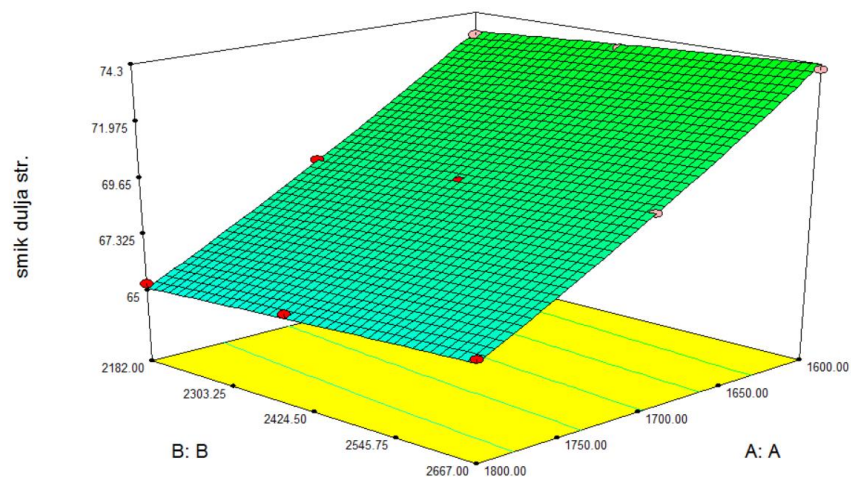
smik dulja str.

X1 = A: A  
X2 = C: CActual Factor  
B: B = 2424.50

Slika 5.9 Prikaz utjecaja faktora C-C i A-A na smično naprezanje

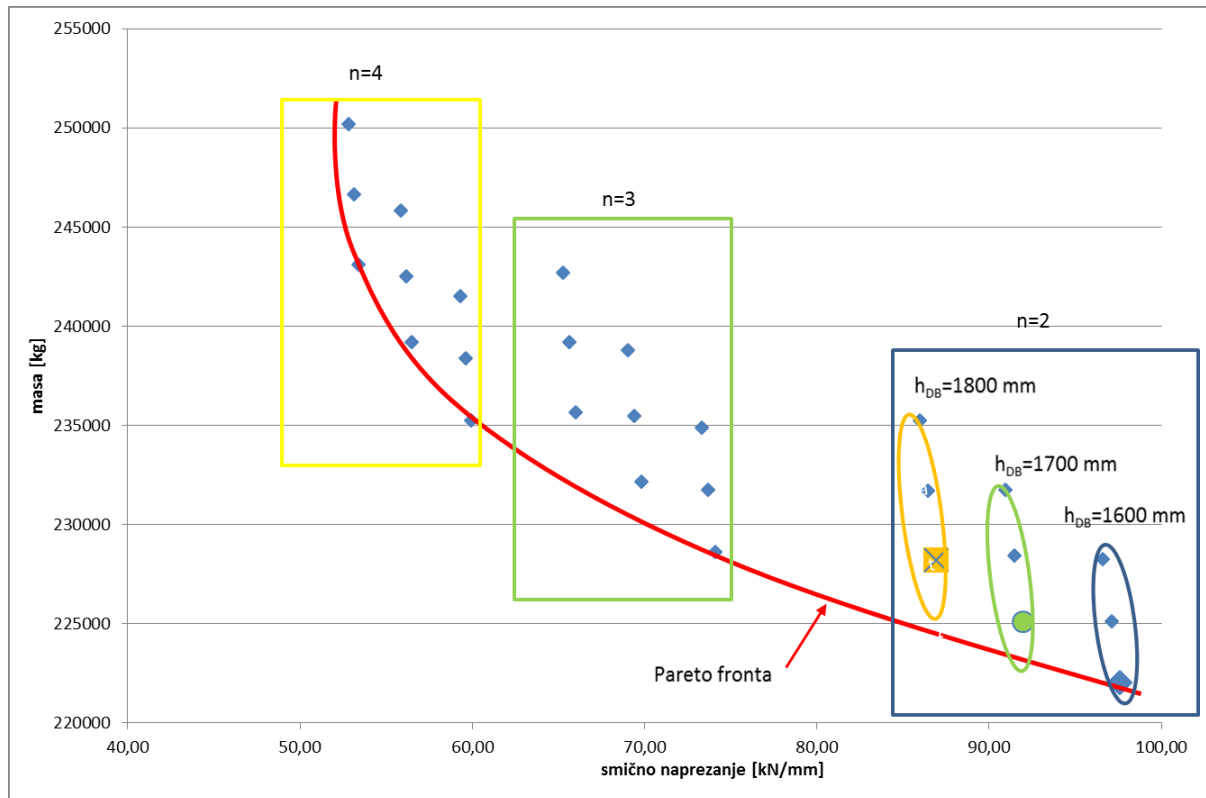
Design-Expert® Software

smik dulja str.

X1 = A: A  
X2 = B: BActual Factor  
C: C = 3.00

Slika 5.10 Prikaz utjecaja faktora B-B i A-A na smično naprezanje

Na slici 5.11 je prikazan dijagram na čijim su koordinatnim osima masa i smično naprezanje. Na dijagramu se jasno vidi da su podaci grupirani u skupine. Kranja lijeva skupina ima najveći broj uzdužnih nosača, dok krajnja desna ima najmanji. Skupine su također grupirane po visini dvodna. Točke sa manjom visinom dvodna su desnije unutar same skupine, što je analogno sa rasporedom koji je bio prikazan na slici 5.6.



**Slika 5.11 Prikaz Pareto fronte za odzivne varijable mase i smičnog naprezanja**

Što se tiče smičnih naprezanja tu je analizom varijance ustanovljeno da nijedan faktor nema značajan utjecaj s obzirom na drugog. Rezultati koji su to pokazali vidljivi su na slici 5.12.

**ANOVA for Response Surface Reduced Cubic Model**  
**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F
Model	10081.61	10	1008.16	1.09	0.4220	not significant
A-A	913.94	1	913.94	0.99	0.3345	
B-B	1202.75	1	1202.75	1.30	0.2704	
C-C	818.09	1	818.09	0.89	0.3605	
AB	468.08	1	468.08	0.51	0.4866	
AC	2079.26	1	2079.26	2.25	0.1528	
BC	2668.77	1	2668.77	2.89	0.1084	
A <sup>2</sup>	550.16	1	550.16	0.60	0.4513	
B <sup>2</sup>	12.85	1	12.85	0.014	0.9075	
C <sup>2</sup>	81.16	1	81.16	0.088	0.7706	
ABC	1294.39	1	1294.39	1.40	0.2536	
Residual	14767.36	16	922.96			
Cor Total	24848.97	26				

**Slika 5.12 Rezultati analize varijance smičnih naprezanja u poprečnom smjeru**

U slučaju smičnih naprezanja u smjeru kraće stranice razmak rebrenica nije dominantan faktor s obzirom da se promjenom razmaka rebrenica broj rebrenica ne mijenja značajno u odnosu na prijašnji projekt. Razlika u postotku iznosi oko 10% što nije slučaj kod smičnih naprezanja u smjeru dulje stranice.

## 5.4 Optimizacija

Design expert također nudi mogućnost optimizacije parametara. Potrebno je odzivnim varijablama pridodati težinske faktore koji određuju koje su nam karakteristike najpoželjnije. Potrebno je dalje zadati zadatak optimizacije koji može biti npr. minimiziranje mase, pomaka ili bilo koje odzive varijable koja se modelirala. Tu je još cijeli niz mogućnosti zadavanja različitih ograničenja vezanih uz faktore itd.

Na slici 5.13 se može vidjeti rješenje kada je najveća važnost stavljena na smanjivanje pomaka.

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A	is in range	1600	1800	1	1	3
B	is in range	2182	2667	1	1	3
C	is in range	2	4	1	1	3
deflection	minimize	5.88	7.76	1	10	3
masa	minimize	222001	250173	1	0.1	3

Solutions							
Number	A	B	C	deflection	masa	Desirability	
1	1800.00	2182.00	3.46	5.89595	246111	0.870	Selected
2	1800.00	2182.00	3.39	5.89809	245623	0.870	
3	1799.99	2182.00	3.44	5.89672	245951	0.870	
4	1800.00	2182.20	3.44	5.8965	246001	0.870	
5	1800.00	2182.00	3.36	5.89921	245369	0.870	
6	1800.00	2182.00	3.54	5.89317	246744	0.869	
7	1800.00	2182.00	3.55	5.89287	246813	0.869	
8	1800.00	2182.00	3.26	5.9024	244652	0.868	
9	1800.00	2182.00	3.15	5.90595	243858	0.866	
10	1800.00	2182.00	2.96	5.91253	242401	0.859	

Slika 5.13 Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranja pomaka



Na slici 5.14 se može vidjeti rješenje kada je najveća važnost stavljena na smanjivanje mase.

<b>Constraints</b>						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A	is in range	1600	1800	1	1	3
B	is in range	2182	2667	1	1	3
C	is in range	2	4	1	1	3
deflection	minimize	5.88	7.76	1	0.1	3
masa	minimize	222001	250173	1	10	3

<b>Solutions</b>							
Number	A	B	C	deflection	masa	Desirability	
1	<u>1608.98</u>	<u>2667.00</u>	<u>2.00</u>	<u>7.67515</u>	<u>222284</u>	<u>0.814</u>	<u>Selected</u>
2	1607.52	2667.00	2.00	7.68892	222239	0.814	
3	1611.25	2667.00	2.00	7.65364	222354	0.813	
4	1609.25	2665.27	2.00	7.67188	222310	0.812	
5	1613.05	2666.98	2.00	7.63664	222410	0.811	
6	1608.37	2663.60	2.00	7.67958	222300	0.810	
7	1609.10	2662.62	2.00	7.67229	222333	0.809	
8	1609.01	2667.00	2.01	7.67434	222353	0.805	
9	1607.72	2667.00	2.02	7.68593	222394	0.793	
10	1632.31	2667.00	2.00	7.45787	223006	0.761	

**Slika 5.14 Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranja mase**

Na slici 5.13 se vidi da je ponuđeno rješenje za minimiziranje pomaka dano sa najvećom visinom dvodna, dok je rješenje sa slike 5.14 za minimiziranje mase dano sa najmanjim brojem uzdužnjaka. Rješenja slijede iz dobivenih rezultata za utjecaj pojedinih faktora iz provedene analize varijance. Međutim ponuđena rješenja nisu iz ulaznih scenarija, što se vidi po ponuđenom broju uzdužnih nosača od 3.46 na slici 5.13 ili visini dvodna od 1608,98 na slici 5.14. Za ponuđena rješenja se mogu smatrati da leže na pareto fronti koja je opisan ranije u ovom radu.

Druga mogućnost optimizacije je kombiniranje značajnosti faktora. Na slici 5.15 su prikazana rješenja kad je značaj stavljen i na minimiziranje mase i pomaka, s tim da je veći značaj stavljen na pomak. Tako da dobiveno rješenje ima najveću visinu dvodna i najmanji broj uzdužnih nosača te je dan razmak između rebrenica koji bi najbolje odgovarao takvoj situaciji.

<b>Constraints</b>						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A	is in range	1600	1800	1	1	3
B	is in range	2182	2667	1	1	3
C	is in range	2	4	1	1	3
deflection	minimize	5.88	7.76	1	10	3
masa	minimize	222001	250173	1	5	3

<b>Solutions</b>							
Number	A	B	C	deflection	masa	Desirability	Selected
1	<u>1800.00</u>	<u>2666.99</u>	<u>2.00</u>	<u>6.1186</u>	<u>228192</u>	<u>0.273</u>	Selected
2	1799.99	2664.37	2.00	6.11793	228222	0.272	
3	1800.00	2656.93	2.00	6.11574	228310	0.271	
4	1800.00	2667.00	2.01	6.11828	228257	0.271	
5	1800.00	2651.06	2.00	6.11405	228380	0.271	
6	1799.75	2646.41	2.00	6.11444	228428	0.269	
7	1800.00	2635.35	2.00	6.10948	228569	0.269	
8	1800.00	2667.00	2.02	6.11783	228349	0.269	
9	1800.00	2629.68	2.00	6.10782	228638	0.268	
10	1798.67	2667.00	2.00	6.1277	228151	0.267	

**Slika 5.15 Optimizacija konstrukcije dvodna sa ciljem minimiziranja pomaka i mase**  
 Kombiniranjem različitih ograničenja moguće je pronaći rješenje izvan ulaznih scenarija koje će zadovoljavati zahtjeve koji su postavljeni, što nudi široku mogućnost pri analizi parametara i odlučivanju o konačnom projektu.

## 6. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad je proveden analitički proračun konstrukcije roštilja dvodna broda za rasuti teret kao ortotropne ploče upotrebom Shadeovih dijagrama te numerički proračun konstrukcije roštilja dvodna upotrebom metode konačnih elemenata. Uz proračun konstrukcije roštilja dvodna provedena je analiza senzitivnosti parametara koji utječu na odzivne varijable iz proračuna.

Pokazalo se da Shadeova analitička metoda daje dobre rezultate u usporedbi sa numeričkim proračunom. S obzirom na brzinu postupka, metoda je pogodna za brzu, preliminarnu procjenu pomaka i naprezanja. Nadalje pruža i mogućnost brze usporedbe raznih varijanti dvodna.

Provedba analize senzitivnosti se bazirala na metodi analize varijance koja daje rezultate koji su u skladu sa teorijom i očekivanjima. Njom su se uspjeli izdvojiti parametri odnosno faktori koji imaju dominantan utjecaj na odziv. Metoda je provedena u sklopu programskog paketa Design expert koji osim brojčanih vrijednosti i daje razne grafičke prikaze za lakši postupak analize i odlučivanja.

Provedba analize varijance je pokazala da faktor koji najviše utječe na progib i normalna naprezanja u dvodnu je visina dvodna, dok je broj uzdužnih nosača faktor koji najviše utječe na masu dvodna. Faktor koji najviše utječe na smična naprezanja u uzdužnom smjeru je također broj uzdužnih nosača. Tako da što je veća visina dvodna to je veća i krutost dvodna te manji progib. Što je veći broj uzdužnih nosača to je i veća masa dvodna, no smična naprezanja u uzdužnom smjeru su manja.

Design expert također nudi opciju optimizacije koja može pomoći pri odabiru najboljeg projekta pri velikom broju parametara.

## LITERATURA

- [1] IACS: Common Structural Rules for Bulk Carriers, July 2012.
- [2] <http://bulkcarrierguide.com/arrangement.html>
- [3] E. Lehmann, M. Bockenbauer, W. Fricke, H.-J. Hansen, Structural design aspects of bulk carriers, Germanischer Lloyd, Transactions on the Built Environment, 1997.
- [4] J. Uršić, Čvrstoća broda III, Sveučilište u Zagrebu, 1992.
- [5] U.S. Navy salvor's handbook, Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, August 2000.
- [6] Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Dio 2. – trup, HRB, 2006
- [7] J. Uršić, Čvrstoća broda II, Sveučilište u Zagrebu, 1992.
- [8] J. Sorić, Metoda konačnih elemenata
- [9] Maestro Manual, Version MM 10.1, DRS, USA, 2014
- [10] Stephen L. R. Ellison, Vicki J. Barwick, Trevor J. Duguid Farrant, Practical Statistics for the Analytical Scientist, RSC Publishing, 2009.

## **PRILOZI**

- A. Osnovni podaci o zadanoj konstrukciji
- B. Schadeovi dijagrami
- C. Proračun tlaka prema HRB-u
- D. Proračun ulaznih parametara za analizu senzitivnosti
- E. Rezultati analize varijance odzivnih varijabli

## PRILOG A - Osnovni podaci o zadanoj konstrukciji

Osnovni podaci o brodu:

Loa 183m

Lpp 175 m

L 173.63 m

B 30m

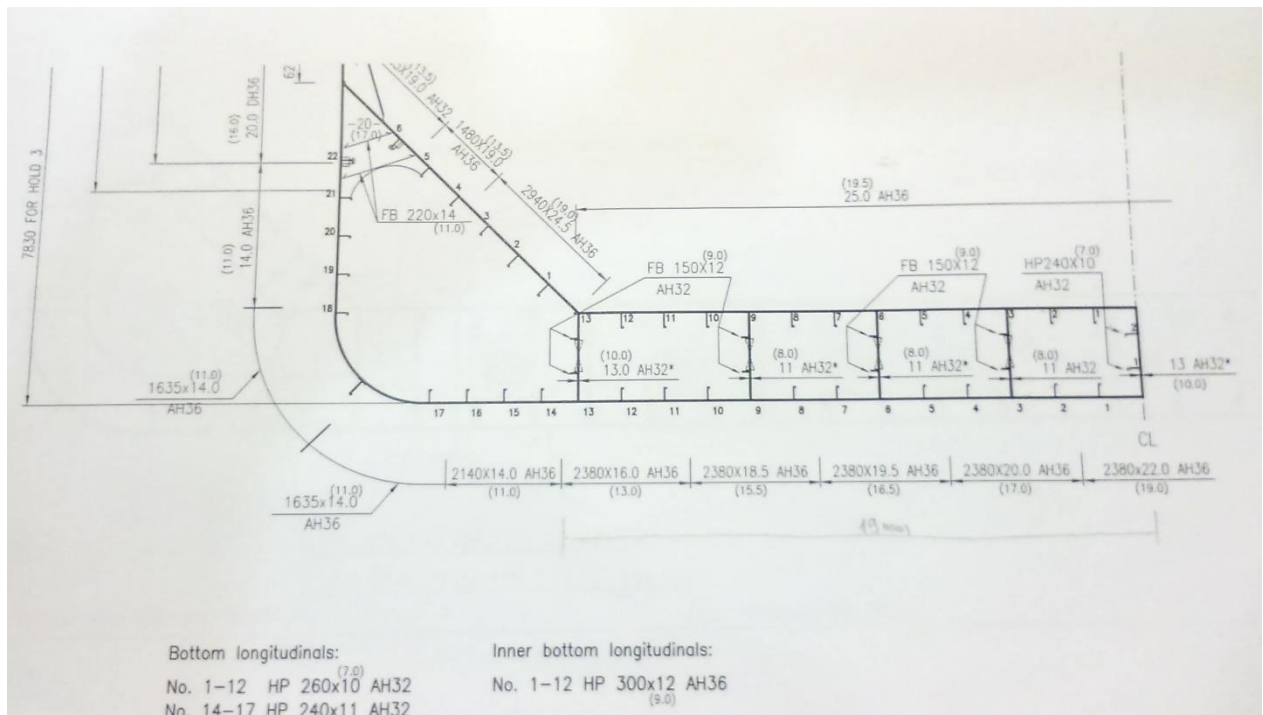
D 15.6m

v 15.8čv

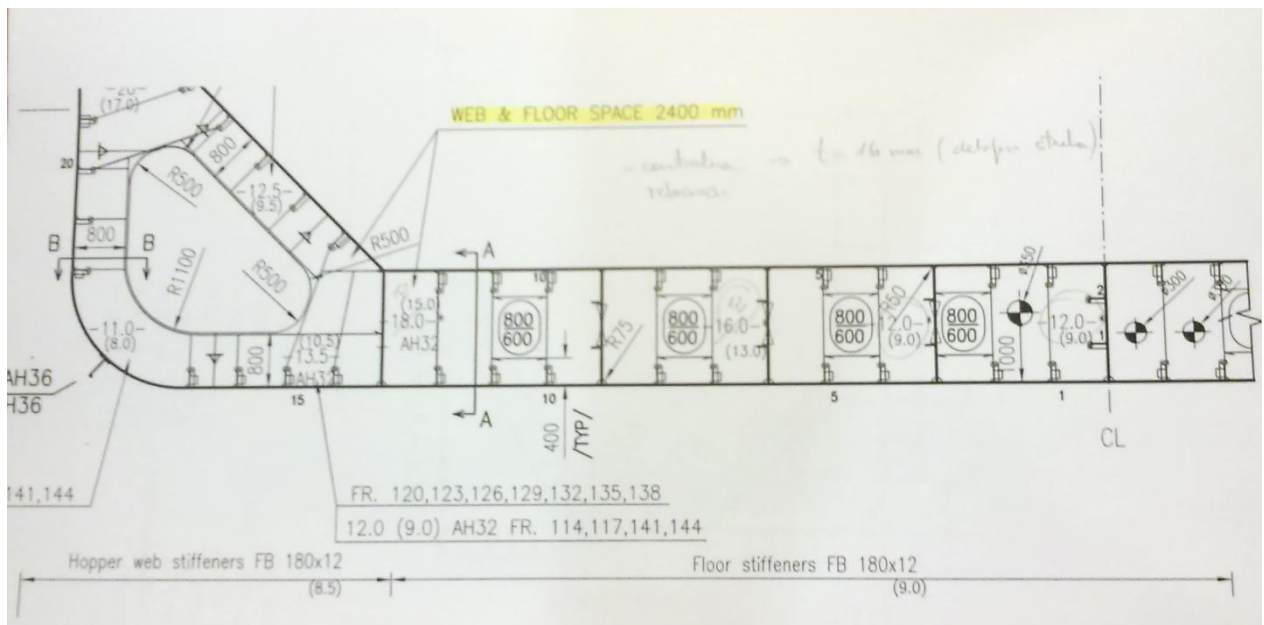
s\_ok 2.4m (razmak okvira)

s\_uz 0.8m (razmak uzdužnjaka)

d\_scant 11.3m



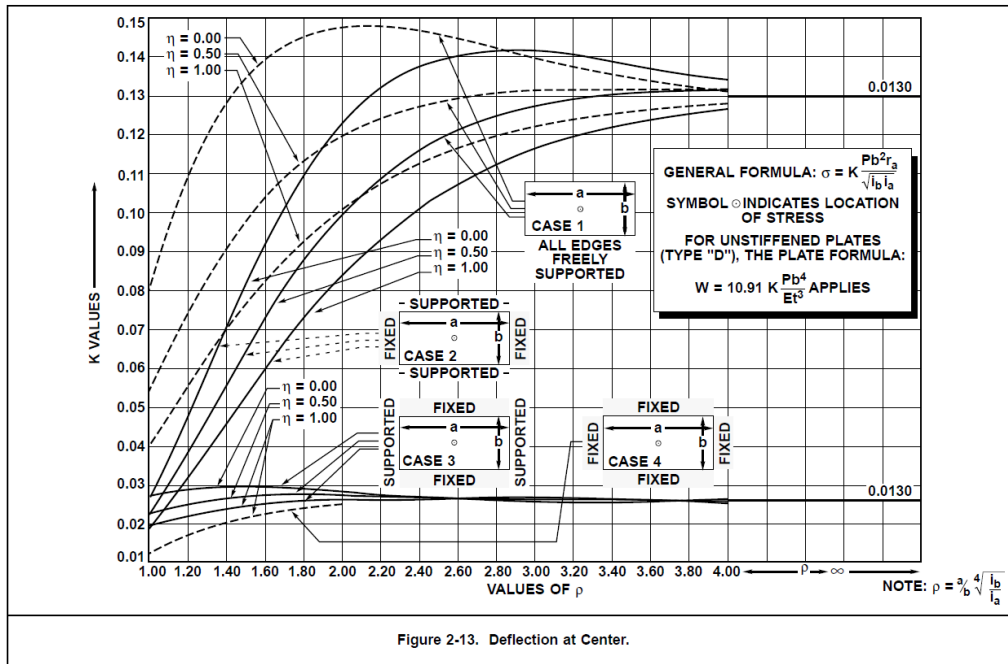
**Slika A.1** Poprečni presjek skladišta broda za rasuti teret – prikaz uzdužnjaka i debljina oplate



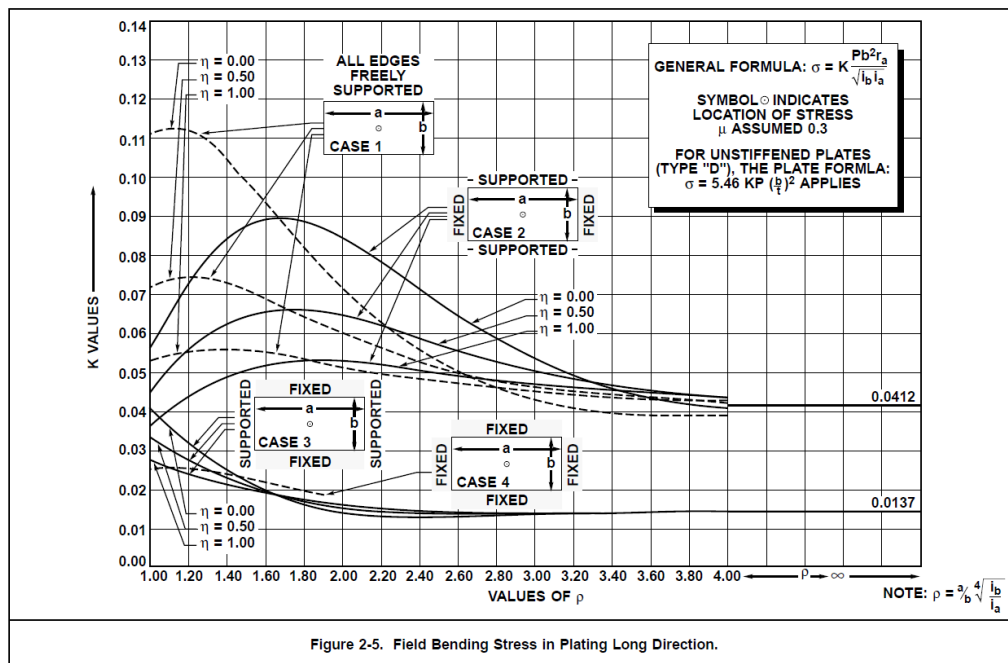
**Slika A.2 Poprečni presjek skladišta broda za rasuti teret - prikaz rebrenica**

## PRILOG B - Schadeovi dijagrami

Dijagrami preuzeti iz literature : U.S. Navy salvor's handbook, Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, August 2000.



Slika B.1 Progib u sredini ploče



Slika B.2 Naprezanje savijanja u polju oploćenja u smjeru dulje stranice



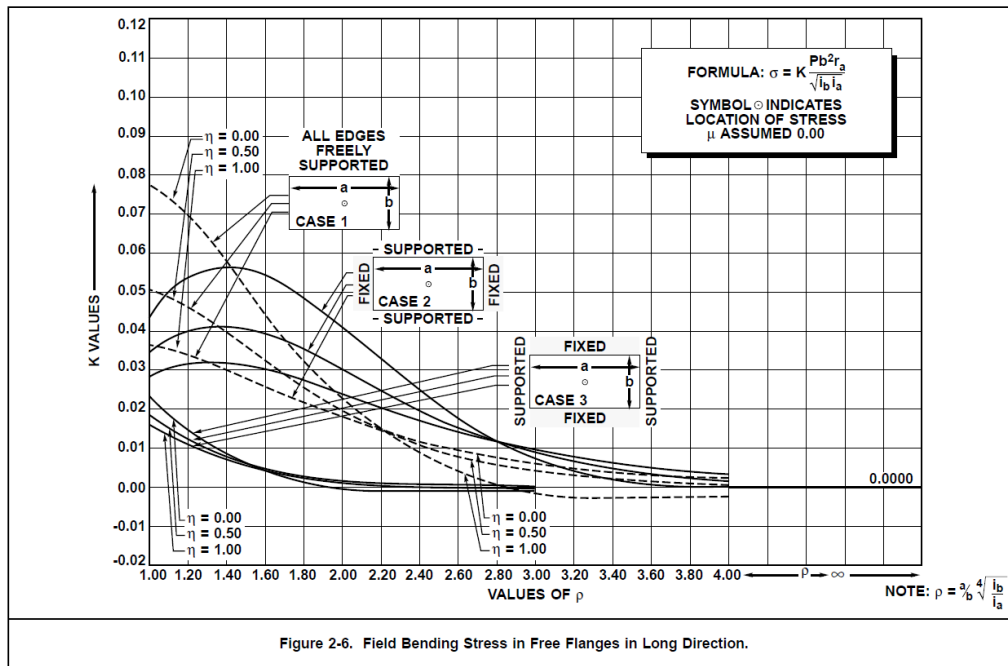


Figure 2-6. Field Bending Stress in Free Flanges in Long Direction.

Slika B.3 Naprezanje savijanja u struku u smjeru dulje stranice

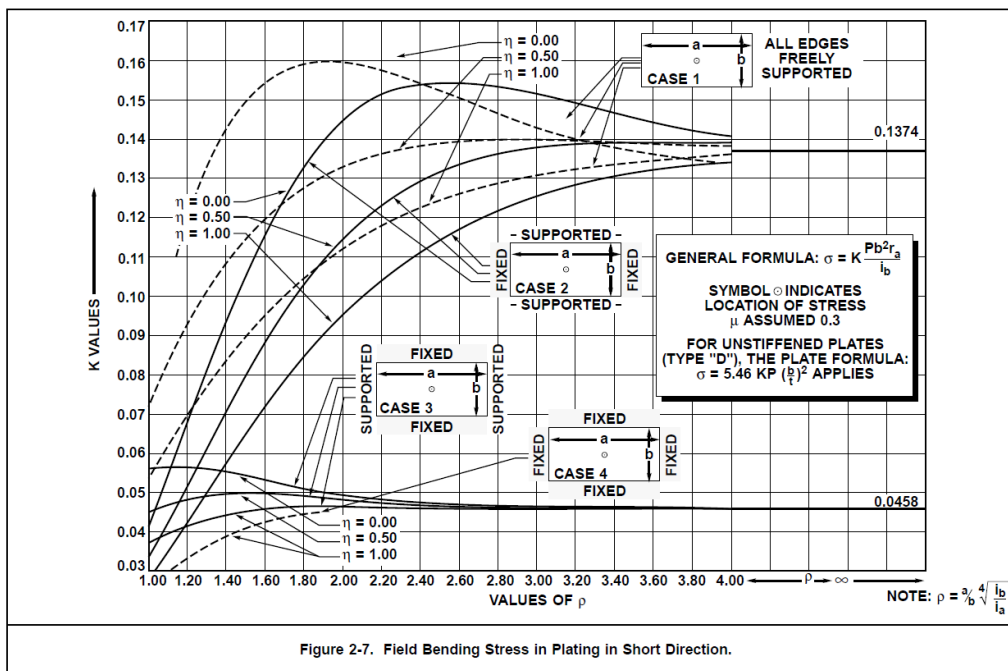
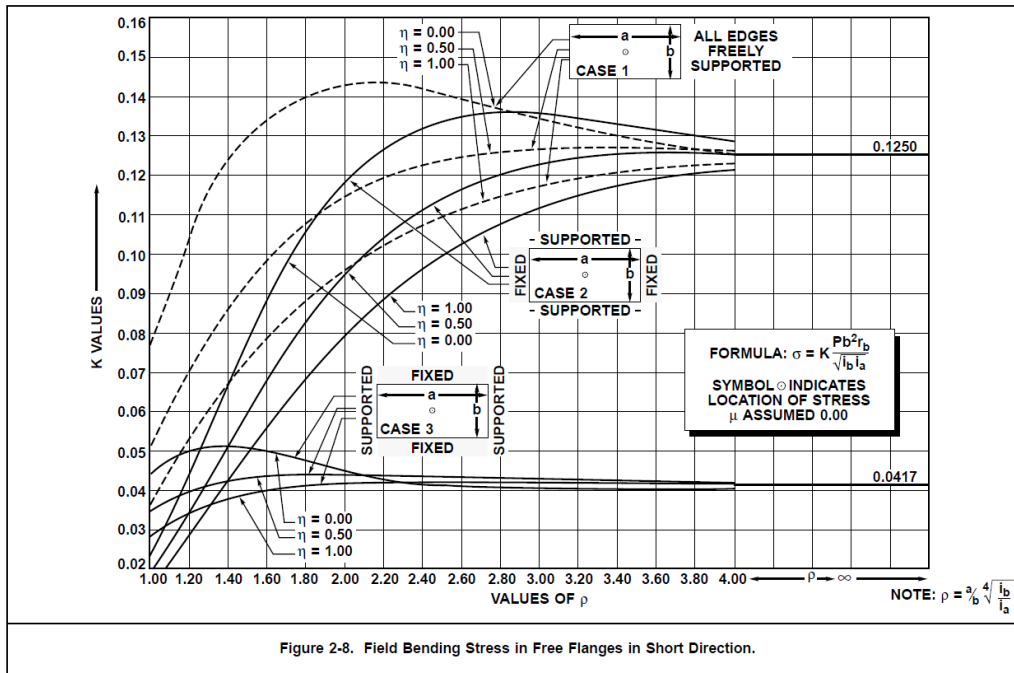
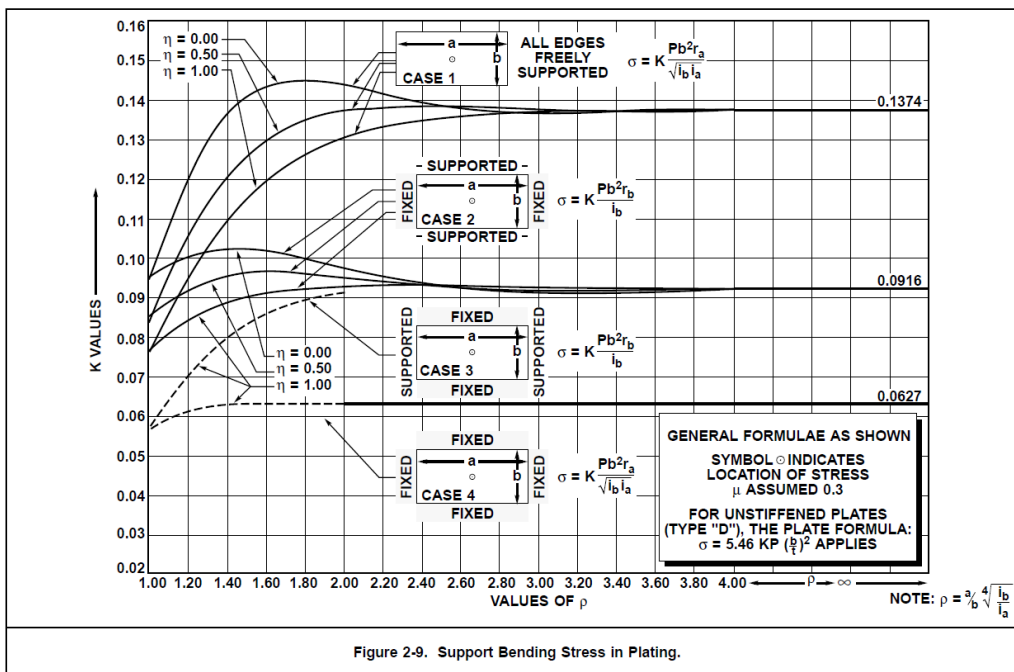


Figure 2-7. Field Bending Stress in Plating in Short Direction.

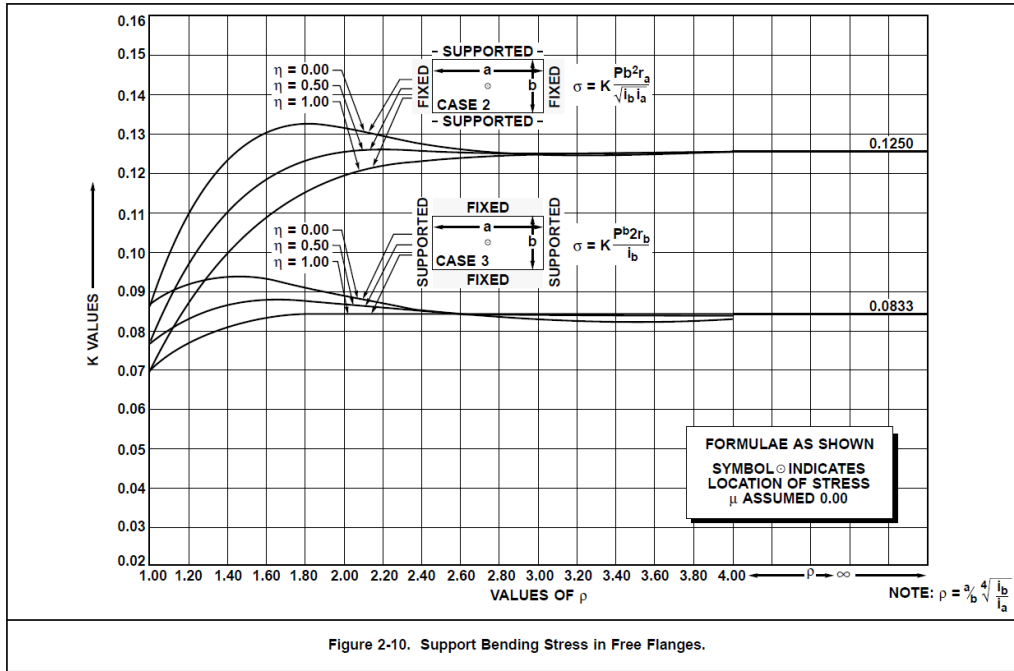
Slika B.4 Naprezanje savijanja u polju oploćenja u smjeru kraće stranice



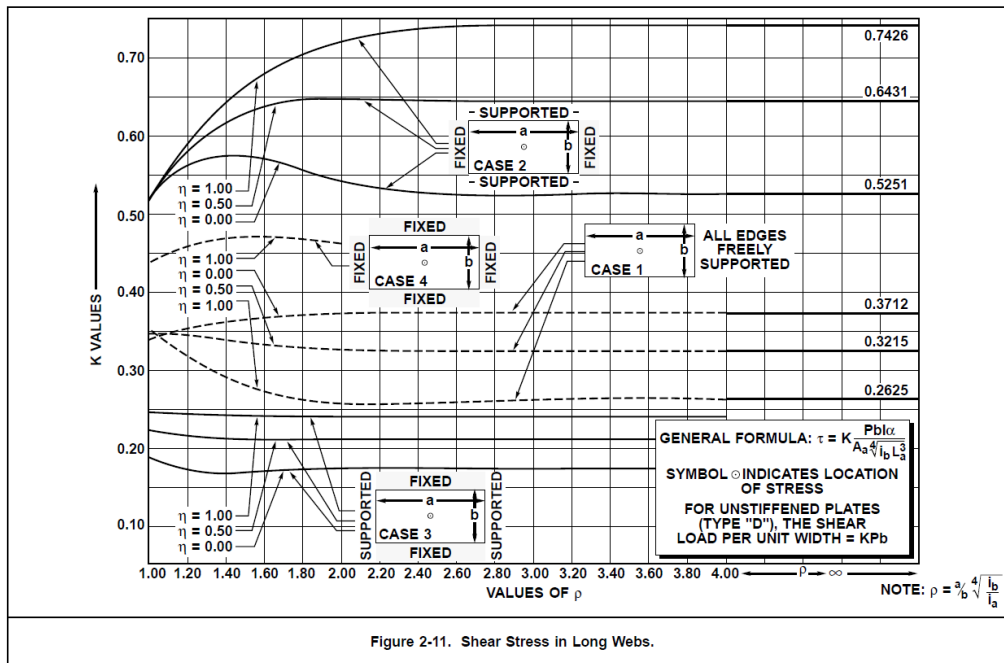
Slika B.5 Naprezanje savijanja u struku u smjeru kraće stranice



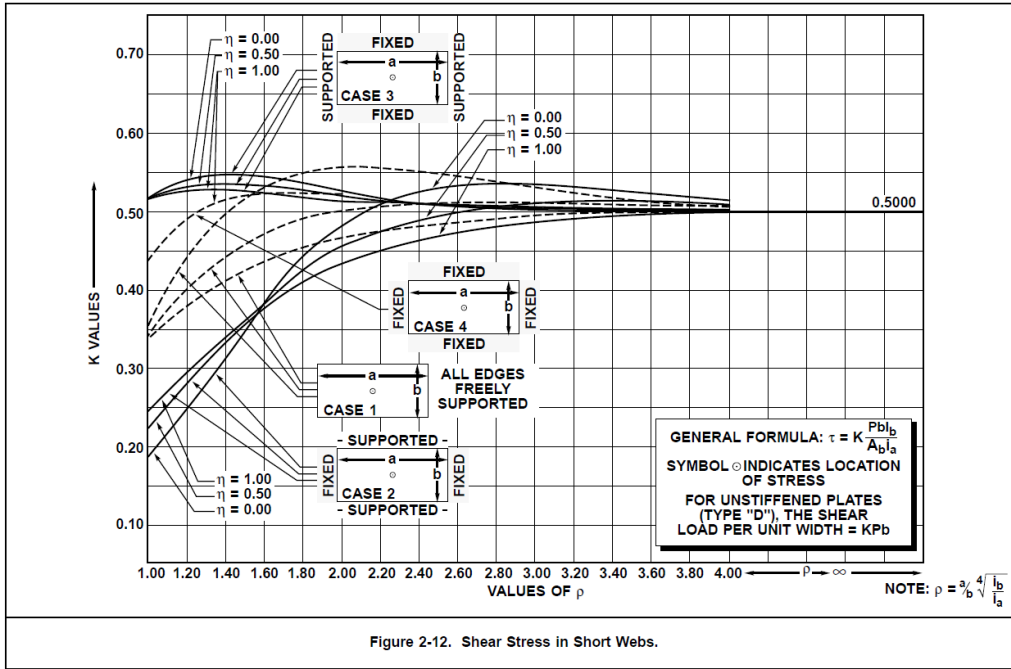
Slika B.6 Naprezanje savijanja u polju oploćenja na potpuno upetim mjestima



Slika B.7 Naprezanje savijanja u struku na potpuno upetim mjestima



Slika B.8 Smično naprezanje u smjeru dulje stranice



Slika B.9 Smično naprezanje u smjeru kraće stranice

## PRILOG C - Proračun tlaka prema HRB-u

Proračun tlaka je proveden po pravilima HRB-a.

Osnovni podaci o brodu:

Loa 183m

Lpp 175 m

L 173.63 m

B 30m

D 15.6m

v 15.8čv

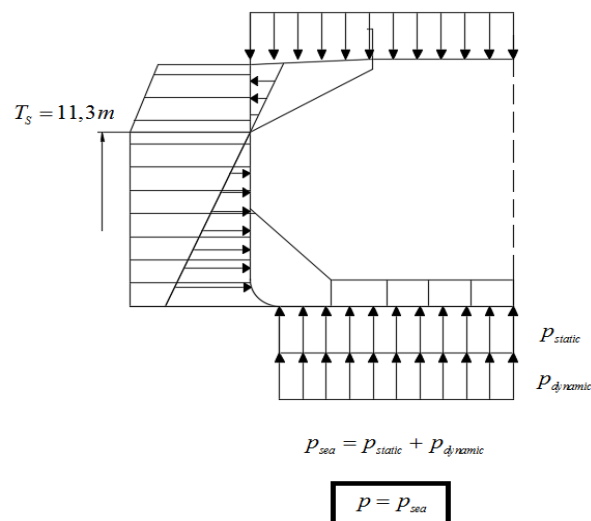
s\_ok 2.4m (razmak okvira)

s\_uz 0.8m (razmak uzdužnjaka)

d\_scant 11.3m

### Prvi slučaj opterećenja (stanje alternativnog krcanja):

Brod je na projektnom gazu od 11,3 m. Na konstrukciju dvodna djeluje statički i dinamički tlak od ispod.



Slika C.1 Prvi slučaj opterećenja

**(3.2.3) Opterećenje broskog dna:**

$$p_B = 10 \cdot d + p_o \cdot C_F \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$C_F$  = koeficijent (tablica 3.2.2.1)

$$C_F = 1$$

$$d = 11,3 \text{ m}$$

$p_o$  = osnovno vanjsko opterećenje

$$p_o = 2,1 \cdot (C_b + 0,7) \cdot C_W \cdot C_L \cdot f \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$f = 1$$

$$C_L = 1$$

$$C_W = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}$$

$$C_W = 9,3294$$

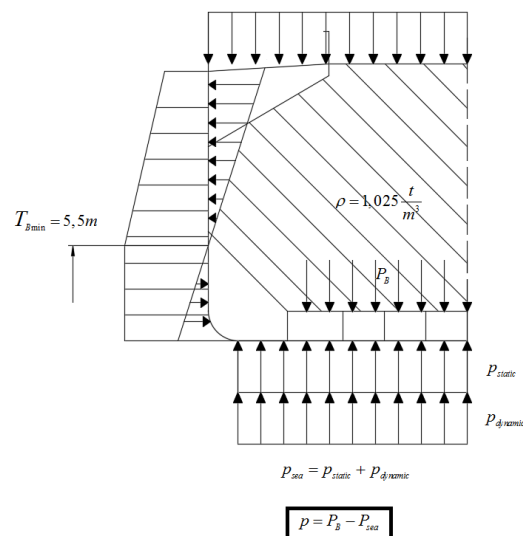
$$p_o = 29,52 \text{ kN/m}^2$$

$$p_B^1 = 142,5209 \text{ kN/m}^2$$

$$p_I = p_B^1 = 142,5209 \text{ kN/m}^2$$

**Drugi slučaj opterećenja (balastno stanje):**

Brod je na minimalnom balastnom gazu od 5,5 m. Tank je napunjen morem. Na strukturu dvodna djeluje statički i dinamički tlak od ispod, te tlak od tereta od iznad. Rezultantni tlak je jednak razlici internog i eksternog tlaka.



**Slika C.2 Drugi slučaj opterećenja**

**INTERNO OPTEREĆENJE**

$$p_{\text{int}} = \max(p_{\text{DB}}, p_1, p_2)$$

**(3.3.2) Opterećenje pokrova dvodna**

(3.3.2.1) Opterećenje pokrova dvodna uslijed tereta određuje se po izrazu:

$$p_{\text{DB1}} = 9,81 \cdot (G/V) \cdot h \cdot (1 + a_v) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

gdje je:

G = masa tereta u skladištu [t]

V = volumen skladišta [m<sup>3</sup>]

$$G/V = \rho ;$$

$$\rho = 1,025 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

h = visina najviše točke tereta iznad pokrova dvodna [m]

$$h = 13,9 \text{ m}$$

$a_v$  = koeficijent ubrzanja (prema 3.3.1.1)

$$a_v = F \cdot m$$

$$F = 0,11 \cdot v / \sqrt{L}$$

$$F = 0.111$$

m = 1,0, za  $0,2 \leq (x/L) < 0,7$

$$a_v = 0,1319$$

$$p_{\text{DB}} = 158,20 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

**(3.4) OPTEREĆENJE STRUKTURE TANKA**

(3.4.1) Opterećenja punih tankova

(3.4.1.1) Opterećenja koja djeluju u punim tankovima tijekom plovidbe određuju se po izrazu:

$$p_1 = 9,81 \cdot h_1 \cdot \rho \cdot (1 + a_v) + 100 \cdot p_v, \text{ [kN/m}^2\text{]},$$

gdje je:

$h_1$  = udaljenost od središta opterećenja do vrha tanka, [m],

$a_v$  = prema 3.3.1.1;

$p_v$  = tlak otvaranja prekotlačnog ventila, [bar],(ako postoji);

$p_{vmin}$  = 0,2 bar (2,0 mSV), za teretne tankove tankera;

$$h_1 = 13,9 \text{ m}$$

$$a_v = 0,1319$$

$$p_1 = 178,20 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

(3.4.1.2) Najveće statičko opterećenje je:

$$p_2 = 9,81 \cdot h_2, \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$h_2$  = udaljenost od središta opterećenja do vrha preljeva, ili do razine od 2,5 m iznad krova tanka (što je više). Vodovi ventilacije teretnih tankova na tankerima se ne mogu smatrati kao preljevi.

$$h_2 = 16,4 \text{ m}$$

$$p_2 = 160,88 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$p_{int} = \max(p_{DB}, p_1, p_2) = 178,20 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$



**EKSTERNO OPTEREĆENJE****(3.2.3) Opterećenje brodskog dna:**

$$p_B = 10 \cdot d + p_o \cdot C_F \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$C_F$  = koeficijent (tablica 3.2.2.1)

$$C_F = 1$$

$$d = 5,5 \text{ m}$$

$p_o$  = osnovno vanjsko opterećenje

$$p_o = 2,1 \cdot (C_b + 0,7) \cdot C_W \cdot C_L \cdot f \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$f = 1$$

$$C_L = 1$$

$$C_W = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}$$

$$C_W = 9,3294$$

$$p_o = 29,52 \text{ kN/m}^2$$

$$p_B = 84,52 \text{ kN/m}^2$$

Ukupni tlak:

$$p_{II} = p_{int} - p_{ext}$$

$$p_{II} = 93,68 \text{ kN/m}^2$$

**Tablica C.1    Rezultati proračuna tlaka po HRB-u**

SLUČAJ OPTEREĆENJA	TLAK [kN/m <sup>2</sup> ]
I slučaj – alternativno krcanje	142,52
II slučaj – teški balast	93,68

Može se primijetiti kako je tlak koji djeluje na strukturu veći kod stanja alternativnog krcanja.

## PRILOG D – Proračun ulaznih parametara za analizu senzitivnosti

### Tablice D.1 Proračun ortotropnih ploča za analizu senzitivnosti sa visinom dvodna 1700 mm

OSNOVNE GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE		1	2	3	4	5	6	7	8	9
dulja stranica [cm]	a	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
kraća stranica [cm]	b	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080
ukupna visina dvodna [cm]	h	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4
debljina oplata dna [cm]	td	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
površina uzdužnjaka dna [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>d</sub>	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
broj uzdužnjaka u pojasu	nd	2	2	2	2	2	2	2	2	2
debljina pokrova dvodna [cm]	tg	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
površina uzdužnjaka pokrova dna [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>g</sub>	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7
broj uzdužnjaka u pojasu	ng	2	2	2	2	2	2	2	2	2
UZDUŽNI NOSAČI										
broj uzdužnih nosača	n <sub>a</sub>	7	7	7	5	5	5	9	9	9
širina pojasa uzdužnog nosača [cm]	s <sub>a</sub>	260	260	260	346,6667	346,6667	346,6667	208	208	208
CENTRALNI UZDUŽNI NOSAČ										
debljina struka centralnog nosača [cm]	t <sub>sa</sub>	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>a</sub>	226,72	226,72	226,72	226,72	226,72	226,72	226,72	226,72	226,72
OSTALI UZDUŽNI NOSAČI										
debljina struka ostalih nosača [cm]	t <sub>sna</sub>	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
REBRENICE										
broj rebrenica	n <sub>b</sub>	11	12	10	11	12	10	11	12	10
širina pojasa rebrenice [cm]	s <sub>b</sub>	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667
CENTRALNA REBRENICA										
debljina struka centralne rebrenice [cm]	t <sub>sb</sub>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>b</sub>	279,04	279,04	279,04	279,04	279,04	279,04	279,04	279,04	279,04
OSTALE REBRENICE										
debljina struka ostalih rebrenica [cm]	t <sub>snb</sub>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
TLAK [N/cm <sup>2</sup> ]	p	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252
modul elastičnosti [N/cm <sup>2</sup> ]	E	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07

IZRAČUN OSTALIH GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA		1	2	3	4	5	6	7	8	9
težište donjeg pojasa lima [cm]	zd	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
težište struka [cm]	zs	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9
težište gornjeg pojasa lima [cm]	zg	173,15	173,15	173,15	173,15	173,15	173,15	173,15	173,15	173,15
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pa}^d$	494	494	494	658,6667	658,6667	658,6667	395,2	395,2	395,2
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pa}^g$	650	650	650	866,6667	866,6667	866,6667	520	520	520
površina struka centralnog uzdužnog nosača [cm <sup>2</sup> ]	$A_{sa}$	221	221	221	221	221	221	221	221	221
površina struka ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>2</sup> ]	$A_{sna}$	187	187	187	187	187	187	187	187	187
težište centralnog uzdužnog nosača [cm]	$e_a (e_a^d)$	96,86571	96,86571	96,86571	97,2861	97,2861	97,2861	96,47803	96,47803	96,47803
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_a^g$	77,53429	77,53429	77,53429	77,1139	77,1139	77,1139	77,92197	77,92197	77,92197
težište ostalih uzdužnih nosača [cm]	$e_{na} (e_{na}^d)$	97,12029	97,12029	97,12029	97,49233	97,49233	97,49233	96,77349	96,77349	96,77349
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_{na}^g$	77,27971	77,27971	77,27971	76,90767	76,90767	76,90767	77,62651	77,62651	77,62651
moment tromosti samo nosive širine cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_a'$	9570405	9570405	9570405	12343597	12343597	12343597	7906897	7906897	7906897
moment tromosti poprečnog presjeka cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_a$	10124596	10124596	10124596	12899678	12899678	12899678	8459412	8459412	8459412
moment tromosti nosive širine ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{pa}$	9569034	9569034	9569034	12342481	12342481	12342481	7905313	7905313	7905313
krutost u uzdužnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	$I_{na}$	10038926	10038926	10038926	12813820	12813820	12813820	8373901	8373901	8373901
jedinična krutost duljih nosača [cm <sup>3</sup> ]	$i_a$	38693,63	38693,63	38693,63	37045,5	37045,5	37045,5	40341,36	40341,36	40341,36
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pb}^d$	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	$A_{pb}^g$	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667
površina struka centralne rebrenice [cm <sup>2</sup> ]	$A_b^s$	272	272	272	272	272	272	272	272	272
površina struka ostalih rebrenica [cm <sup>2</sup> ]	$A_{nb}^s$	204	204	204	204	204	204	204	204	204
težište centralnog poprečnog nosača [cm]	$e_b (e_b^d)$	96,35542	96,16564	96,55314	96,35542	96,16564	96,55314	96,35542	96,16564	96,55314
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_b^g$	78,04458	78,23436	77,84686	78,04458	78,23436	77,84686	78,04458	78,23436	77,84686
težište ostalih poprečnih nosača [cm]	$e_{ba} (e_{ba}^d)$	96,86571	96,70694	97,02972	96,86571	96,70694	97,02972	96,86571	96,70694	97,02972
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	$e_{nb}^g$	77,53429	77,69306	77,37028	77,53429	77,69306	77,37028	77,53429	77,69306	77,37028
moment tromosti nosive širine cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_b'$	8932875	8235041	9785892	8932875	8235041	9785892	8932875	8235041	9785892
moment tromosti poprečnog presjeka cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_b$	9612260	8913460	10466304	9612260	8913460	10466304	9612260	8913460	10466304
moment tromosti poprečnog presjeka poprečnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	$I_{pb}$	8929810	8231803	9783017	8929810	8231803	9783017	8929810	8231803	9783017
krutost u poprečnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	$I_{nb}$	9441370	8742723	10295249	9441370	8742723	10295249	9441370	8742723	10295249
jedinična krutost kraćih nosača [cm <sup>3</sup> ]	$i_b$	39481,45	40213,09	38749,73	39481,45	40213,09	38749,73	39481,45	40213,09	38749,73

PODACI ZA OČITANJE		1	2	3	4	5	6	7	8	9
torzioni koeficijent	n	0,949498	0,947359	0,951718	0,954477	0,952327	0,956709	0,944929	0,9428	0,947139
virtualni omjer stranica ploče	q	1,159675	1,165011	1,154264	1,172364	1,177758	1,166893	1,147648	1,152928	1,142293
KOEFIČIJENTI										
progib u sredini	$K_1$	0,002091	0,0021	0,002082	0,002104	0,002113	0,002095	0,002079	0,002088	0,00207
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče	$K_2$	0,0248	0,024723	0,024877	0,024545	0,024469	0,024622	0,025047	0,02497	0,025125
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče	$K_3$	0,012989	0,012895	0,013085	0,012733	0,012639	0,012828	0,013236	0,013142	0,013332
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	$K_4$	0,040571	0,040686	0,040452	0,040697	0,040811	0,040579	0,040445	0,040561	0,040326
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	$K_5$	0,032558	0,032695	0,032418	0,032761	0,032897	0,032622	0,03236	0,032498	0,032219
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	$K_6$	0,081961	0,082134	0,081783	0,082208	0,082379	0,082031	0,081718	0,081893	0,081539
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	$K_7$	0,074804	0,074962	0,074641	0,075047	0,075203	0,074886	0,074564	0,074723	0,074399
smično naprezanje u smjeru dulje stranice	$K_8$	0,203949	0,203774	0,204129	0,204106	0,203931	0,204287	0,203816	0,203641	0,203995
smično naprezanje u smjeru kraće stranice	$K_9$	0,506372	0,506563	0,506175	0,506738	0,506921	0,506549	0,505996	0,506195	0,505791

PRORAČUN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
progib u sredini ploče [cm]	w	0,673	0,663	0,683	0,677	0,667	0,687	0,669	0,660	0,679	
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ g	3033,412	2996,392	3071,488	3051,629	3014,368	3089,955	3015,407	2978,629	3053,233	
	$\sigma_x$ d	3789,725	3743,474	3837,294	3849,905	3802,896	3898,256	3733,486	3687,949	3780,319	
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ g S	1588,809	1562,882	1615,547	1583,02	1556,985	1609,872	1593,512	1567,7	1620,13	
	$\sigma_x$ d S	1984,943	1952,551	2018,347	1997,122	1964,276	2030,998	1972,986	1941,026	2005,942	
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g	4944,962	4880,602	5010,9	4960,337	4895,628	5026,636	4929,702	4865,685	4995,287	
	$\sigma_y$ d	6105,15	5999,234	6214,998	6124,132	6017,704	6234,516	6086,31	5980,898	6195,633	
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g S	3968,404	3922,082	4015,701	3993,126	3946,297	4040,946	3944,217	3898,386	3991,006	
	$\sigma_y$ d S	4899,472	4821,022	4980,657	4929,994	4850,787	5011,968	4869,611	4791,895	4950,028	
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g	9989,887	9852,741	10130,71	10019,93	9882,111	10161,45	9960,273	9823,779	10100,43	
	$\sigma_y$ d	12333,72	12110,99	12565,08	12370,81	12147,09	12603,2	12297,16	12075,39	12527,51	
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ g S	9117,486	8992,317	9245,999	9147,126	9021,251	9276,374	9088,212	8963,739	9216,001	
	$\sigma_y$ d S	11256,63	11053,35	11467,77	11293,23	11088,92	11505,45	11220,49	11018,22	11430,57	
smično naprezanje u smjeru dulje stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_a$	6942,594	6904,867	6981,29	9146,082	9096,373	9197,07	5618,445	5587,919	5649,754	
smično naprezanje u smjeru kraće stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_b$	13097,09	11928,48	14524,4	13106,57	11936,91	14535,14	13087,37	11919,8	14513,39	
VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]		v	29996960	30421280	29572640	29099360	29523680	28675040	30894560	31318880	30470240
MASA [kg]		m	235476,1	238807	232145,2	228430	231760,9	225099,1	242522,3	245853,2	239191,4

Tablice D.2 Proračun ortotropnih ploča za analizu senzitivnosti sa visinom dvodna 1600 mm

OSNOVNE GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE	10	11	12	13	14	15	16	17	18
dulja stranica [cm]	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
kraća stranica [cm]	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080
ukupna visina dvodna [cm]	164,4	164,4	164,4	164,4	164,4	164,4	164,4	164,4	164,4
debljina oplata dna [cm]	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
površina uzdužnjaka dna [cm <sup>2</sup> ]	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
broj uzdužnjaka u pojasu	2	2	2	2	2	2	2	2	2
debljina pokrova dvodna [cm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
površina uzdužnjaka pokrova dna [cm <sup>2</sup> ]	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7
broj uzdužnjaka u pojasu	2	2	2	2	2	2	2	2	2
UZDUŽNI NOSAČI									
broj uzdužnih nosača	7	7	7	5	5	5	9	9	9
širina pojasa uzdužnog nosača [cm]	260	260	260	346,6667	346,6667	346,6667	208	208	208
CENTRALNI UZDUŽNI NOSAČ									
debljina struka centralnog nosača [cm]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	213,72	213,72	213,72	213,72	213,72	213,72	213,72	213,72	213,72
OSTALI UZDUŽNI NOSAČI									
debljina struka ostalih nosača [cm]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
REBRENICE									
broj rebrenica	11	12	10	11	12	10	11	12	10
širina pojasa rebrenice [cm]	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667
CENTRALNA REBRENICA									
debljina struka centralne rebrenice [cm]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	263,04	263,04	263,04	263,04	263,04	263,04	263,04	263,04	263,04
OSTALE REBRENICE									
debljina struka ostalih rebrenica [cm]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
TLAK [N/cm <sup>2</sup> ]	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252
modul elastičnosti [N/cm <sup>2</sup> ]	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07

IZRAČUN OSTALIH GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA	10	11	12	13	14	15	16	17	18
težište donjeg pojasa lima [cm]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
težište struka [cm]	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9
težište gornjeg pojasa lima [cm]	163,15	163,15	163,15	163,15	163,15	163,15	163,15	163,15	163,15
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	494	494	494	658,6667	658,6667	658,6667	395,2	395,2	395,2
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	650	650	650	866,6667	866,6667	866,6667	520	520	520
površina struka centralnog uzdužnog nosača [cm <sup>2</sup> ]	208	208	208	208	208	208	208	208	208
površina struka ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>2</sup> ]	176	176	176	176	176	176	176	176	176
težište centralnog uzdužnog nosača [cm]	91,38462	91,38462	91,38462	91,764	91,764	91,764	91,03333	91,03333	91,03333
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	73,01538	73,01538	73,01538	72,636	72,636	72,636	73,36667	73,36667	73,36667
težište ostalih uzdužnih nosača [cm]	91,61455	91,61455	91,61455	91,94953	91,94953	91,94953	91,30117	91,30117	91,30117
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	72,78545	72,78545	72,78545	72,45047	72,45047	72,45047	73,09883	73,09883	73,09883
moment tromosti samo nosive širine cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	8490721	8490721	8490721	10951278	10951278	10951278	7014728	7014728	7014728
moment tromosti poprečnog presjeka cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	8953166	8953166	8953166	11415250	11415250	11415250	7475812	7475812	7475812
moment tromosti nosive širine ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	8489606	8489606	8489606	10950376	10950376	10950376	7013432	7013432	7013432
krutost u uzdužnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	8881682	8881682	8881682	11343617	11343617	11343617	7404454	7404454	7404454
jedinična krutost duljih nosača [cm <sup>3</sup> ]	34229,05	34229,05	34229,05	32790,85	32790,85	32790,85	35666,95	35666,95	35666,95
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667
površina struka centralne rebrenice [cm <sup>2</sup> ]	256	256	256	256	256	256	256	256	256
površina struka ostalih rebrenica [cm <sup>2</sup> ]	192	192	192	192	192	192	192	192	192
težište centralnog poprečnog nosača [cm]	90,92195	90,74928	91,10149	90,92195	90,74928	91,10149	90,92195	90,74928	91,10149
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	73,47805	73,65072	73,29851	73,47805	73,65072	73,29851	73,47805	73,65072	73,29851
težište ostalih poprečnih nosača [cm]	91,38462	91,24091	91,53281	91,38462	91,24091	91,53281	91,38462	91,24091	91,53281
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	73,01538	73,15909	72,86719	73,01538	73,15909	72,86719	73,01538	73,15909	72,86719
moment tromosti nosive širine cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	7924897	7305721	8681760	7924897	7305721	8681760	7924897	7305721	8681760
moment tromosti poprečnog presjeka cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	8491868	7871901	9249568	8491868	7871901	9249568	8491868	7871901	9249568
moment tromosti poprečnog presjeka poprečnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	7922390	7303065	8679415	7922390	7303065	8679415	7922390	7303065	8679415
krutost u poprečnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	8349262	7729418	9106831	8349262	7729418	9106831	8349262	7729418	9106831
jedinična krutost kraćih nosača [cm <sup>3</sup> ]	34907,43	35545,24	34269,57	34907,43	35545,24	34269,57	34907,43	35545,24	34269,57

PODACI ZA OČITANJE	10	11	12	13	14	15	16	17	18
torzioni koeficijent	0,952358	0,950332	0,95446	0,957068	0,955032	0,95918	0,948032	0,946015	0,950124
virtualni omjer stranica ploče	1,159521	1,164782	1,154187	1,172031	1,177349	1,16664	1,147654	1,15286	1,142375
KOEFICIJENTI									
progib u sredini	0,002089	0,002097	0,002079	0,002101	0,00211	0,002092	0,002076	0,002085	0,002067
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče	0,024781	0,024705	0,024858	0,024532	0,024456	0,024608	0,025023	0,024946	0,0251
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče	0,012983	0,01289	0,013077	0,01273	0,012637	0,012824	0,013225	0,013132	0,01332
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	0,040526	0,040639	0,040411	0,040654	0,040766	0,040539	0,0404	0,040513	0,040283
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	0,032521	0,032655	0,032383	0,032723	0,032856	0,032587	0,032323	0,032457	0,032184
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	0,081911	0,08208	0,081737	0,082157	0,082325	0,081985	0,081668	0,081839	0,081493
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	0,074763	0,074918	0,074604	0,075005	0,075158	0,074848	0,074523	0,07468	0,074362
smično naprezanje u smjeru dulje stranice	0,204113	0,203945	0,204285	0,204257	0,20409	0,20443	0,20399	0,203823	0,204161
smično naprezanje u smjeru kraće stranice	0,506345	0,506532	0,506152	0,506707	0,506886	0,506522	0,505975	0,506169	0,505774

PRORAČUN	10	11	12	13	14	15	16	17	18
progib u sredini ploče [cm]	0,760	0,750	0,771	0,765	0,754	0,776	0,756	0,745	0,766
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	3227,606	3188,722	3267,587	3247,491	3208,347	3287,741	3208,045	3169,42	3247,758
	4039,608	3990,941	4089,648	4102,687	4053,235	4153,537	3980,54	3932,615	4029,817
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	1690,91	1663,67	1718,99	1685,201	1657,843	1713,405	1695,544	1668,429	1723,495
	2116,309	2082,217	2151,454	2128,982	2094,421	2164,614	2103,831	2070,186	2138,512
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	5259,93	5192,047	5329,491	5276,493	5208,239	5346,436	5243,514	5175,994	5312,7
	6508,653	6397,42	6623,936	6529,147	6417,371	6644,996	6488,34	6377,639	6603,067
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	4220,878	4171,997	4270,802	4247,183	4197,77	4297,657	4195,148	4146,784	4244,539
	5222,926	5140,557	5308,108	5255,476	5172,314	5341,486	5191,088	5109,491	5275,466
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	10631,24	10486,65	10779,71	10663,23	10517,94	10812,43	10599,72	10455,82	10747,49
	13155,12	12921,2	13397,92	13194,71	12959,75	13438,59	13116,12	12883,21	13357,87
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	9703,501	9571,55	9838,986	9734,982	9602,29	9871,236	9672,425	9541,202	9807,151
	12007,14	11793,66	12228,71	12046,09	11831,53	12268,79	11968,69	11756,26	12189,14
smično naprezanje u smjeru dulje stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	7369,11	7329,817	7409,396	9709,865	9658,084	9762,957	5962,543	5930,754	5995,133
smično naprezanje u smjeru kraće stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	13881,92	12642,2	15396,13	13891,83	12651,03	15407,36	13871,76	12633,13	15384,62
VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]	29524480	29923840	29125120	28679680	29079040	28280320	30369280	30768640	29969920
MASA [kg]	231767,2	234902,1	228632,2	225135,5	228270,5	222000,5	238398,8	241533,8	235263,9

Tablice D.3 Proračun ortotropnih ploča za analizu senzitivnosti sa visinom dvodna 1800 mm

OSNOVNE GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE	19	20	21	22	23	24	25	26	27
dulja stranica [cm]	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
kraća stranica [cm]	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080
ukupna visina dvodna [cm]	184,4	184,4	184,4	184,4	184,4	184,4	184,4	184,4	184,4
debljina oplata dna [cm]	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
površina uzdužnjaka dna [cm <sup>2</sup> ]	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
broj uzdužnjaka u pojasu	2	2	2	2	2	2	2	2	2
debljina pokrova dvodna [cm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
površina uzdužnjaka pokrova dna [cm <sup>2</sup> ]	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7
broj uzdužnjaka u pojasu	2	2	2	2	2	2	2	2	2
UZDUŽNI NOSAČI									
broj uzdužnih nosača	7	7	7	5	5	5	9	9	9
širina pojasa uzdužnog nosača [cm]	260	260	260	346,6667	346,6667	346,6667	208	208	208
CENTRALNI UZDUŽNI NOSAČ									
debljina struka centralnog nosača [cm]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	239,72	239,72	239,72	239,72	239,72	239,72	239,72	239,72	239,72
OSTALI UZDUŽNI NOSAČI									
debljina struka ostalih nosača [cm]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
REBRENICE									
broj rebrenica	11	12	10	11	12	10	11	12	10
širina pojasa rebrenice [cm]	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667	240	218,1818	266,6667
CENTRALNA REBRENICA									
debljina struka centralne rebrenice [cm]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
smična površina [cm <sup>2</sup> ]	295,04	295,04	295,04	295,04	295,04	295,04	295,04	295,04	295,04
OSTALE REBRENICE									
debljina struka ostalih rebrenica [cm]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
TLAK [N/cm <sup>2</sup> ]	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252	14,252
modul elastičnosti [N/cm <sup>2</sup> ]	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07	2,10E+07



IZRAČUN OSTALIH GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA	19	20	21	22	23	24	25	26	27
težište donjeg pojasa lima [cm]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
težište struka [cm]	91,9	91,9	91,9	91,9	91,9	91,9	91,9	91,9	91,9
težište gornjeg pojasa lima [cm]	183,15	183,15	183,15	183,15	183,15	183,15	183,15	183,15	183,15
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	494	494	494	658,6667	658,6667	658,6667	395,2	395,2	395,2
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	650	650	650	866,6667	866,6667	866,6667	520	520	520
površina struka centralnog uzdužnog nosača [cm <sup>2</sup> ]	234	234	234	234	234	234	234	234	234
površina struka ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>2</sup> ]	198	198	198	198	198	198	198	198	198
težište centralnog uzdužnog nosača [cm]	102,3377	102,3377	102,3377	102,8005	102,8005	102,8005	101,9127	101,9127	101,9127
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	82,06226	82,06226	82,06226	81,59951	81,59951	81,59951	82,48733	82,48733	82,48733
težište ostalih uzdužnih nosača [cm]	102,6177	102,6177	102,6177	103,0282	103,0282	103,0282	102,2365	102,2365	102,2365
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	81,78227	81,78227	81,78227	81,3718	81,3718	81,3718	82,16353	82,16353	82,16353
moment tromosti samo nosive širine cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	10714773	10714773	10714773	13819280	13819280	13819280	8852546	8852546	8852546
moment tromosti poprečnog presjeka cent. uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	11372066	11372066	11372066	14478884	14478884	14478884	9507805	9507805	9507805
moment tromosti nosive širine ostalih uzdužnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	10713109	10713109	10713109	13817918	13817918	13817918	8850634	8850634	8850634
krutost u uzdužnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	11270454	11270454	11270454	14377038	14377038	14377038	9406389	9406389	9406389
jedinična krutost duljih nosača [cm <sup>3</sup> ]	43445,6	43445,6	43445,6	41570,15	41570,15	41570,15	45320,54	45320,54	45320,54
površina donjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667	456	414,5455	506,6667
površina gornjeg pojasa [cm <sup>2</sup> ]	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667	600	545,4545	666,6667
površina struka centralne rebrenice [cm <sup>2</sup> ]	288	288	288	288	288	288	288	288	288
površina struka ostalih rebrenica [cm <sup>2</sup> ]	216	216	216	216	216	216	216	216	216
težište centralnog poprečnog nosača [cm]	101,7786	101,5713	101,9949	101,7786	101,5713	101,9949	101,7786	101,5713	101,9949
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	82,62143	82,82867	82,40511	82,62143	82,82867	82,40511	82,62143	82,82867	82,40511
težište ostalih poprečnih nosača [cm]	102,3377	102,1635	102,518	102,3377	102,1635	102,518	102,3377	102,1635	102,518
udaljenost gornjeg pojasa od težišta [cm]	82,06226	82,23655	81,88196	82,06226	82,23655	81,88196	82,06226	82,23655	81,88196
moment tromosti nosive širine cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	10001286	9220095	10956200	10001286	9220095	10956200	10001286	9220095	10956200
moment tromosti poprečnog presjeka cent. poprečnog nosača [cm <sup>4</sup> ]	10806991	10024633	11763149	10806991	10024633	11763149	10806991	10024633	11763149
moment tromosti poprečnog presjeka poprečnih nosača [cm <sup>4</sup> ]	9997584	9216194	10952719	9997584	9216194	10952719	9997584	9216194	10952719
krutost u poprečnom smjeru [cm <sup>4</sup> ]	10604317	9822147	11560272	10604317	9822147	11560272	10604317	9822147	11560272
jedinična krutost kraćih nosača [cm <sup>3</sup> ]	44353,55	45186,91	43520,08	44353,55	45186,91	43520,08	44353,55	45186,91	43520,08

PODACI ZA OČITANJE	19	20	21	22	23	24	25	26	27
torzioni koeficijent	0,946658	0,944408	0,948995	0,951903	0,94964	0,954253	0,94185	0,939611	0,944175
virtualni omjer stranica ploče	1,159828	1,165238	1,15434	1,172694	1,178164	1,167145	1,147641	1,152995	1,142212
KOEFICIJENTI									
progib u sredini	0,002094	0,002103	0,002084	0,002107	0,002116	0,002097	0,002082	0,002091	0,002072
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče	0,024819	0,024741	0,024897	0,024558	0,024481	0,024636	0,025071	0,024993	0,02515
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče	0,012996	0,012901	0,013093	0,012735	0,01264	0,012832	0,013247	0,013152	0,013344
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	0,040614	0,040732	0,040493	0,040739	0,040856	0,040619	0,04049	0,040609	0,040368
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče	0,032596	0,032735	0,032453	0,032799	0,032937	0,032657	0,032397	0,032538	0,032253
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	0,082011	0,082188	0,08183	0,082258	0,082433	0,082078	0,081768	0,081946	0,081585
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima	0,074844	0,075005	0,074678	0,075088	0,075247	0,074924	0,074603	0,074766	0,074435
smično naprezanje u smjeru dulje stranice	0,203787	0,203605	0,203975	0,203956	0,203773	0,204145	0,203643	0,203461	0,203831
smično naprezanje u smjeru kraće stranice	0,506399	0,506594	0,506198	0,50677	0,506956	0,506577	0,506017	0,50622	0,505808

PRORAČUN	19	20	21	22	23	24	25	26	27
progib u sredini ploče [cm]	0,600	0,591	0,608	0,603	0,595	0,612	0,596	0,588	0,605
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	2860,808	2825,447	2897,187	2877,569	2841,984	2914,181	2844,16	2809,027	2880,305
	3567,639	3523,543	3613,007	3625,212	3580,381	3671,336	3513,946	3470,539	3558,602
normalno naprezanje <b>struka</b> smjeru dulje stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	1498,064	1473,306	1523,606	1492,219	1467,363	1517,866	1502,813	1478,161	1528,242
	1868,197	1837,322	1900,05	1879,924	1848,609	1912,234	1856,717	1826,261	1888,136
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	4664,947	4603,703	4727,683	4679,27	4617,696	4742,348	4650,711	4589,791	4713,112
	5746,591	5645,439	5851,572	5764,237	5662,598	5869,724	5729,055	5628,38	5833,538
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na sredini ploče [N/cm <sup>2</sup> ]	3743,946	3699,884	3788,922	3767,262	3722,716	3812,737	3721,129	3677,536	3765,62
	4612,041	4537,102	4689,645	4640,763	4565,101	4719,121	4583,934	4509,697	4660,803
normalno naprezanje <b>opločenja</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	9419,767	9289,205	9553,824	9448,076	9316,874	9582,794	9391,842	9261,904	9525,254
	11603,9	11391,19	11825,01	11638,77	11425,12	11860,87	11569,5	11357,71	11789,65
normalno naprezanje <b>struka</b> u smjeru kraće stranice na potpuno upetim mjestima [N/cm <sup>2</sup> ]	8596,56	8477,395	8718,902	8624,566	8504,724	8747,612	8568,888	8450,388	8690,536
	10589,81	10395,68	10791,61	10624,31	10429,19	10827,14	10555,73	10362,56	10756,5
smično naprezanje u smjeru dulje stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	6562,361	6526,037	6599,634	6643,489	6595,638	6692,594	6531,679	6528,283	6541,841
smično naprezanje u smjeru kraće stranice [N/cm <sup>2</sup> ]	12397,31	11292,08	13747,14	12406,39	11300,16	13757,44	12387,97	11283,75	13736,57
VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]	30469440	30918720	30020160	29519040	29968320	29069760	31419840	31869120	30970560
MASA [kg]	239185,1	242712	235658,3	231724,5	235251,3	228197,6	246645,7	250172,6	243118,9

## PRILOG E - Rezultati analize varijance odzivnih varijabli

Response 1 deflection

ANOVA for Response Surface Reduced Cubic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	11.83	10	1.18	1.060E+005	< 0.0001	significant
A-A	11.59	1	11.59	1.039E+006	< 0.0001	
B-B	0.17	1	0.17	15079.30	< 0.0001	
C-C	0.029	1	0.029	2584.79	< 0.0001	
AB	1.396E-003	1	1.396E-003	125.18	< 0.0001	
AC	4.137E-004	1	4.137E-004	37.09	< 0.0001	
BC	3.322E-005	1	3.322E-005	2.98	0.1036	
A <sup>2</sup>	0.029	1	0.029	2594.07	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	4.480E-004	1	4.480E-004	40.16	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	7.407E-006	1	7.407E-006	0.66	0.4271	
ABC	1.331E-005	1	1.331E-005	1.19	0.2908	
Residual	1.785E-004	16	1.115E-005			
Cor Total	11.83	26				

Slika E.1 Analiza varijance odzivne varijable pomaka (progib)

Response 2 masa

ANOVA for Response Surface Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1.344E+009	9	1.493E+008	1.625E+006	< 0.0001	significant
A-A	2.463E+008	1	2.463E+008	2.681E+006	< 0.0001	
B-B	1.997E+008	1	1.997E+008	2.173E+006	< 0.0001	
C-C	8.922E+008	1	8.922E+008	9.709E+006	< 0.0001	
AB	4.591E+005	1	4.591E+005	4996.44	< 0.0001	
AC	2.062E+006	1	2.062E+006	22434.41	< 0.0001	
BC	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
A <sup>2</sup>	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
B <sup>2</sup>	6.772E+005	1	6.772E+005	7369.35	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
Residual	1562.15	17	91.89			
Cor Total	1.344E+009	26				

Slika E.2 Analiza varijance odzivne varijable masa

Response		1		stress x		
ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	63.79	9	7.09	5.950E+006	< 0.0001	significant
A-A	60.51	1	60.51	5.079E+007	< 0.0001	
B-B	2.55	1	2.55	2.138E+006	< 0.0001	
C-C	0.59	1	0.59	4.991E+005	< 0.0001	
AB	3.800E-003	1	3.800E-003	3190.03	< 0.0001	
AC	2.735E-003	1	2.735E-003	2295.97	< 0.0001	
BC	7.280E-005	1	7.280E-005	61.11	< 0.0001	
A <sup>2</sup>	0.070	1	0.070	58719.40	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	6.401E-003	1	6.401E-003	5372.95	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	7.059E-006	1	7.059E-006	5.93	0.0262	
Residual	2.025E-005	17	1.191E-006			
Cor Total	63.79	26				

**Slika E.3** Analiza varijance odzivne varijable normalno naprezanje u smjeru osi x na sredini ploče

Response		1		stress y		
ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	167.64	9	18.63	5.859E+006	< 0.0001	significant
A-A	159.20	1	159.20	5.008E+007	< 0.0001	
B-B	7.67	1	7.67	2.414E+006	< 0.0001	
C-C	0.42	1	0.42	1.337E+005	< 0.0001	
AB	0.014	1	0.014	4266.77	< 0.0001	
AC	1.465E-003	1	1.465E-003	460.86	< 0.0001	
BC	1.486E-004	1	1.486E-004	46.75	< 0.0001	
A <sup>2</sup>	0.18	1	0.18	57663.79	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	0.020	1	0.020	6337.75	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	2.041E-006	1	2.041E-006	0.64	0.4340	
Residual	5.404E-005	17	3.179E-006			
Cor Total	167.64	26				

**Slika E.4** Analiza varijance odzivne varijable normalno naprezanje u smjeru osi y na sredini ploče

Response 1 stress y upeto						
ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	697.98	9	77.55	5.604E+006	< 0.0001	significant
A-A	660.02	1	660.02	4.769E+007	< 0.0001	
B-B	34.92	1	34.92	2.523E+006	< 0.0001	
C-C	1.61	1	1.61	1.163E+005	< 0.0001	
AB	0.061	1	0.061	4374.13	< 0.0001	
AC	3.970E-003	1	3.970E-003	286.85	< 0.0001	
BC	5.430E-004	1	5.430E-004	39.24	< 0.0001	
A <sup>2</sup>	0.76	1	0.76	55006.41	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	0.089	1	0.089	6460.20	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	2.736E-005	1	2.736E-005	1.98	0.1777	
Residual	2.353E-004	17	1.384E-005			
Cor Total	697.98	26				

**Slika E.5** Analiza varijance odzivne varijable normalno naprezanje u smjeru osi y na upetim mjestima

Response 1 smik dulja str.						
ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6077.04	9	675.23	40083.29	< 0.0001	significant
A-A	318.08	1	318.08	18881.94	< 0.0001	
B-B	2.86	1	2.86	169.97	< 0.0001	
C-C	5618.26	1	5618.26	3.335E+005	< 0.0001	
AB	2.912E-003	1	2.912E-003	0.17	0.6828	
AC	12.95	1	12.95	768.70	< 0.0001	
BC	0.11	1	0.11	6.73	0.0189	
A <sup>2</sup>	0.35	1	0.35	20.75	0.0003	
B <sup>2</sup>	7.424E-003	1	7.424E-003	0.44	0.5157	
C <sup>2</sup>	116.52	1	116.52	6916.98	< 0.0001	
Residual	0.29	17	0.017			
Cor Total	6077.33	26				

**Slika E.6** Analiza varijance odzivne varijable smično naprezanje u smjeru dulje stranice (osi x)

Response 1 smi kraca str.

ANOVA for Response Surface 2FI Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	8143.06	6	1357.18	1.62	0.1921	not significant
A-A	913.94	1	913.94	1.09	0.3080	
B-B	1221.42	1	1221.42	1.46	0.2407	
C-C	818.09	1	818.09	0.98	0.3342	
AB	468.08	1	468.08	0.56	0.4628	
AC	2220.20	1	2220.20	2.66	0.1187	
BC	2668.77	1	2668.77	3.19	0.0890	
Residual	16705.92	20	835.30			
Cor Total	24848.97	26				

Slika E.7 Analiza varijance odzivne varijable smično naprezanje u smjeru kraće stranice (osi y)