

Projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta

Kos, Gordan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:786214>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Gordan Kos

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Gordan Kos

Zagreb, 2021.

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

Ponajprije se zahvaljujem mentoru, prof. Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći, uloženom vremenu i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se direktoru elektroinstalacija Zagrebačkog elektrotehničkog poduzeća, Renatu Jurišiću na pruženoj prilici za dugogodišnje obavljanje studentskog posla izvan vlastite struke, bez kojeg ne bi financijski izdržao period preddiplomskog studija.

Također se zahvaljujem poslovođi, Zvonimiru Terihaju i svim kolegama na svom prenesenom znanju, strpljenju, trudu i razumijevanju za akademske obaveze.

Gordan Kos



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gordan Kos** JMBAG: **0035201460**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of hatch cover for bulk carrier**

Opis zadatka:

Projektirati konstrukciju grotlenog poklopca na poziciji oko glavnog rebra broda za prijevoz rasutog tereta (nosivosti oko 300 000 DWT) prema zajedničkim Pravilima *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers, July 2012.*

Ulazni podaci:

- Duljina poklopca: 18 500 mm
- Širina poklopca: 18 200 mm
- Zahtjev: maksimalna masa poklopca mora biti manja od 200 kg/m²

Zadatak obuhvaća:

- Upoznavanje s Pravilima *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers, July 2012.*
- Proračun opterećenja prema IACS Pravilima.
- Definiranje broja i pozicije jakih nosača, orijentacije i razmaka sekundarnih ukrepa.
- Provođenje proračuna lokalne i sekundarne čvrstoće koristeći analitičke formule prema IACS Pravilima.
- Studiju senzitivnosti utjecaja razmaka uzdužnjaka/poprečnjaka na masu konstrukcije.
- Provođenje proračuna lokalne i sekundarne čvrstoće koristeći metodu konačnih elemenata (MKE).
- Kontrolu izvijanja svih strukturnih elemenata.
- Prijedlog strukturnih dimenzija uzdužnih elemenata koji zadovoljavaju sve uvjete strukturne podobnosti uz minimalnu masu konstrukcije.

Prilikom provođenja MKE proračuna koristiti neke od dostupnih alata na FSB-u (FEMAP, MAESTRO, itd.).

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

6. svibnja 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Jerolim Andrić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK.....	7
SUMMARY	8
1. UVOD	9
1.1 Brodovi za rasuti teret.....	9
1.2 Grotleni poklopci	9
2. INDETIFIKACIJA PROJEKTOG PROBLEMA	11
2.1 Projektna ograničenja	11
2.1.1 Projektni zahtjev	12
2.1.2 Topološka ograničenja	12
2.1.3 Tehnološka ograničenja.....	13
2.1.4 Strukturna ograničenja	13
3. KONCEPTUALNA FAZA.....	14
3.1 Optimizacija dimenzija T nosača	14
3.2 Određivanje optimalne topologije tabličnim proračunom.....	16
3.2.1 Geometrija topologija.....	16
3.2.2 Dimenzioniranje jakih nosača	16
3.2.3 Odabir ukrepa	17
3.2.4 Odabir debljine oplata	19
3.2.5 Izračun mase.....	19
3.3 Određivanje optimalne topologije pomoću Excel Solvera	21
3.3.1 Veza optimalne površine poprečnog presjeka i momenta otpora	21
3.3.2 Pretpostavke i ograničenja	22
3.3.3 Tok optimizacije.....	24
3.4 Odabrane topologije iz konceptualne faze.....	25
4. PRELIMINARNA FAZA	27

4.1	Izrada modela sa grubom mrežom konačnih elemenata.....	27
4.1.1	Opis postupka modeliranja.....	27
4.1.2	Model opterećenja.....	28
4.1.3	Rubni uvjeti.....	28
4.2	Analiza modela sa grubom mrežom konačnih elemenata.....	29
4.3	Preliminarno dimenzioniranje jakih nosača.....	31
4.4	Preliminarna izmjena debljine oplata.....	32
4.4.1	Provjera izvijanja oplata paralelno sa ukrepama.....	32
4.4.2	Provjera izvijanja oplata okomito na ukrepe.....	33
4.5	Usporedba varijanti.....	33
5.	ZAVRŠNA FAZA.....	36
5.1	Izrada modela sa finom mrežom konačnih elemenata.....	36
5.1.1	Opis postupka modeliranja.....	36
5.1.2	Model opterećenja.....	37
5.1.3	Rubni uvjeti.....	38
5.1.4	Provjera modela.....	38
5.2	Analiza modela sa finom mrežom konačnih elemenata.....	39
5.3	Dimenzioniranje jakih nosača.....	42
5.4	Izmjena debljine oplata.....	45
5.5	Odabir ukrepa.....	48
5.6	Usporedba i odabir konačne topologije.....	50
6.	ZAKLJUČAK.....	52
	LITERATURA.....	53
	PRILOZI.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Jedinstveni podizni poklopac [4]	10
Slika 3.1 Dimenzije i koordinatni sustav T profila	14
Slika 3.2 Dimenzije ekvivalentnog L profila [1].....	18
Slika 3.3 Dijagram ovisnosti optimalne površine T profila o momentu otpora.....	22
Slika 3.4 Dijagram toka optimizatora topologije	24
Slika 3.5 Dijagram mase po kvadratnom metru poklopca za sve analizirane varijante.....	26
Slika 4.1 Polovični model grube mreže, topologija 4x10x14L.....	27
Slika 4.2 Model opterećenja grube mreže, topologija 4x10x14L	28
Slika 4.3 Rubni uvjeti grube mreže, topologija 4x10x14L	28
Slika 4.4 Progib modela grube mreže, topologija 4x10x14L.....	29
Slika 4.5 Naprezanja u oplati, X smjer, topologija 4x10x14L.....	29
Slika 4.6 Naprezanja u oplati, Y smjer, topologija 4x10x14L.....	30
Slika 4.7 Naprezanja u prirubnici uzdužnih nosača, topologija 4x10x14L	30
Slika 4.8 Naprezanja u prirubnici poprečnih nosača, topologija 4x10x14L	31
Slika 4.9 Dijagram naprezanja u ovisnosti o debljini oplata, 4x10x14L	34
Slika 4.10 Dijagram mase po kvadratnom metru poklopca za odabrane topologije.....	35
Slika 5.1 Polovični model fine mreže sa grednim elementima prirubnica, topologija 4x10x14L	36
Slika 5.2 Polovični model fine mreže sa pločastim elementima, topologija 4x10x14L	37
Slika 5.3 Model opterećenja fine mreže, topologija 4x10x14L	37
Slika 5.4 Rubni uvjeti grube mreže, topologija 4x10x14L	38
Slika 5.5 Ukupna vertikalna sila na poklopac, topologija 4x10x14L	38
Slika 5.6 Progib modela fine mreže, topologija 4x10x14L.....	39
Slika 5.7 Naprezanja u oplati, X smjer, topologija 4x10x14L.....	39
Slika 5.8 Naprezanja u oplati, Y smjer, topologija 4x10x14L.....	40
Slika 5.9 Naprezanja u prirubnicama, topologija 4x10x14L	40
Slika 5.10. Smična naprezanja u strukovima nosača, topologija 4x10x14L.....	41
Slika 5.11 Zone jakih nosača, topologija 4x10x14L.....	42
Slika 5.12 Konvergencija rješenja kroz iterativno redimenzioniranje topologije 4x10x14L	42
Slika 5.13 Neukrepljena polja oplata (evaluation patches), topologija 4x10x14L	45
Slika 5.14 Oznake polja oplata, topologija 4x10x14L	45
Slika 5.15 Zone oplata, topologija 4x10x14L.....	46
Slika 5.16. Odabrane debljine oplata, topologija 4x10x14L.....	47
Slika 5.17 Pozicije ukrepa protiv izvijanja, topologija 4x10x14L.....	47
Slika 5.18 Masa poklopca, topologija 4x10x14L.....	51
Slika 5.19 Masa poklopca, topologija 5x5x9L.....	51

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Vrijednosti optimalne površine poprečnog presjeka T profila.....	21
Tablica 3.2 Pregled analiziranih topoloških varijanti u konceptualnoj fazi.....	25
Tablica 3.3 Odabrane topologije i profili nosača za daljnju analizu.....	26
Tablica 4.1 Pregled analiziranih topoloških varijanti u preliminarnoj fazi.....	34
Tablica 4.2 Odabrani profili nosača u preliminarnoj fazi	35
Tablica 5.1 Odabrani profili jakih nosača, topologija 4x10x14L	43
Tablica 5.2 Provjera strukova nosača na izvijanje po zonama, topologija 4x10x14L.....	44
Tablica 5.3 Odabrane debljine oplata po zonama, topologija 4x10x14L.....	47
Tablica 5.4 Broj poluvalova	48
Tablica 5.5 Odabir ukrepe za topologiju 4x10x14L	49
Tablica 5.6 Usporedba varijanti 4x10x14L i 5x5x9L	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{HC}	m	Duljina grotlenog poklopca
B_{HC}	m	Širina grotlenog poklopca
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
R_{eH}	N/mm ²	Granica razvlačenja
σ_a	N/mm ²	Najveće dopušteno naprezanje
τ_a	N/mm ²	Najveće dopušteno smično naprezanje
$\sigma_{x,max}$	N/mm ²	Dopušteno tlačno naprezanje u oplati paralelno s ukrepama
$\sigma_{y,max}$	N/mm ²	Dopušteno tlačno naprezanje u oplati okomito na ukrepe
τ_{max}	N/mm ²	Dopušteno smično naprezanje u struku nosača
$\sigma_{x,avg}$	N/mm ²	Srednje tlačno naprezanje u oplati paralelno s ukrepama
$\sigma_{y,avg}$	N/mm ²	Srednje tlačno naprezanje u oplati okomito na ukrepe
σ_F	N/mm ²	Najveće naprezanje u prirubnici ukrepe
N_1	-	Broj jakih uzdužnih nosača
N_2	-	Broj jakih poprečnih nosača
N_3	-	Broj ukrepa između jakih nosača
N_4	-	Broj ukrepa protiv izvijanja
s_{HP}	m	Razmak ukrepa, ovisno o orijentaciji
l_L	m	Razmak jakih uzdužnih nosača
l_T	m	Razmak jakih poprečnih nosača
s_L	m	Razmak uzdužno orijentiranih ukrepa
s_T	m	Razmak poprečno orijentiranih ukrepa
s	m	Duljina kraće stranice elementarnog panela
s_s	m	Duljina kraće stranice panela oplata
l_s	m	Duljina duže stranice panela oplata
l_{HP}	m	Nepoduprti raspon ukrepe
b_f	mm	Širina prirubnice nosača
t_f	mm	Debljina prirubice nosača
t_w	mm	Debljina struka nosača
h_w	mm	Visina struka nosača
b_p	mm	Širina sunosivog opločenja nosača
t_p	mm	Debljina sunosivog opločenja nosača

h_w'	mm	Visina HP profila
t_w'	mm	Debljina struka HP profila
Z_{NA}	mm	Položaj neutralne linije nosača od prirubnice
I_y	cm ⁴	Moment inercije T profila oko y osi
W	cm ³	Moment otpora profila sa sunosivom širinom
A_{uk}	cm ²	Površina poprečnog presjeka nosača sa sunosivom širinom
A_T	cm ²	Površina poprečnog presjeka T profila
t_{net}	mm	Net debljina oplata
t_c	mm	Korozijski dodatak
t	mm	Debljina oplata
ρ	kg/m ³	Gustoća čelika
p_w	kN/m ²	Projektni hidrodinamički tlak
p_s	kN/m ²	Projektni hidrostatski tlak
$m_{T,L}$	kg	Masa svih uzdužnih T nosača
$m_{T,T}$	kg	Masa svih poprečnih T nosača
$m_{L,L}$	kg	Masa svih rubnih uzdužnih L nosača
$m_{L,T}$	kg	Masa svih rubnih poprečnih L nosača
m_p	kg	Masa oplata
m_{HP}	kg	Masa svih ukrepa (HP profila)
m_{ABS}	kg	Masa svih ukrepa protiv izvijanja
m_{HC}	kg	Ukupna masa poklopca

SAŽETAK

Cilj ovog preddiplomskog rada je projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca na poziciji oko glavnog rebra broda za prijevoz rasutog tereta (nosivosti oko 300 000 DWT) prema zajedničkim pravilima *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers*, July 2012.

Za konstrukciju poklopca je bilo potrebno definirati broj i poziciju jakih nosača te orijentaciju i razmak sekundarnih ukrepa koji će rezultirati optimalnom topologijom s obzirom na ukupnu masu poklopca.

U početnoj konceptualnoj fazi proveden je tablični proračun prema preskriptivnim Pravilima, različitih, proizvoljno odabranih varijanti topologija grotlenog poklopca koji je služio za odabir topologija za daljnju usporedbu. Osim tablične usporedbe napravljen je i algoritam za traženje optimalne topologije poklopca metodom izolirane grede prema pravilima *IACS-CSR* koristeći Excel Solver.

Preliminarna faza sadrži izradu modela odabranih varijanti topologija poklopca sa grubom mrežom konačnih elemenata u računalnom programu MAESTRO. Na temelju rezultata analize provedeno je inicijalno dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata, te naprezanja svedena na jednaku razinu radi usporedbe varijanti.

U završnoj fazi su odabrane dvije najpovoljnije varijante topologija iz preliminarne faze te su za njih izrađeni modeli sa finom mrežom konačnih elemenata. Oba modela su modelirana u skladu sa zahtjevima *Lloyd's Register* (LR). Svi konstrukcijski elementi su redimenzionirani s obzirom na kriterije izvijanja i popuštanja prema pravilima *IACS-CSR*. Nakon usporedbe masa poklopaca je odabrana povoljnija topologija. Za nju je provedeno finalno dimenzioniranje, usklađivanje dimenzija jakih nosača te izrada tehničke dokumentacije.

Ključne riječi:

grotleni poklopac, brod za prijevoz rasutog tereta, optimizacija topologije, projektiranje konstrukcije, metoda konačnih elemenata, MKE, dimenzioniranje

SUMMARY

The objective of this thesis is structural design of a hatch cover, located around the midship area, for a bulk carrier (deadweight around 300 000 DWT) based on *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers*, July 2012.

It was required to determine the number and position of primary supporting members, as well as the orientation and number of secondary stiffeners which will result in an optimal topology according to the total mass of the hatch cover.

In the initial concept phase, a table calculation based on prescribed Rule calculation, of different, arbitrarily chosen topological variants of the hatch cover was conducted which served as the basis for further analysis. Besides the table comparison, an algorithm based on the isolated beam method according to IACS-CSR was also created for finding the optimal topology variant using the Excel Solver.

Preliminary phase includes making coarse mesh finite element models of chosen topology variants using the computer program MAESTRO. Initial scantling determination of structural elements was based on analysis results and all stresses were reduced to the same levels for comparison.

Two favorable topology variants from the preliminary phase were modeled with a fine mesh of finite elements. Both models comply with *Lloyd's Register* assessment procedures. All structural elements were resized with respect to buckling and yielding criteria according to IACS-CSR. After comparing the total mass of the hatch covers, the most favorable topology variant was chosen. Final sizing of structural elements was conducted for that variant, as well as harmonizing the dimensions of primary supporting members and creating technical documentation.

Key words:

hatch cover, bulk carrier, topology optimization, structural design, finite element method, FEM, scantling determination

1. UVOD

1.1 Brodovi za rasuti teret

Pravila prema kojima se projektiraju današnji brodovi za rasuti teret su IACS (*International Association of Classification Societies*) zajednička konstrukcijska pravila, *Common Structural Rules for Bulk Carriers* (CSR). Ova pravila [1] su primjenjiva za konstrukciju brodova za rasuti teret sa jednostrukom ili dvostrukom oplatom, neograničene plovidbe, duljine 90m ili veće. Brodovi za rasuti teret se općenito konstruiraju sa jednom glavnom palubom, dvodnom, potpalubnim i uzvojnim bočnim tankovima, sa jednostrukom ili dvostrukom oplatom teretnih prostora. Uključuju vrste brodova kao što su brod za rudaču, brod za cement, ugljen, žitarice i ostale suhe terete.

Procijenjeno je da se 80% svjetske trgovine po volumenu odvija morem [2], a oko 30% toga čine brodovi za rasuti teret. Prema podacima iz 2019. brodovi za rasuti teret čine 42,6% sveukupne svjetske flote od 1 976 491 brodova što ih čini neizostavnim u današnjoj globalnoj trgovini.

1.2 Grotleni poklopci

Primarna uloga grotlenih poklopaca na izloženim palubama je sprječavanje prodora vode u teretni prostor, što može oštetiti teret i okolnu strukturu, a u najgorem slučaju dovesti do gubitka broda. Poklopci grotala su statički i dinamički opterećeni okomito na svoju ravninu tlakovima naplavljene vode ili teretima na njima, koncentriranim silama tereta i opreme [3], te uslijed deformacija trupa koje preko pražnica djeluju na poklopce.

Prema načinu pokretanja, poklopci mogu biti:

- Jedinstveni podizni
- Člankasti podizni
- Sklapajući
- Postrano kližući
- Teleskopski
- Namatajući

Važnost projektiranja grotlenog poklopca sa minimalnom masom je višestruka. Smanjenjem mase poklopca omogućuje se ukrcaj više tereta, što povećava ekonomsku isplativost. Velika masa poklopca podiže vertikalni položaj težišta broda, što ima negativan utjecaj na stabilitet. Za podizne poklopce manje mase je potrebna dizalica manje nosivosti, a ostali tipovi imaju manje zahtjeve s obzirom na mehanizme pokretanja.

U okviru ovog završnog rada se projektira struktura jedinstvenog podiznog poklopca (eng. *lift-away hatch cover*). Ovakav tip poklopca prekriva cijelo grotlo, a brtvljenje je potrebno samo na rubovima. Struktura poklopca se sastoji od jakih uzdužnih i poprečnih T nosača, rubnih L nosača i sekundarnih ukrepa u obliku HP profila.

Slika 1.1 pokazuje primjer MacGregor jedinstvenog podiznog poklopca broda za opći teret.



Slika 1.1 Jedinstveni podizni poklopac [4]

2. INDETIFIKACIJA PROJEKTOG PROBLEMA

Matematička formulacija projektnog problema naziva se projektni model. Za njegovu formulaciju potrebno je definirati osnovne komponente projektnog problema [5]. Standardni projektni problem pojednostavljeno se definira u sljedećim koracima:

- 1) Definicija projektnih varijabli
- 2) Definicija cilja i ograničenja kao funkcije projektnih varijabli
- 3) Maksimizacija ili minimizacija cilja projektnog postupka tako da se rješenje nalazi unutar skupa ograničenja

Matematički model projektnog problema se općenito definira kao:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) \geq 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

gdje su:

x – Projektne varijable

$f(x)$ - Funkcija cilja

$g(x)$ – Projektna ograničenja, kriteriji podobnosti

$g(x) = \{g(x)\}$ - Skup strukturnih ograničenja

$x^m \leq x \leq x^M$ - Skup min-max ograničenja

2.1 Projektna ograničenja

Projektna ograničenja predstavljaju granice unutar kojeg se nalaze podobne topologije i kombinacije strukturnih varijabli koje zadovoljavaju sva ograničenja. Neka od ograničenja su opće poznata iz brodograđevne prakse, kao što su minimalne i maksimalne dimenzije nosača i debljina limova. Za ostala ograničenja je bilo nužno upoznavanje sa prikladnim pravilima i određivanje kritičnih strukturnih zahtjeva koji će imati najveći utjecaj na odabir projektnih varijabli. Projektna ograničenja su podijeljena na sljedeće podskupine.

2.1.1 Projektni zahtjev

Projektni zahtjevi od npr. strane brodo vlasnika predstavljaju dodatno projektno ograničenje kojega se nužno pridržavati. Ono može biti vezano za odabir materijala, ukupnu masu, izvedbu konstrukcije, dimenzije, odabir topologije, i sl.

Unutar ovog rada definirana su tri projektna zahtjeva:

- 1) Duljina poklopca: $L_{HC} = 18500 \text{ mm}$
- 2) Širina poklopca: $B_{HC} = 18200 \text{ mm}$
- 3) Maksimalna masa po kvadratnom metru: 200 kg/m^2

Prema zahtjevu maksimalne mase po kvadratnom metru, definirana je maksimalna masa poklopca:

$$m_{HC,max} = 200 \cdot L_{HC} \cdot B_{HC} = 67340 \text{ kg} \quad (2.2)$$

2.1.2 Topološka ograničenja

Geometrijska ograničenja određuju minimalne i maksimalne dozvoljene vrijednosti topoloških varijabli kao što su broj primarnih nosača i sekundarnih ukrepa. Maksimalne vrijednosti su često posljedica tehnoloških ograničenja (npr. maksimalna debljina obrade na strojevima, zavarivanje, itd.) [5]. Minimalne vrijednosti proizlaze iz pravila klasifikacijskog društva. Relevantni propisi prema IACS-CSR navedeni su u *Chapter 9, Section 5, 2. Arrangements*.

Razmak jakih nosača paralelnih sa smjerom ukrepa ne smije biti veći od 1/3 nepoduprtog raspona jakih nosača [1].

Za slučaj uzdužno orijentiranih ukrepa, 1/3 nepoduprtog raspona jakih uzdužnih nosača iznosi:

$$\frac{1}{3} \cdot L_{HC} = 6166,67 \text{ mm} \quad (2.3)$$

Time je broj jakih uzdužnih nosača ograničen na minimalno 4, sukladno izrazu za razmak između uzdužnih nosača, jed. (3.9).

Za slučaj poprečno orijentiranih ukrepa, 1/3 nepoduprtog raspona jakih poprečnih nosača iznosi:

$$\frac{1}{3} \cdot B_{HC} = 6066,67 \text{ mm} \quad (2.4)$$

Time je broj jakih poprečnih nosača ograničen na minimalno 5, sukladno izrazu za razmak između poprečnih nosača, jed. (3.10).

2.1.3 Tehnološka ograničenja

Tehnološka ograničenja određuju odnose između projektnih varijabli i ograničavaju njihov odabir, npr. odnos visine i debljine struka T nosača, odabir debljine limova, itd. Ona su proizašla iz prakse brodogradilišta i koriste se za postizanje balansiranog, tehnički i tehnološki izvedivog projekta. Mogu biti vezana i uz tehnološka ograničenja pojedinog brodogradilišta. Neka od tehnoloških ograničenja standardizacije su odabir cjelobrojnih vrijednosti debljina limova i što manje različitih vrsta materijala. Zbog jednostavnosti tehnološke izvedbe, postoji zahtjev za jednakom visinom strukova uzdužnih i poprečnih nosača.

2.1.4 Strukturna ograničenja

Ograničenja dimenzija strukturnih elemenata uglavnom proizlaze iz pravila klasifikacijskih društava kroz kriterije izvijanja i popuštanja. *Chapter 9, Section 5* pravila IACS-CSR [1] sadrži zahtjeve koji se odnose na grotlene poklopce. Sukladno ovim pravilima, provjeravaju se sljedeći elementi strukture:

- oplata između ukrepa
- ukrepe između jakih nosača
- strukovi jakih nosača
- prirubnice jakih nosača

Opterećenje za koje se projektira konstrukcija grotlenog poklopca navedeno je u *Chapter 4, Section 5*, prema kojemu projektni tlak na poklopac iznosi:

$$p = p_s + p_w = 34,3 \text{ kN/m}^2 \quad (2.5)$$

gdje je:

Hidrostatski tlak:

$$p_s = 0 \quad (2.6)$$

Hidrodinamički tlak:

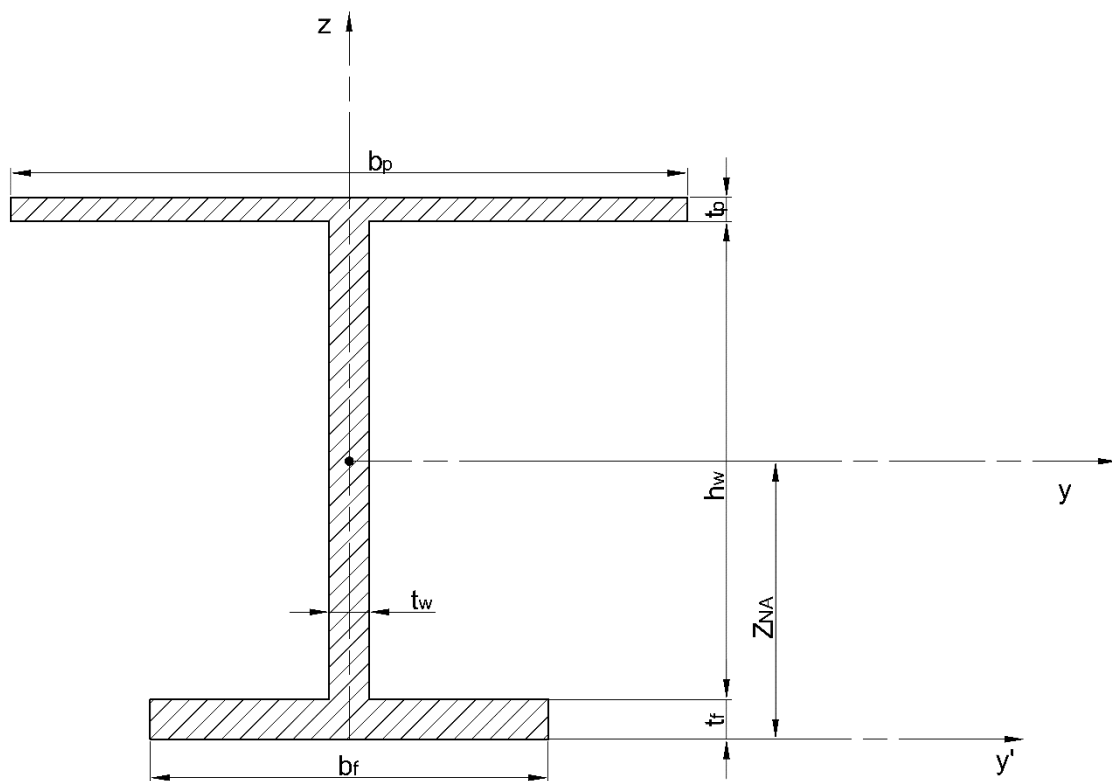
$$p_w = 34,3 \text{ kN/m}^2 \quad (2.7)$$

3. KONCEPTUALNA FAZA

Konceptualna faza kao početna faza mora imati veliku fleksibilnost izbora rješenja [5] i kratko vrijeme provedbe. Zbog toga odabrana metoda pristupa problemu ima bitan uvjet vremena potrebnog za pripremu i provođenje proračuna, osim točnosti same metode.

3.1 Optimizacija dimenzija T nosača

Optimalne net dimenzije T profila određene su preko Excel Solvera, u nastavku Solver, korištenjem *GRG Nonlinear* optimizacijskog algoritma. Ulazne varijable Solvera su redom b_f , t_f , t_w i h_w . Glavno ograničenje Solvera prema kojemu se dimenzionira profil je traženi moment otpora nosača W . Budući da su širina sunosivog opločenja i debljina oplata varijable koje se odabiru na temelju topologije i kriterija izvijanja oplata, cilj Solvera je minimizacija površine poprečnog presjeka T nosača A_T . Ograničenja dimenzija T profila su navedena u jed. (3.4) – (3.7). Sukladno tehnološkim ograničenjima, za debljinu prirubnice i struk nosača se uzimaju cjelobrojne vrijednosti. U kasnijim fazama dimenzioniranja nosača, postavljena su dodatna ograničenja Solvera kao što su ograničenje visine struka, minimalna debljina struka nosača i ograničenje širine prirubnice.



Slika 3.1 Dimenzije i koordinatni sustav T profila

U nastavku su navedeni korišteni izrazi za proračun geometrijskih karakteristika T nosača.

Udaljenost neutralne linije nosača od prirubnice:

$$Z_{NA} = \frac{b_p \cdot t_p \left(t_f + h_w + \frac{t_p}{2} \right) + h_w \cdot t_w \left(t_f + \frac{h_w}{2} \right) + b_f \cdot \frac{t_f^2}{2}}{A_{uk}} \quad (3.1)$$

Moment inercije nosača oko y osi:

$$I_y = b_f \cdot t_f \cdot \left[\frac{t_f^2}{12} + \left(\frac{t_f}{2} + h_w + t_p - Z_{NA} \right)^2 \right] + h_w \cdot t_w \cdot \left[\frac{h_w^2}{12} + \left(\frac{h_w}{2} + t_p - Z_{NA} \right)^2 \right] + b_p \cdot t_p \cdot \left[\frac{t_p^2}{12} + \left(Z_{NA} - \frac{t_p}{2} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Moment otpora:

$$W = \frac{I_y}{t_f + h_w + t_p - Z_{NA}} \quad (3.3)$$

Ograničenja dimenzija T profila:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 100 \quad (3.4)$$

$$4 \leq \frac{b_f}{t_f} \leq 20 \quad (3.5)$$

$$0,2 \leq \frac{b_f}{h_w} \leq 0,4 \quad (3.6)$$

$$1 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 3 \quad (3.7)$$

Površina poprečnog presjeka T profila bez sunosive širine:

$$A_T = b_f \cdot t_f + h_w \cdot t_w \quad (3.8)$$

3.2 Određivanje optimalne topologije tabličnim proračunom

Detaljniji proračun odabranih topologija proveden je tablično u Excelu. Odabir topologija koje su ovdje analizirane je dijelom proizvoljan, a dijelom rezultat optimizatora topologije, *poglavlje 3.3*.

3.2.1 Geometrija topologija

Zbog jednostavnosti definicije geometrijskih karakteristika topologija, odabrani su isključivo jednoliki razmaci između jakih nosača. Sukladno tome, moguće je definirati sljedeće dimenzije:

Razmak između uzdužnih nosača:

$$l_L = \frac{B_{HC}}{N_1 - 1} \quad (3.9)$$

Razmak između poprečnih nosača:

$$l_T = \frac{L_{HC}}{N_2 - 1} \quad (3.10)$$

Razmak uzdužno orijentiranih ukrepa:

$$s_L = \frac{B_{HC}}{(N_1 - 1) \cdot (N_3 + 1)} \quad (3.11)$$

Razmak poprečno orijentiranih ukrepa:

$$s_T = \frac{L_{HC}}{(N_2 - 1) \cdot (N_3 + 1)} \quad (3.12)$$

Duljina kraće stranice elementarnog panela:

$$s = \text{MIN}(s_L, s_T) \quad (3.13)$$

3.2.2 Dimenzioniranje jakih nosača

Jaki nosači su dimenzionirani primjenom optimizatora T profila (*poglavlje 3.1*) za traženi moment otpora prema pravilima IACS-CSR, *Chapter 9, Section 5, 5.4.3 Normal and shear stress for isolated beam*. Prilikom optimizacije nosača je postavljeno dodatno ograničenje jednake visine strukova uzdužnih i poprečnih nosača. Izrazi za proračun zahtijevanog momenta otpora i minimalne površine poprečnog presjeka nosača:

$$w = \frac{s \cdot (F_S \cdot p_S + F_W \cdot p_W) \cdot l_m^2}{m \cdot \sigma} 10^3 \quad (3.14)$$

$$A_{sh} = \frac{5 \cdot s \cdot (F_S \cdot p_S + F_W \cdot p_W) \cdot l_m}{\tau} \quad (3.15)$$

gdje je:

$$m = 8 \text{ – Rubni koeficijent za slučaj zglobnog oslonca jakih nosača}$$

Maksimalne vrijednosti dozvoljenih naprezanja su odabrane sukladno *Chapter 9, Section 5, Table 2: Allowable stresses*, za kvalitetu čelika AH36:

$$\sigma = \sigma_a = 0,8 \cdot R_{eH} = 284,0 \text{ N/mm}^2 \quad (3.16)$$

$$\tau = \tau_a = 0,46 \cdot R_{eH} = 163,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3.17)$$

Jaki nosači su podijeljeni na 4 vrste: uzdužni T, poprečni T, rubni uzdužni L i rubni poprečni L. Za svaku od tih vrsta su proračunate dimenzije nosača, za svaku od razmatranih topologija.

Sve dimenzije konstrukcijskih elemenata su definirane uz korozijski dodatak, koji prema IACS-CSR *Chapter 9, Section 5, Table 1: Corrosion addition* iznosi:

$$t_c = 2 \text{ mm} \quad (3.18)$$

Net moment inercije jakih nosača mora biti takav da maksimalni progib ne prelazi iznos definiran u *Chapter 9, Section 5, 5.4.5 Deflection limit*:

$$\mu \cdot L_{HC} = 103,6 \text{ mm} \quad (3.19)$$

gdje je $\mu = 0,0056$ za grotlene poklopce nepropusne za vremenske uvjete

3.2.3 Odabir ukrepa

Izraz za minimalni net moment otpora ukrepa prema *Chapter 9, Section 5, 5.3.3 Net section modulus and shear sectional area*:

$$w = \frac{s \cdot (F_S \cdot p_S + F_W \cdot p_W) l_{HP}^2}{m \cdot \sigma_a} \cdot 10^3 \quad (3.20)$$

$$A_{sh} = \frac{5 \cdot s \cdot (F_S \cdot p_S + F_W \cdot p_W) \cdot l_{HP}}{\tau_a} \quad (3.21)$$

gdje je:

$$m = 12 \text{ – Rubni koeficijent za slučaj uklještenja ukrepa}$$

Budući da se HP profili odabiru iz kataloga u kojemu su navedene karakteristike ukupnih dimenzije profila, od ovih ukrepa je potrebno oduzeti korozijski dodatak kako bi se odredile net karakteristike profila.

U konceptualnoj fazi, radi jednostavnosti proračuna i osiguravanja konzervativnog odabira profila, korišteni su izrazi DNV (*Det Norske Veritas*) za preračunavanje net momenta otpora u ukupni moment otpora HP profila. Ukrepe su odabrane na temelju ovog momenta otpora, bez utjecaja sunosive širine.

$$w_G = \frac{w_{net} + \beta \cdot t_c}{1 - \alpha \cdot t_c} \quad (3.22)$$

za $w_G \leq 200 \text{ cm}^3$: $\alpha = 0,07$; $\beta = 0,4$

za $w_G > 200 \text{ cm}^3$: $\alpha = 0,035$; $\beta = 7,4$

gdje je:

w_G – Bruto moment otpora profila

w_{net} – Net moment otpora profila bez sunosive širine

U završnoj fazi je od ekvivalentnih dimenzija L profila oduzet korozijski dodatak t_c kako bi se proračunao net moment otpora HP ukrepe sukladno pravilima IACS-CSR. Prilikom izračuna net momenta otpora ekvivalentnih L profila, u obzir je uzeto i sunosivo oploćenje za koje se uzima net debljina. Sukladno *Chapter 3, Section 6, 4.1.1 Stiffener profile with a bulb section*, određene su dimenzije ekvivalentnih L profila prema izrazima:

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9,2} + 2 \quad (3.23)$$

$$b_f = \alpha \left(t'_w + \frac{h'_w}{6,7} - 2 \right) \quad (3.24)$$

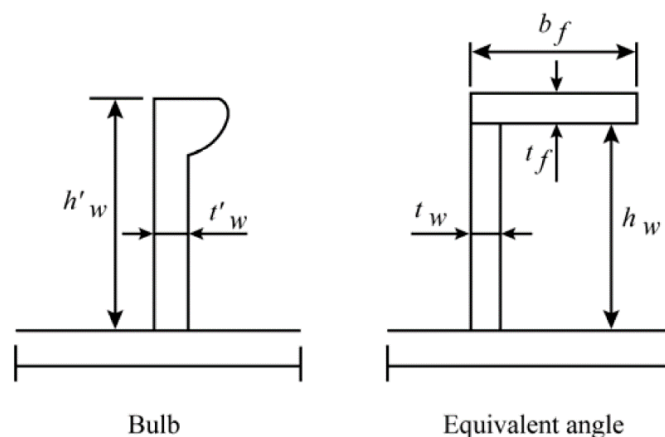
$$t_f = \frac{h'_w}{9,2} - 2 \quad (3.25)$$

gdje su:

h'_w, t'_w - visina i debljina struka HP profila

$$\alpha = 1,1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000}, \text{ za } h'_w \leq 120 \text{ mm} \quad (3.26)$$

$$\alpha = 1, \text{ za } h'_w > 120 \text{ mm} \quad (3.27)$$



Slika 3.2 Dimenzije ekvivalentnog L profila [1]

3.2.4 Odabir debljine oplata

Minimalna net debljina oplata je definirana prema izrazima u *Chapter 9, Section 5, 5.2 Plating*:

$$t_1 = 15,8 \cdot F_p \cdot s_s \cdot \sqrt{\frac{F_S \cdot p_S + F_W \cdot p_W}{0,95 \cdot R_{eH}}} \quad (3.28)$$

gdje je:

F_p – Faktor kombiniranog odziva

općenito:

$$F_p = 1,5$$

za sunosivo opločenje jakih nosača:

$$F_p = \frac{1,9 \cdot \sigma}{\sigma_a}; \quad \sigma \geq 0,8 \cdot \sigma_a \quad (3.29)$$

Minimalna net debljina oplata ograničena je i izrazima:

$$t_2 = 10 \cdot s \quad (3.30)$$

$$t_3 = 6 \text{ mm} \quad (3.31)$$

Konačno, za minimalnu net debljinu oplata se uzima:

$$t_{net,min} = \text{MAX}(t_1, t_2, t_3) \quad (3.32)$$

Ukupna minimalna debljina oplata:

$$t_{min} = t_{net,min} + t_c \quad (3.33)$$

3.2.5 Izračun mase

Za usporedbu varijanti, kao i za provjeru modela sa grubom mrežom konačnih elemenata, izračunate su mase svih konstrukcijskih elemenata za svaku varijantu topologije prema izrazima:

Masa svih uzdužnih T nosača:

$$m_{T,L} = A_T \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot (N_1 - 2) \cdot L_{HC} \quad (3.34)$$

Masa svih poprečnih T nosača:

$$m_{T,T} = A_T \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot (N_2 - 2) \cdot B_{HC} \quad (3.35)$$

Masa oba rubna uzdužna L nosača:

$$m_{L,L} = A_L \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot 2 \cdot L_{HC} \quad (3.36)$$

Masa oba rubna poprečna L nosača:

$$m_{L,T} = A_L \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot 2 \cdot B_{HC} \quad (3.37)$$

Masa oplata:

$$m_p = L_{HC} \cdot B_{HC} \cdot t \cdot 10^{-3} \cdot \rho \quad (3.38)$$

Masa svih uzdužno usmjerenih ukrepa:

$$m_{HP,L} = A_{HP} \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot N_3 \cdot (N_1 - 1) \cdot L_{HC} \quad (3.39)$$

Masa svih poprečno usmjerenih ukrepa:

$$m_{HP,T} = A_{HP} \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot N_3 \cdot (N_2 - 1) \cdot B_{HC} \quad (3.40)$$

Ukupna masa poklopca:

$$m_{HC} = m_{T,L} + m_{T,T} + m_{L,L} + m_{L,T} + m_p + m_{HP} \quad (3.41)$$

3.3 Određivanje optimalne topologije pomoću Excel Solvera

Jedna od prednosti primjene evolucijskih algoritama pri rješavanju inženjerskih problema je mogućnost pronalaska novog projektnog principa koji je bio nepoznat upravo do te optimizacije, a nije se mogao otkriti intuitivno [7]. Stoga je ponekad moguće pronaći uzorak unutar varijabli za optimalno rješenje i vidjeti neku vrijednost varijable ili međurezultata koji se ponavljaju, ovisno o malim izmjenama formulacije problema. Ovim principom, preko Excel Solvera korištenjem evolucijskog algoritma je određena jedna od povoljnijih varijanti topologija za daljnju analizu.

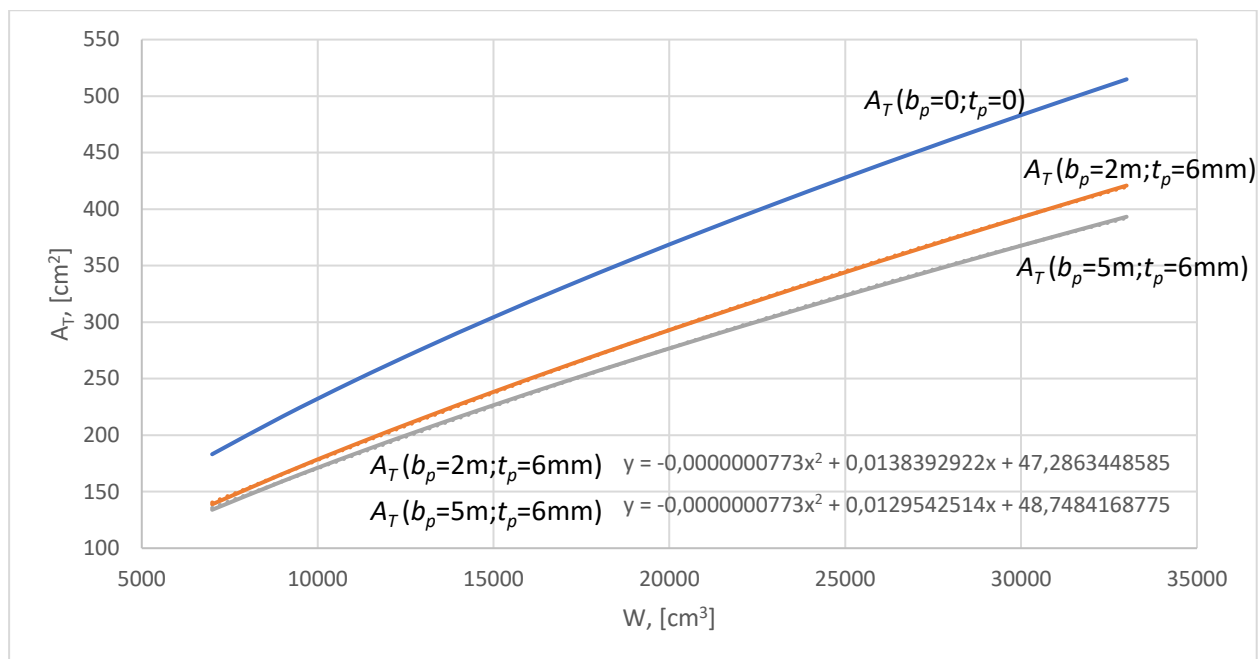
3.3.1 Veza optimalne površine poprečnog presjeka i momenta otpora

Kako bi se smanjio broj ulaznih varijabli Solvera za traženje optimalne topologije, određena je veza između zahtijevanog momenta otpora nosača W i odgovarajuće optimalne površine poprečnog presjeka T profila bez sunosive širine A_T .

Sunosivo opločenje nema zanemariv utjecaj na moment otpora nosača i na površinu poprečnog presjeka T nosača, što je vidljivo iz Tablice 3.1 za slučaj kada nije uzeto u obzir ($b_p=0$, $t_p=0$). Zbog toga je sunosivo opločenje uzeto obzir pretpostavkom širine sunosivog opločenja i minimalne debljine opločenja prema pravilima. Za dobivanje glatkih krivulja optimalne površine poprečnog presjeka T profila, optimizacija T profila korištenjem Solvera je provedena bez ograničenja cjelobrojnih vrijednosti dimenzija nosača. Proračun je proveden za raspon vrijednosti momenta otpora i varijante sunosive širine prikazane u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Vrijednosti optimalne površine poprečnog presjeka T profila

$W[\text{cm}^3]$	$A_T [\text{cm}^2]$	$A_T [\text{cm}^2]$	$A_T [\text{cm}^2]$
	$b_p=5\text{m}, t_p=6\text{mm}$	$b_p=2\text{m}, t_p=6\text{mm}$	$b_p=0, t_p=0$
33000	393,21	420,83	514,85
31000	376,26	402,16	493,83
29000	359,00	383,17	472,35
27000	341,42	363,84	450,38
25000	323,47	344,13	427,85
23000	305,12	324,01	404,72
21000	286,32	303,43	380,90
19000	267,01	282,34	356,32
17000	247,11	260,65	330,85
15000	226,54	238,29	304,37
13000	205,16	215,14	276,67
11000	182,79	191,02	247,51
9000	159,20	165,69	216,52
7000	133,98	138,79	183,12



Slika 3.3 Dijagram ovisnosti optimalne površine T profila o momentu otpora

3.3.2 Pretpostavke i ograničenja

Optimizacija topologije opisana u ovom poglavlju uvodi niz pojednostavljenja i određene pretpostavke kako bi se ubrzao rad evolucionog Excel Solvera, smanjio broj projektnih varijabli i skratilo vrijeme konceptualne faze.

1.) Proračun nosača temelji se na metodi izolirane grede (*poglavlje 3.2.2*) koja ne uzima u obzir doprinos ostalih nosača roštilja poklopca, već promatra svaki nosač zasebno. Kasnije će se pokazati da u većoj ili manjoj mjeri, ovisno o topologiji, ova metoda dobro dimenzionira samo centralne nosače poklopca.

2.) Prema izračunatom momentu otpora (jed. 3.14) određena je optimalna površina poprečnog presjeka T nosača korištenjem regresijskih krivulja drugog reda (slika 3.3). Izvor greške u ovom koraku predstavlja moguće nepoklapanje proizvoljno odabrane sunosive širine kod određivanja optimalne površine poprečnog presjeka T profila i sunosive širine promatrane topologije. Ovaj nedostatak je ispravljen sljedećim postupkom. Solver je pokrenut za inicijalnu pretpostavku sunosive širine te je zatim uspoređena pretpostavljena sunosiva širina sa rezultirajućom topologijom. Ukoliko se radi o relativno velikom odstupanju, izrađena je nova krivulja optimalne površine T profila. Postupak se provodio do konvergencije rješenja.

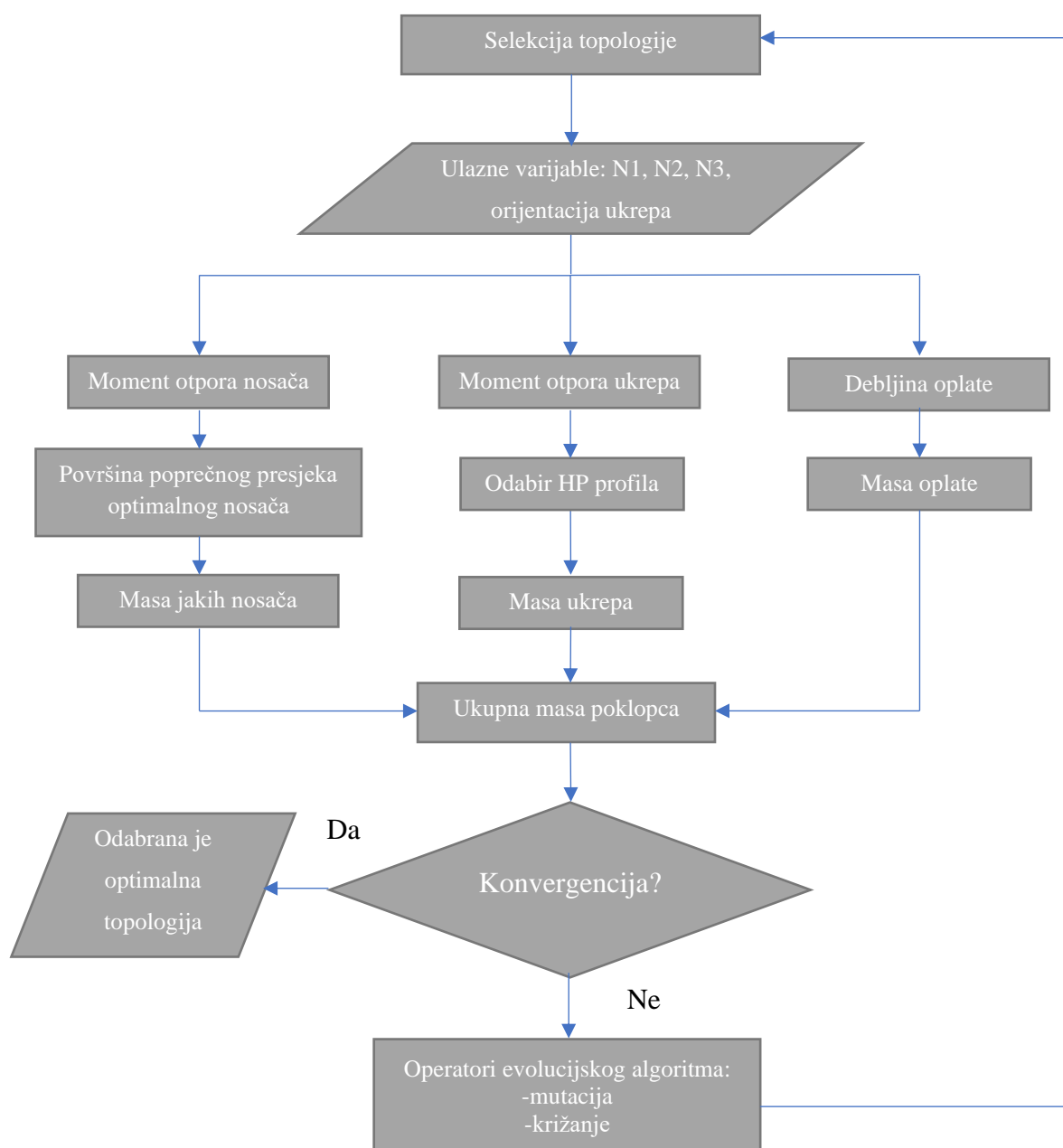
3.) Budući da izraz za proračun momenta otpora, jed. (3.14) ne uzima u obzir smanjenje naprezanja u nosačima prema krajevima, svi nosači u odgovarajućim smjerovima su jednaki. Ovo utječe na topologije sa većim brojem jakih nosača, kod kojih je moguća veća ušteda na masi postepenim smanjivanjem dimenzija nosača prema rubovima, te ih prikazuje nepovoljnijim nego što jesu.

4.) Tehnološko ograničenje jednakosti visina strukova uzdužnih i poprečnih nosača nije uzeto u obzir metodom određivanja optimalne površine poprečnog presjeka T profila. Budući da se optimalna visina nosača T profila mijenja ovisno o odabranom broju nosača, određivanje krivulja optimalnih površina poprečnog presjeka T nosača za svaku moguću visinu nosača u ovoj fazi ne bi bilo vremenski opravdano.

5.) Sve dimenzije konstrukcijskih elemenata su definirane kao net debljine, tj. bez korozijskog dodatka. Za ukrepe se uzimaju HP profili, koji su odabrani prema traženom momentu otpora, jed. (3.20) iz kataloga.

3.3.3 Tok optimizacije

Ulazne varijable Solvera N_1 , N_2 , N_3 u potpunosti definiraju geometriju poklopca prema izrazima za razmake između konstrukcijskih elemenata, jed. (3.9) – (3.13). Orijentacija ukrepa je varijabla koja ne ulazi u solver, već ju je moguće ručno promijeniti. Pokretanjem solvera za obje mogućnosti orijentacije ukrepa (L -uzdužno, T -poprečno) dobivaju se dva moguća rješenja tj. topologije poklopca. Cilj Solvera prema kojemu se traži optimalna topologija je minimalna ukupna masa poklopca m_{HC} . Ograničenja Solvera su cjelobrojne vrijednosti broja nosača i ukrepa te minimalni i maksimalni broj elemenata. Minimalni broj jakih uzdužnih i poprečnih nosača je uzet prema topološkim ograničenjima, jed. (2.3) i (2.4). Maksimalni broj nosača je proizvoljno odabran kako bi se skratilo vrijeme proračuna te iznosi 15.



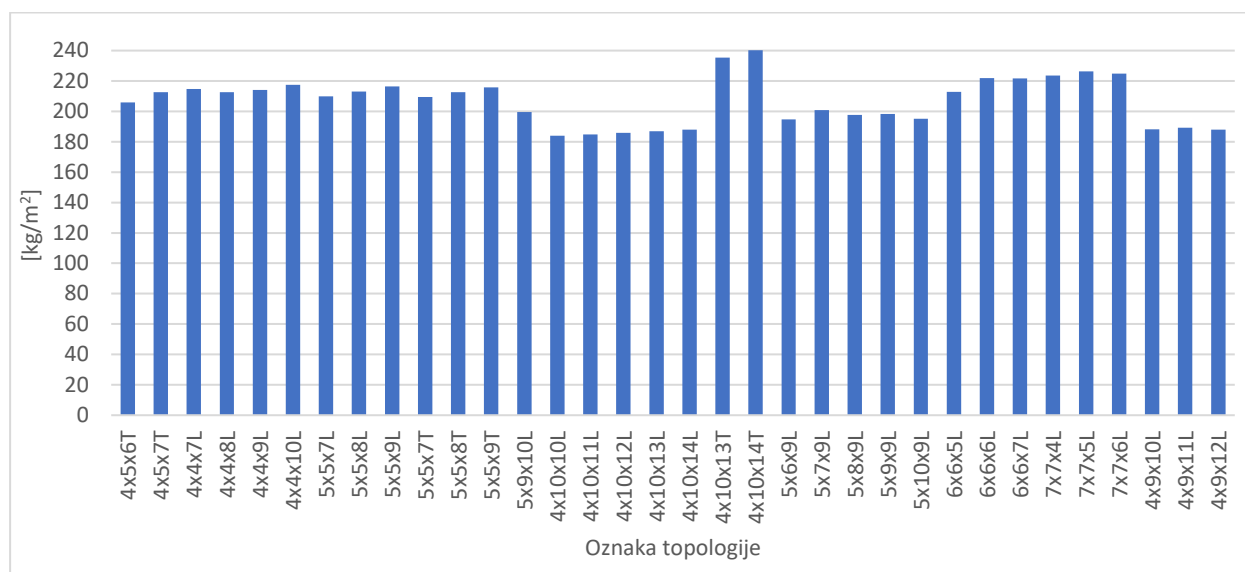
Slika 3.4 Dijagram toka optimizatora topologije

3.4 Odabrane topologije iz konceptualne faze

Prema tabličnom postupku proračuna topologija opisanom u *poglavlju 3.2*, analizirano je ukupno 34 različite varijante. Proizvoljno odabrane varijante teže pravokutnoj mreži nosača, te povećavanjem poprečnog broja nosača kako bi se ispitaio utjecaj na ukupnu masu. Topologija sa mrežom jakih nosača 4x10 i 11 uzdužno usmjerenih ukrepa (4x10x11L) je odabrana prema rezultatima optimizatora topologije, *poglavlje 3.3*. U nastavku, za oznaku broja uzdužnih nosača, poprečnih nosača i ukrepa različitih topoloških varijanti se koristi nomenklatura $N_1 \times N_2 \times N_3 D$, gdje D predstavlja smjer ukrepa koji može biti uzdužan (oznaka L) ili poprečan (oznaka T).

Tablica 3.2 Pregled analiziranih topoloških varijanti u konceptualnoj fazi

Varijanta	Ukrepe	Oplata t, [mm]	Masa poklopca, mHC	
			[kg]	[kg/m ²]
4x5x6T	HP220x10	8,6	69335	205,92
4x5x7T	HP220x10	8,0	71594	212,63
4x4x7L	HP240x10	9,6	72296	214,72
4x4x8L	HP240x10	8,7	71602	212,66
4x4x9L	HP220x10	8,1	72105	214,15
4x4x10L	HP220x10	8,0	73213	217,44
5x5x7L	HP180x8	8,0	70635	209,79
5x5x8L	HP180x8	8,0	71733	213,05
5x5x9L	HP180x8	8,0	72831	216,31
5x5x7T	HP180x8	8,0	70510	209,42
5x5x8T	HP180x8	8,0	71590	212,62
5x5x9T	HP180x8	8,0	72670	215,83
5x9x10L	HP100x6	8,0	67185	199,54
4x10x10L	HP100x6	8,0	61921	183,90
4x10x11L	HP100x6	8,0	62258	184,91
4x10x12L	HP100x6	8,0	62595	185,91
4x10x13L	HP100x6	8,0	62932	186,91
4x10x14L	HP100x6	8,0	63270	187,91
4x4x13T	HP140x7	8,0	79276	235,45
4x4x14T	HP140x7	8,0	80871	240,19
5x6x9L	HP140x7	8,0	65575	194,76
5x7x9L	HP120x6	8,0	67633	200,87
5x8x9L	HP120x6	8,0	66523	197,57
5x9x9L	HP100x6	8,0	66736	198,21
5x10x9L	HP100x6	8,0	65709	195,16
6x6x5L	HP160x7	8,1	71676	212,88
6x6x6L	HP160x7	8,0	74679	221,80
6x6x7L	HP140x7	8,0	74621	221,63
7x7x4L	HP140x7	8,1	75280	223,58
7x7x5L	HP140x7	8,0	76206	226,33
7x7x6L	HP120x6	8,0	75671	224,74
4x9x10L	HP120x6	8,0	63332	188,10
4x9x11L	HP120x6	8,0	63738	189,30
4x9x12L	HP100x6	8,0	63322	188,07



Slika 3.5 Dijagram mase po kvadratnom metru poklopca za sve analizirane varijante

Prema ovim rezultatima, najpovoljnija mreža 4x10 predstavlja princip odabira manjeg broja nosača i većeg broja ukrepa u jednom smjeru, te odabir većeg broja nosača u drugom smjeru.

Odabir smjera ukrepa kod topologija sa pravokutnom mrežom jakih nosača se nije pokazao relevantan, dok odabir smjera ukrepa nesimetričnih mreža jakih nosača ima značajan utjecaj.

Radi daljnje usporedbe sa klasičnom pravokutnom mrežom jakih nosača poklopca, odabrana je i mreža jakih nosača 5x5. Za obje mreže će se usporediti topologije sa različitim brojem ukrepa, kako bi se odredio njihov utjecaj na ukupnu masu poklopca.

Tablica 3.3 Odabrane topologije i profili nosača za daljnju analizu

Varijanta	Uzdužni T	Uzdužni L	Poprečni T	Poprečni L
5x5x7L	T1170x15/464x39	T1170x14/234x14	T1170x15/456x38	T1170x14/234x14
5x5x8L	T1170x15/464x39	T1170x14/234x14	T1170x15/456x38	T1170x14/234x14
5x5x9L	T1170x15/464x39	T1170x14/234x14	T1170x15/456x38	T1170x14/234x14
4x10x10L	T900x12/349x29	T900x11/180x11	T900x12/354x30	T900x11/180x11
4x10x11L	T900x12/349x29	T900x11/180x11	T900x12/354x30	T900x11/180x11
4x10x12L	T900x12/349x29	T900x11/180x11	T900x12/354x30	T900x11/180x11
4x10x13L	T900x12/349x29	T900x11/180x11	T900x12/354x30	T900x11/180x11
4x10x14L	T900x12/349x29	T900x11/180x11	T900x12/354x30	T900x11/180x11

Tablica 3.3 prikazuje modele koji će biti daljnje analizirani kroz preliminarnu projektnu fazu.

4. PRELIMINARNA FAZA

4.1 Izrada modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

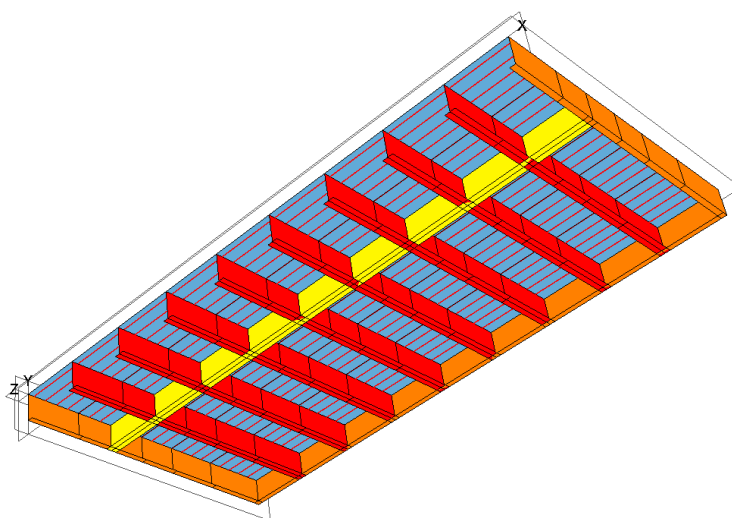
Polovični modeli topologija odabranih u konceptualnoj fazi izrađeni su u programskom paketu MAESTRO. U ovoj fazi program MAESTRO omogućuje brzo modeliranje poklopca korištenjem grubih makroelemenata (orebrena ploča i gredni elementi) te analizu progiba i naprezanja.

Globalni koordinatni sustav u MAESTRU je definiran na sljedeći način:

- Ishodište se nalazi u sjecištu uzdužne osi simetrije poklopca i rubnog poprečnog L nosača
- X os se proteže u smjeru duljine poklopca, pozitivna prema naprijed
- Y os se proteže u smjeru visine poklopca, pozitivna je prema gore
- Z os se proteže u smjeru širine poklopca, pozitivna je prema desnoj strani poklopca

4.1.1 Opis postupka modeliranja

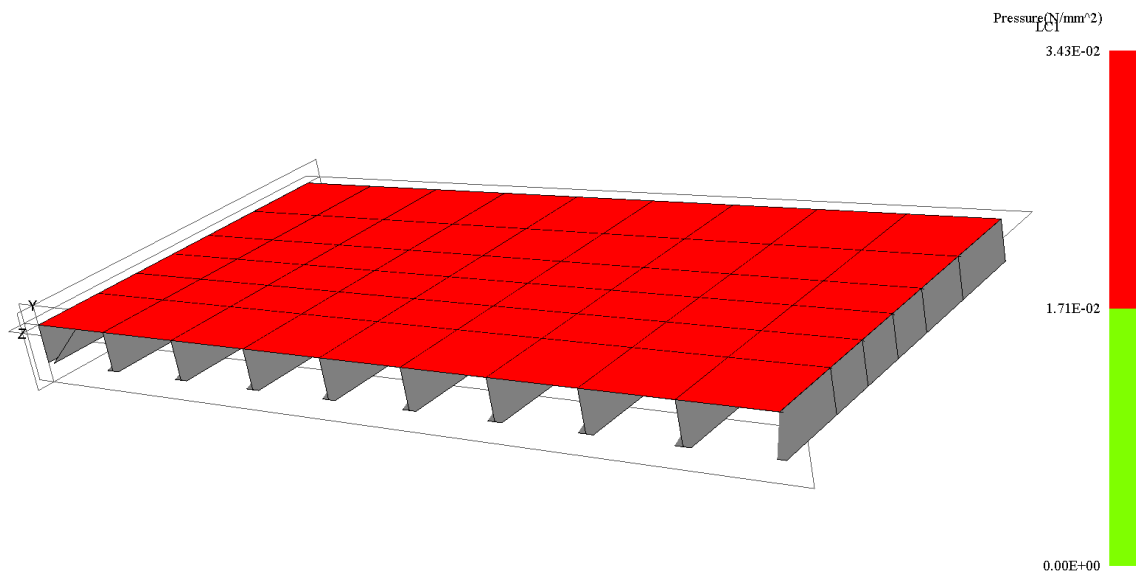
Model je u poprečnom smjeru podijeljen upotrebom sekcija, kojima je razmak jednak razmaku jakih poprečnih nosača, jed (3.10). Uzdužne podjele su izvedene korištenjem čvorova koji su razmaknuti tako da sa poprečnim podjelama stvaraju pravokutne makroelemente sa omjerom stranica što bliže 1:1. Rubni L nosači su modelirani grednim konačnim elementima kako bi im se mogla dodijeliti svojstva različita od ostalih nosača. Oplata je modelirana pločastim (*strake*) konačnim elementima sa pripadnim orebrenjem. Uzdužni i poprečni T nosači su definirani za svaki orebreni pločasti element kao *girder* i *frame*. Budući da se modelira polovica poklopca, za uzimanje u obzir druge polovice poklopca je uključena opcija *Transverse Symmetry*.



Slika 4.1 Polovični model grube mreže, topologija 4x10x14L

4.1.2 Model opterećenja

Opterećenje tlakom je zadano sukladno zahtjevima IACS-CSR *Chapter 4, Section 5, table 4: Pressures on exposed decks, jed.(2.5)*. Model opterećenja uzima i vlastitu masu strukture u obzir, sukladno *Chapter 7, Section 1, 1.5 Applied loads*.

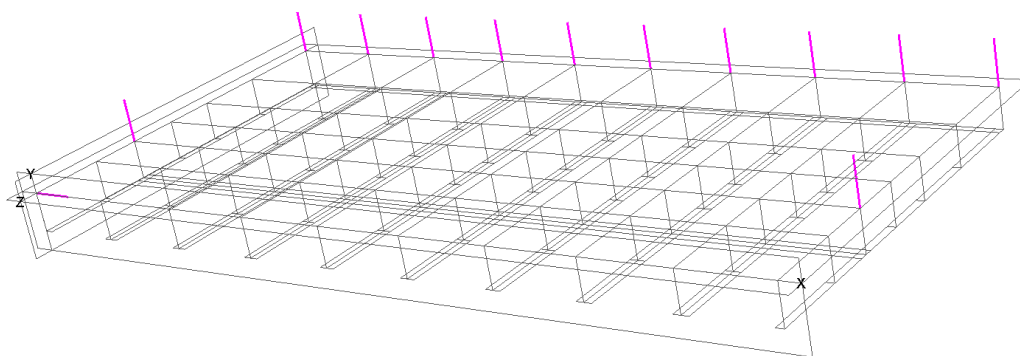


Slika 4.2 Model opterećenja grube mreže, topologija 4x10x14L

4.1.3 Rubni uvjeti

Stoperi i oslonci grotlenih poklopaca su obično pozicionirani tako da se na njih oslanjaju jaki konstrukcijski elementi. Zbog toga se rubni uvjeti postavljaju na krajevima jakih uzdužnih i poprečnih nosača, te u uglovima poklopca. Zadani rubni uvjeti su isti za sve modele:

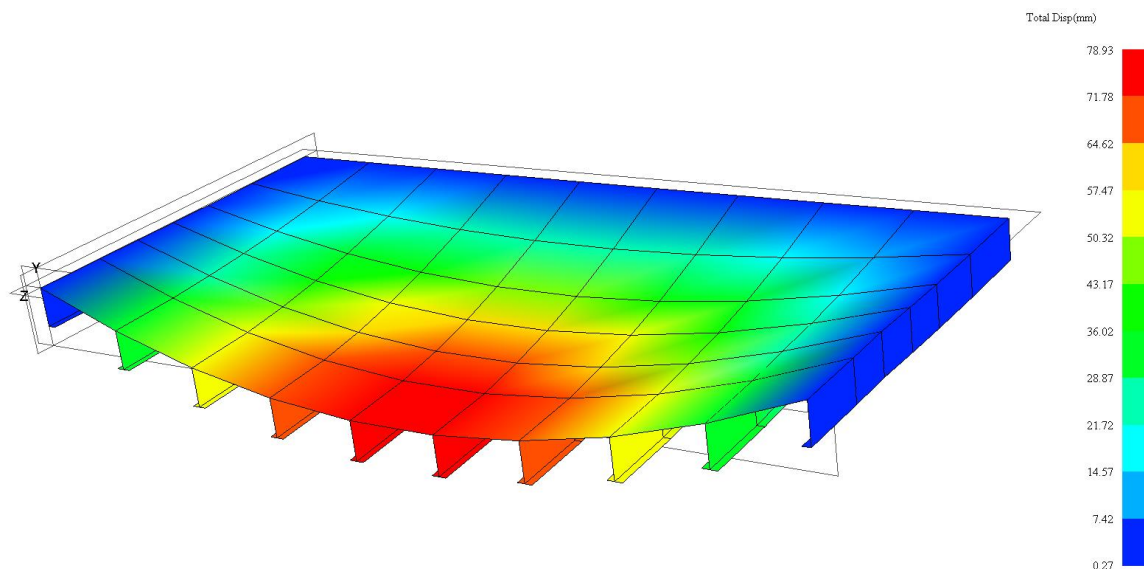
- Pomak u smjeru y osi je spriječen na mjestima jakih nosača
- Pomak u smjeru x osi je spriječen na $x=0$ u simetrali poklopca



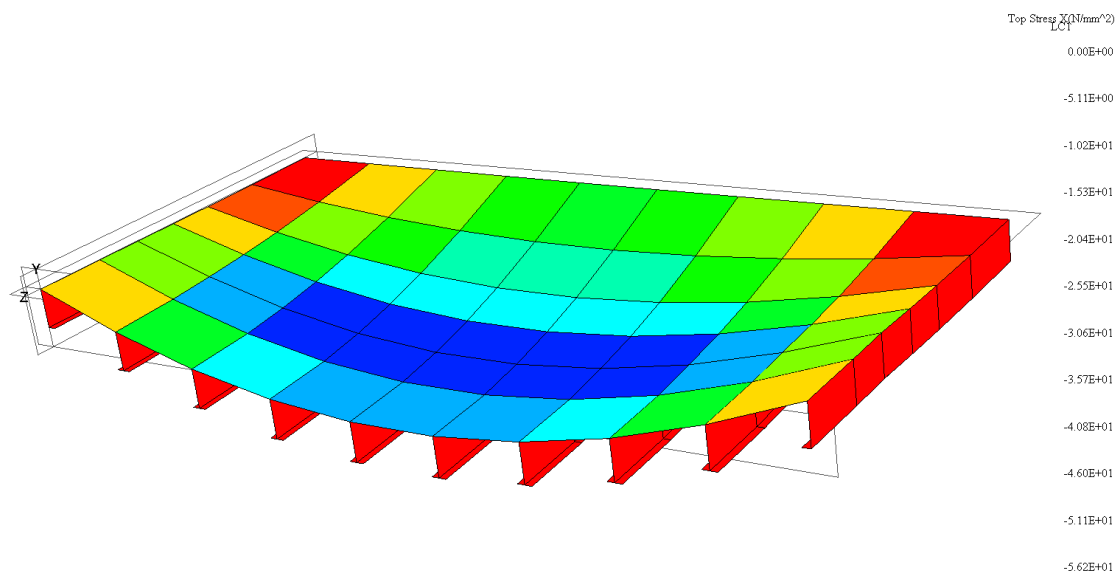
Slika 4.3 Rubni uvjeti grube mreže, topologija 4x10x14L

4.2 Analiza modela sa grubom mrežom konačnih elemenata

Analiza modela je provedena korištenjem ekscentrične grede. Budući da obična ekscentrična greda ne uzima u obzir doprinos sunosive širine kod analize naprezanja [8], dobivaju se veća naprezanja nego sa modificiranom ekscentričnom ili hibridnom gredom. Ovime se nastoji biti na strani sigurnosti prilikom redimenzioniranja.

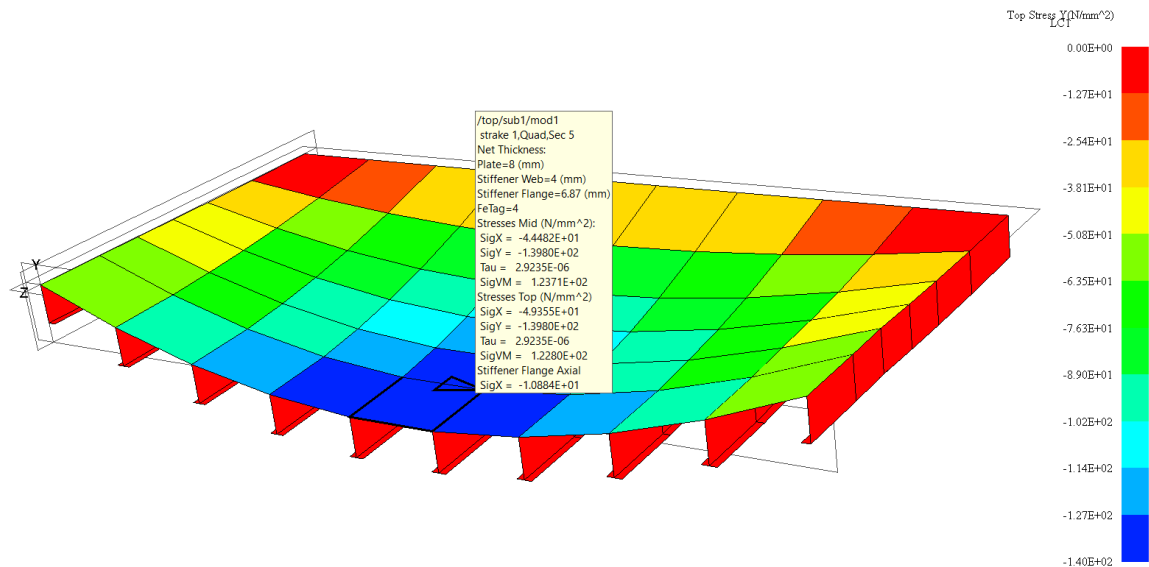


Slika 4.4 Progib modela grube mreže, topologija 4x10x14L

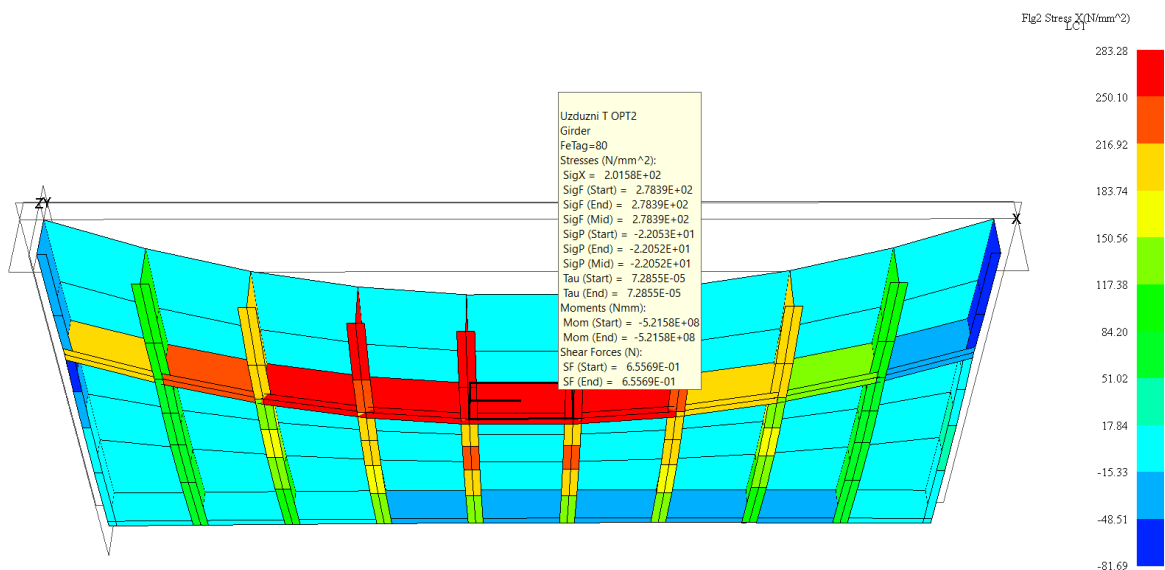


Slika 4.5 Naprezanja u oplati, X smjer, topologija 4x10x14L

X os lokalnog koordinatnog sustava orebrenog pločastog elementa je usmjerena u pozitivnom smjeru globalne X osi. Stoga su naprezanja u smjeru X osi elementa (SigX) usmjerena u uzdužnom smjeru poklopca. Negativne vrijednosti naprezanja označavaju tlačna naprezanja [8], a pozitivne vlačna naprezanja.

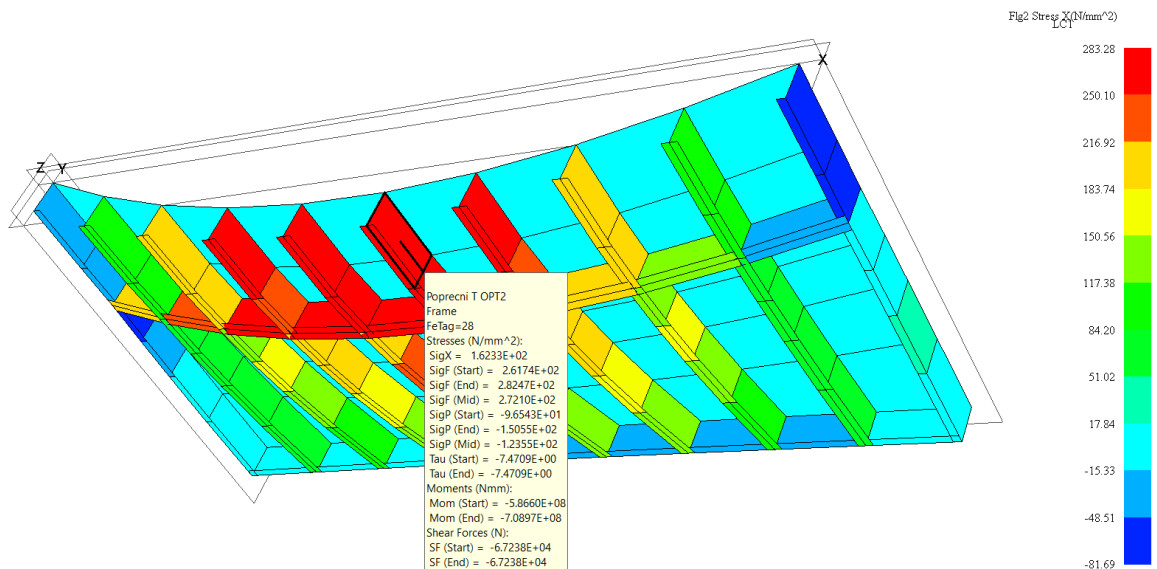


Slika 4.6 Naprezanja u oplati, Y smjer, topologija 4x10x14L



Slika 4.7 Naprezanja u prirubnici uzdužnih nosača, topologija 4x10x14L

Naizgled nesimetrična raspodjela naprezanja u prirubnici rezultat su smjera orijentacije pojedinog konačnog elementa. Svi elementi uzdužnog T nosača orijentirani su u istom smjeru (negativnom smjeru globalne X osi), a skala prikazuje naprezanja na kraju grednog elementa (Flg2 Stress) tj. na desnom rubu pojedinog konačnog elementa uzdužnog T nosača prema slici 4.7.



Slika 4.8 Naprezanja u prirubnici poprečnih nosača, topologija 4x10x14L

Maksimalno naprezanje u prirubnici poprečnog nosača na kraju grednog elementa (u sredini poklopca) iznosi 282,47 N/mm², a u prirubnici poprečnog nosača 278,39 N/mm², što je ispod dopuštenih 284 N/mm² prema jed. (4.1).

4.3 Preliminarno dimenzioniranje jakih nosača

Budući da prikazanim načinom modeliranja poklopca nije moguće dodijeliti različita svojstva različitim poprečnim T nosačima, u ovoj fazi preliminarnog dimenzioniranja konstrukcije se efektivno dimenzioniraju samo centralni nosači koji imaju iste karakteristike duž cijelog nosača. Svođenjem ovih nosača na jednaku razinu naprezanja, uz jednaku razinu zadovoljenja kriterija izvijanja oplata, moguće je usporediti različite varijante topologija.

Odabrana kvaliteta čelika svih konstrukcijskih elemenata je AH36, sljedećih karakteristika prema pravilima IACS-CSR *Chapter 3, Section 1, Table 1* i *Chapter 1, Section 4, 2.2 Materials*:

$$R_{eH} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 206000 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalne vrijednosti dopuštenih naprezanja su odabrane sukladno *Chapter 9, Section 5, Table 2: Allowable stresses*:

$$\sigma_a = 0,8 \cdot R_{eH} = 284,0 \text{ N/mm}^2 \quad (4.1)$$

$$\tau_a = 0,46 \cdot R_{eH} = 163,3 \text{ N/mm}^2 \quad (4.2)$$

Prema rezultatima analize, računa se novi moment otpora uzdužnih i poprečnih T nosača:

$$w_{i+1} = w_i \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_a} \quad (4.3)$$

gdje je:

w_{i+1} – Novi moment otpora nosača

w_i – Trenutni moment otpora nosača

σ_i – Najveće naprezanje koje se pojavljuje u nosaču momenta otpora w_i

σ_a – Najveće dopušteno naprezanje

Za novi moment otpora w_{i+1} definiraju se nove dimenzije nosača pomoću optimizatora T profila, poglavlje 3.1.

4.4 Preliminarna izmjena debljine oplata

Debljina oplata ne smije biti manja od minimalnih vrijednosti već definiranih u poglavlju 3.2.4, jed. (3.28) – (3.32). Osim minimalnih vrijednosti, oplata mora zadovoljiti kriterije izvijanja prema IACS-CSR Chapter 9, Section 5, 5.2.3 Critical buckling stress check.

4.4.1 Provjera izvijanja oplata paralelno sa ukrepama

Tlačno naprezanje u oplati paralelno sa smjerom ukrepa mora zadovoljiti sljedeći izraz:

$$\sigma_{x,max} \leq \frac{0,88}{S} \cdot \sigma_{C1} \quad (4.4)$$

gdje je:

$\sigma_{x,max}$ – Tlačno naprezanje u oplati paralelno sa ukrepama u [N/mm²]

$S=1,1$ - Faktor sigurnosti za lokalno opterećene strukture kao što su poklopci, sukladno Chapter 6, Section 3

σ_{C1} – Kritično naprezanje u [N/mm²], računato prema:

$$\sigma_{C1} = \sigma_{E1} \quad \text{za} \quad \sigma_{E1} \leq \frac{R_{eH}}{2} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{C1} = R_{eH} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4 \cdot \sigma_{E1}}\right) \quad \text{za} \quad \sigma_{E1} > \frac{R_{eH}}{2} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{E1} = 3,6 \cdot E \cdot \left(\frac{t_{net}}{1000 \cdot S_s}\right)^2 \quad (4.7)$$

4.4.2 Provjera izvijanja oplata okomito na ukrepe

Tlačno naprezanje u oplati okomito na smjer ukrepa mora zadovoljiti sljedeći izraz:

$$\sigma_{y,max} \leq \frac{0,88}{S} \cdot \sigma_{C2} \quad (4.8)$$

gdje je:

$\sigma_{y,max}$ – Tlačno naprezanje u oplati okomito na ukrepe u [N/mm²]

$S=1,1$ - Faktor sigurnosti za lokalno opterećene strukture kao što su poklopci, sukladno *Chapter 6, Section 3*

σ_{C2} – Kritično naprezanje u [N/mm²], računato prema:

$$\sigma_{C2} = \sigma_{E2} \text{ za } \sigma_{E2} \leq \frac{R_{eH}}{2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_{C2} = R_{eH} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4 \cdot \sigma_{E2}}\right) \text{ za } \sigma_{E2} > \frac{R_{eH}}{2} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{E2} = 0,9 \cdot m \cdot E \cdot \left(\frac{t_{net}}{1000 \cdot s_s}\right)^2 \quad (4.11)$$

$$m = c \cdot \left[1 + \left(\frac{s_s}{l_s}\right)^2\right]^2 \cdot \frac{2,1}{\psi + 1,1} \quad (4.12)$$

Prosječna vrijednost koeficijenta za slučaj kada je jedna strana panela oplata ukrepljena jakim nosačem, a druga ukrepom:

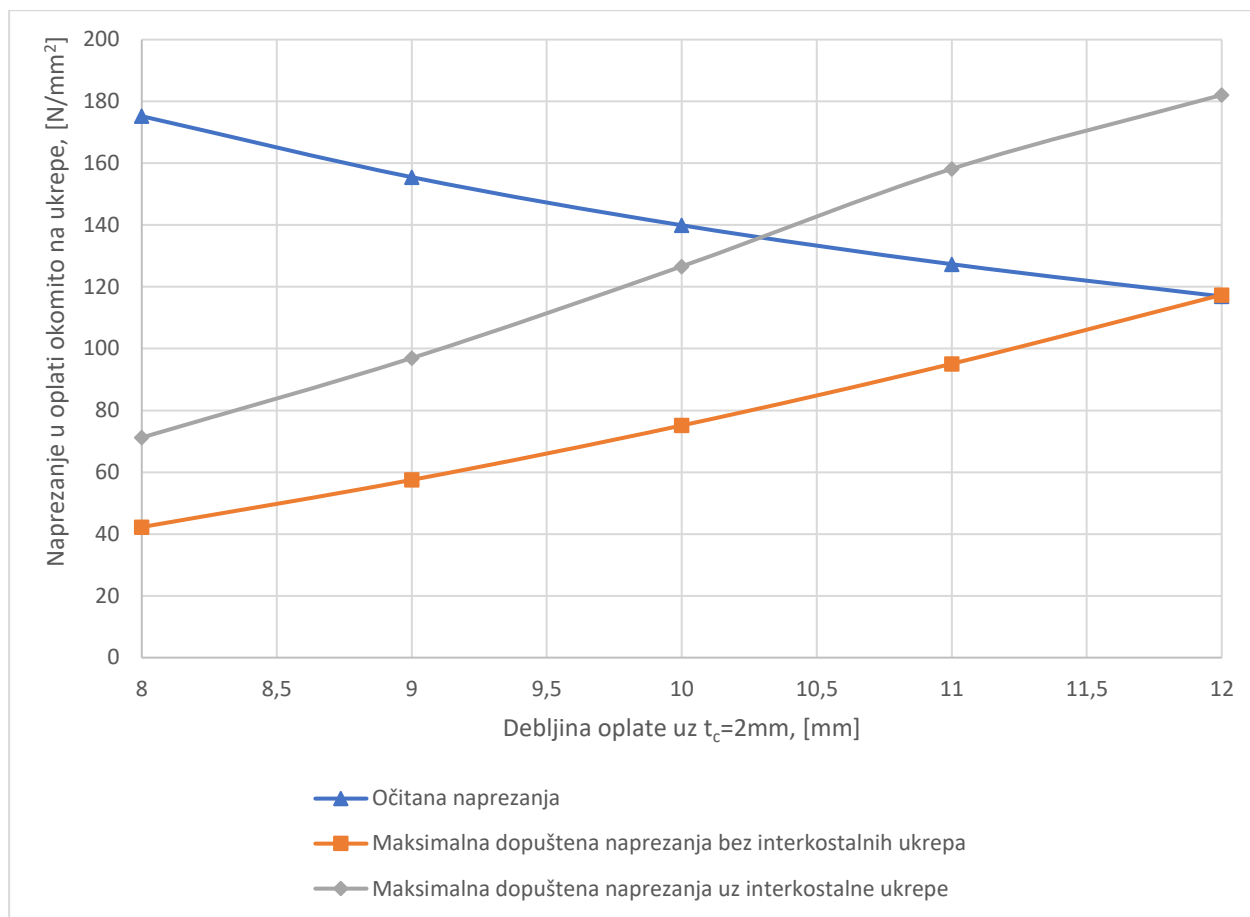
$$c = 1,2 \quad (4.13)$$

Omjer najvećeg i najmanjeg tlačnog naprezanja okomito na smjer ukrepa za promatrani panel oplata, pretpostavljena najnepovoljnija vrijednost jednaka:

$$\psi = 1 \quad (4.14)$$

4.5 Usporedba varijanti

Za svaku od promatranih varijanti topologija su provedene dvije iteracije redimenzioniranja, prema postupku opisanom u *poglavlju 4.3*. Debljine oplata su odabrane tako da sve topologije zadovoljavaju kriterije izvijanja, a odabrana ukupna maksimalna debljina oplata je 12mm. Budući da zbog vrlo strogog kriterija izvijanja, uzrokovanog odabirom ψ , jed. (4.14), samo topologija 4x10x14L zadovoljava odabirom oplata 12mm, usporedba se provodi uz pretpostavku korištenja ukrepa protiv izvijanja. Dijagrami očitanih naprezanja i maksimalnih dozvoljenih naprezanja (sa i bez ukrepa protiv izvijanja) okomito na ukrepe u ovisnosti o debljini oplata su izrađeni za svaku od odabranih topologija. Očitana naprezanja su u smjeru okomito na ukrepe (SigY), na kritičnom elementu oplata u sredini poklopca. Primjer dijagrama za topologiju 4x10x14L je na slici 4.9.



Slika 4.9 Dijagram naprezanja u ovisnosti o debljini oplata, 4x10x14L

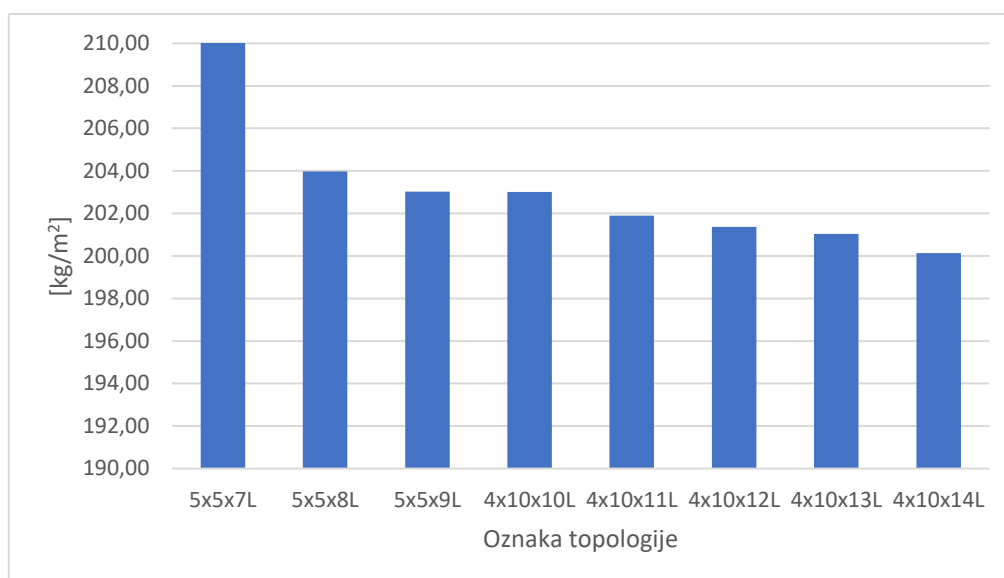
Ukrepe protiv izvijanja se postavljaju simetrično između jakih poprečnih nosača, tako da neukrepljeno polje oplata dijele na jednake dijelove. Odabrani broj ovih ukrepa za mrežu 4x10 i mrežu 5x5 je jednak te iznosi $N_4 = 2$.

Tablica 4.1 Pregled analiziranih topoloških varijanti u preliminarnoj fazi

Varijanta	Ukrepe	Oplata t, [mm]	Masa poklopca m_{HC}	
			[kg]	[kg/m ²]
5x5x7L	HP180x8	11,9	70713	210,02
5x5x8L	HP180x8	11,3	68678	203,97
5x5x9L	HP180x8	10,7	68357	203,02
4x10x10L	HP100x6	11,0	68354	203,01
4x10x11L	HP100x6	10,9	67978	201,89
4x10x12L	HP100x6	10,7	67803	201,38
4x10x13L	HP100x6	10,5	67691	201,04
4x10x14L	HP100x6	10,3	67383	200,13

Tablica 4.2 Odabrani profili nosača u preliminarnoj fazi

Varijanta	Uzdužni T	Uzdužni L	Poprečni T	Poprečni L
5x5x7L	T990x13/385x34	T990x13/198x13	T990x13/392x30	T990x13/198x13
5x5x8L	T990x13/373x35	T990x13/198x13	T990x13/392x30	T990x13/198x13
5x5x9L	T990x13/387x34	T990x13/198x13	T990x13/390x30	T990x13/198x13
4x10x10L	T900x12/355x29	T900x12/180x12	T900x12/332x26	T900x12/180x12
4x10x11L	T900x12/342x30	T900x12/180x12	T900x12/347x25	T900x12/180x12
4x10x12L	T900x12/356x29	T900x12/180x12	T900x12/347x25	T900x12/180x12
4x10x13L	T900x12/356x29	T900x12/180x12	T900x12/334x26	T900x12/180x12
4x10x14L	T900x12/358x29	T900x12/180x12	T900x12/334x26	T900x12/180x12



Slika 4.10 Dijagram mase po kvadratnom metru poklopca za odabrane topologije

Prema ovim rezultatima je vidljivo kako se povećavanjem broja ukrepa omogućuje odabir manje debljine oplata, što ima veliki utjecaj na ukupnu masu poklopca. Topologija 4x10x14L se pokazala kao najpovoljnija, što je u potpunoj suprotnosti sa rezultatima konceptualne faze gdje je bila najnepovoljnija od svih sa mrežom 4x10. Ovime je pokazan jedan od nedostataka dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata korištenjem metode izolirane grede, a to je nemogućnost aproksimacije kritičnih naprezanja u oplati koje uvelike ovise o razmaku između ukrepa tj. veličini elementarnog panela oplata.

Za daljnju analizu u završnoj fazi su odabrane topologije 5x5x9L i 4x10x14L.

5. ZAVRŠNA FAZA

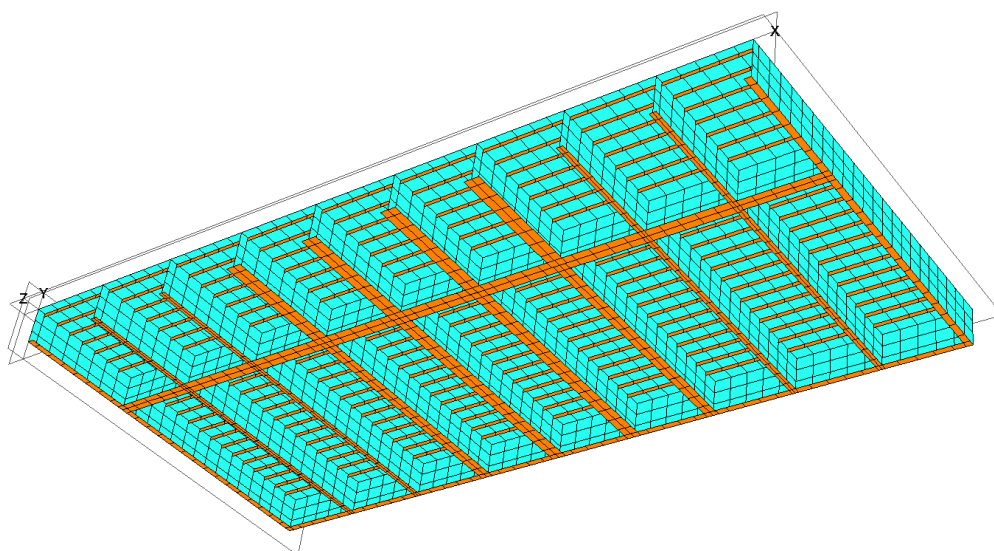
5.1 Izrada modela sa finom mrežom konačnih elemenata

Modeli sa finom mrežom konačnih elemenata su izrađeni za obje odabrane topologije u preliminarnoj fazi, sukladno zahtjevima *Lloyd's Register Chapter 2. Finite Element Analysis* [6]:

- Oplata te strukovi i prirubnice jakih nosača su modelirani pločastim konačnim elementima
- Korištenje trokutastih konačnih elemenata je svedeno na minimum
- Ukrepe su modelirane grednim konačnim elementima
- Prilikom konačne analize se koristi hibridna greda, kod koje se za svojstvo aksijalne krutosti koristi samo površina poprečnog presjeka ukrepe, a za savojnu krutost se koristi poprečna površina ukrepe uz pripadno sunosivo opločenje [8]
- Strukovi jakih nosača su diskretizirani sa 3 konačna elementa po visini

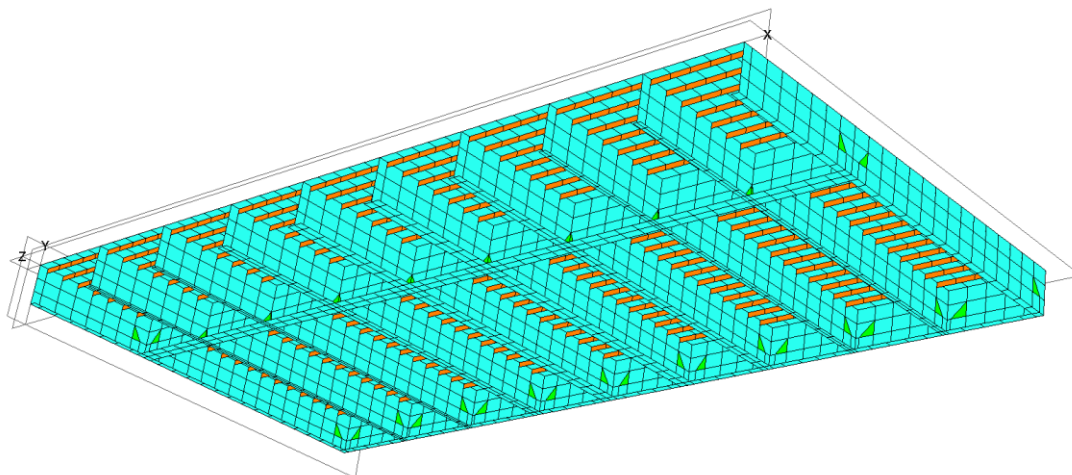
5.1.1 Opis postupka modeliranja

Fina mreža konačnih elemenata je dobivena iz grube mreže korištenjem opcije *Refine*. Prilikom progušćivanja mreže, strukovi grednih (*beam*) elemenata su zamijenjeni pločastim (*quad*) elementima, a prirubnice grednih elemenata su zadržane kao *beam* elementi radi jednostavnosti redimenzioniranja. Mreža je definirana tako da postoji jedan konačni element između ukrepa i 5 konačnih elemenata između jakih poprečnih nosača.



Slika 5.1 Polovični model fine mreže sa grednim elementima prirubnica, topologija 4x10x14L

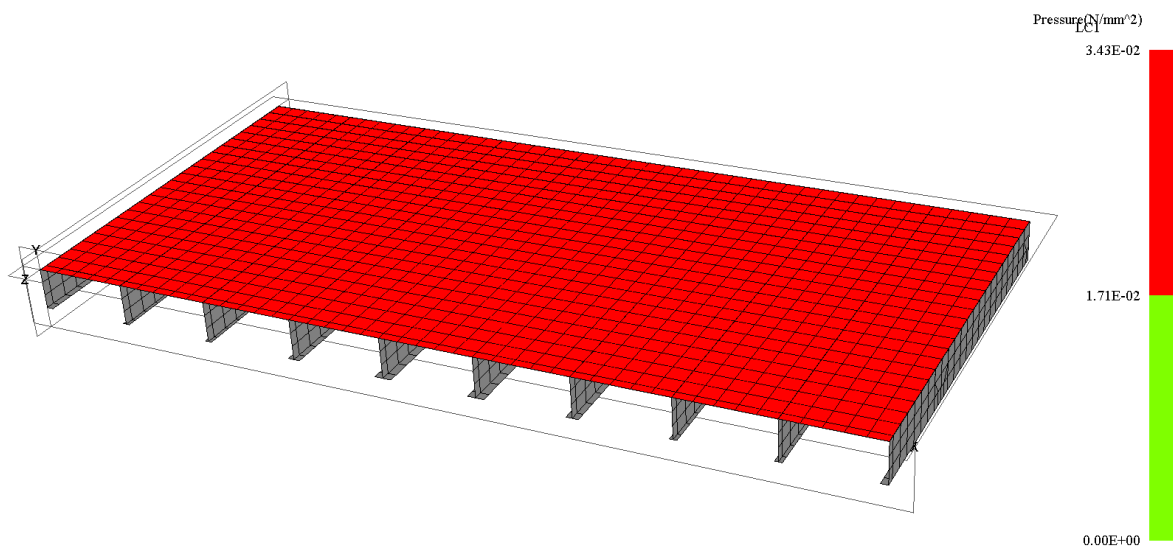
Nakon redimenzioniranja modela sa grednim konačnim elementima, gredni konačni elementi su zamijenjeni pločastim sukladno zahtjevima *Lloyd's Register*.



Slika 5.2 Polovični model fine mreže sa pločastim elementima, topologija 4x10x14L

5.1.2 Model opterećenja

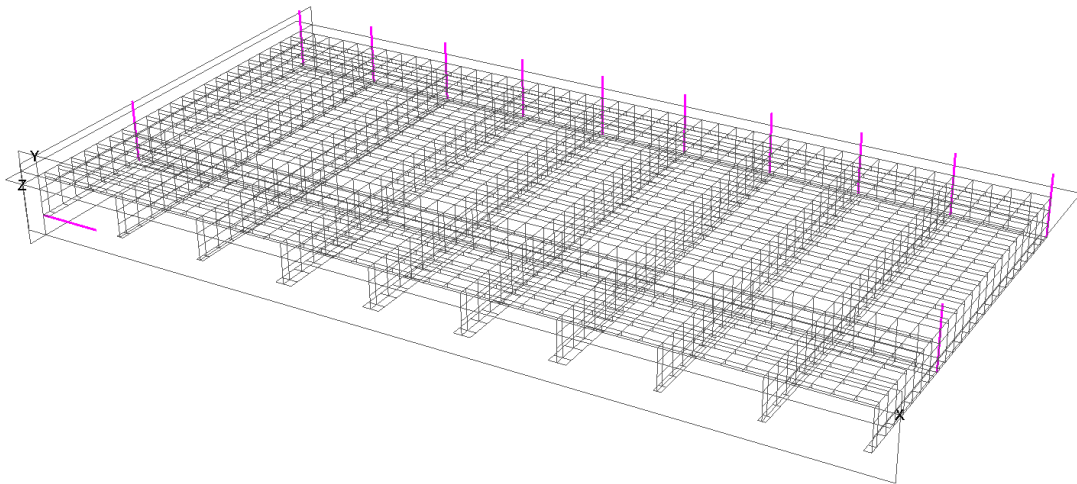
Model opterećenja je definiran jednako kao i za modele sa grubom mrežom konačnih elemenata. Opterećenje tlakom je zadano sukladno zahtjevima IACS-CSR *Chapter 4, Section 5, table 4: Pressures on exposed decks, jed.(2.5)*. Model opterećenja uzima i vlastitu masu strukture u obzir, sukladno *Chapter 7, Section 1, 1.5 Applied loads*.



Slika 5.3 Model opterećenja fine mreže, topologija 4x10x14L

5.1.3 Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su definirani jednako kao i za modele sa grubom mrežom konačnih elemenata.



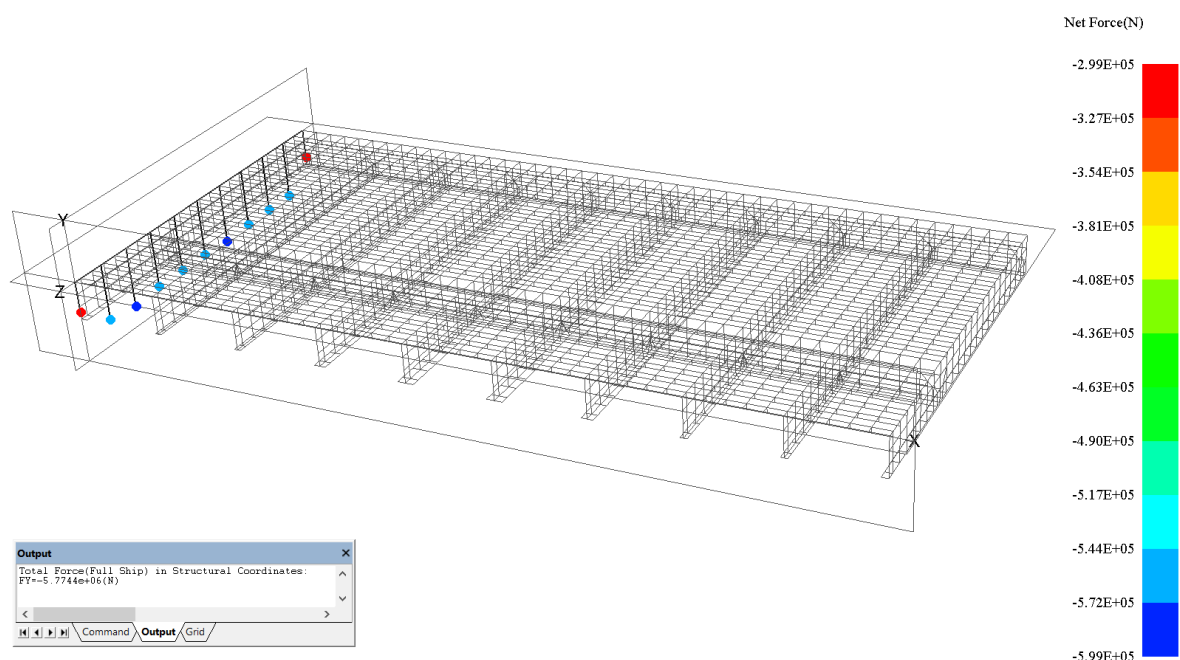
Slika 5.4 Rubni uvjeti grube mreže, topologija 4x10x14L

5.1.4 Provjera modela

Kako bi se provjerila metoda prognoščivanja mreže, osim provjere integriteta modela opcijama *Element connectivity* i *Overlapped elements* napravljene su usporedbe mase i provjera ukupne sile na poklopac. Ukupna vertikalna sila tlaka na polovicu poklopca mora iznositi:

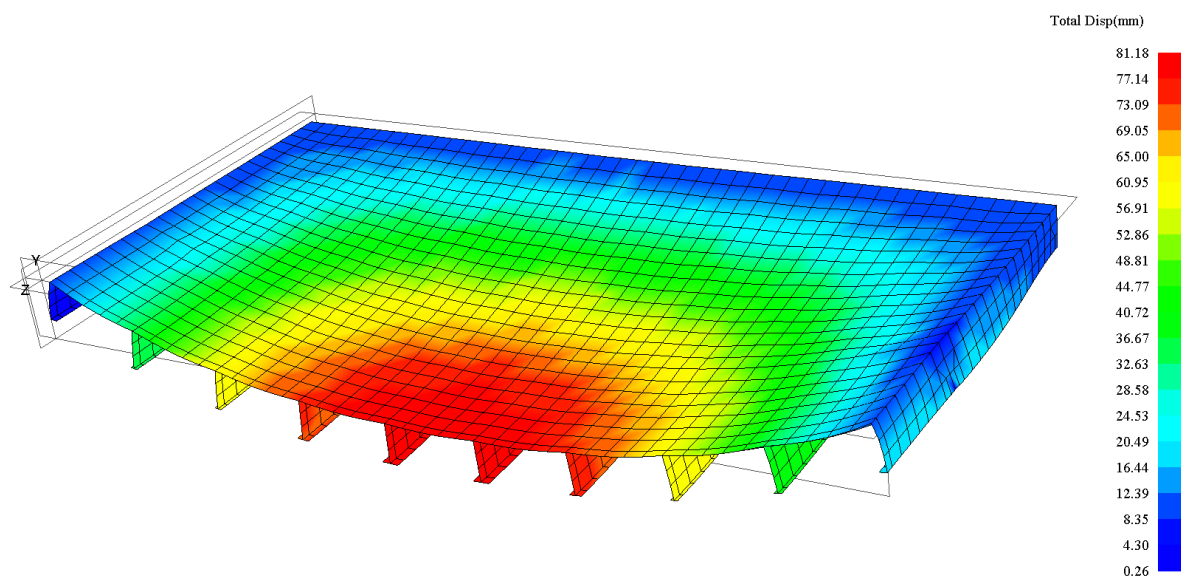
$$F_Y = \frac{1}{2} \cdot L_{HC} \cdot B_{HC} \cdot p_w = 5,7744 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (5.1)$$

Isključivanjem vlastite mase konstrukcije u izborniku opterećenja, očitava se ukupna vertikalna sila na poklopac uslijed djelovanja tlaka.



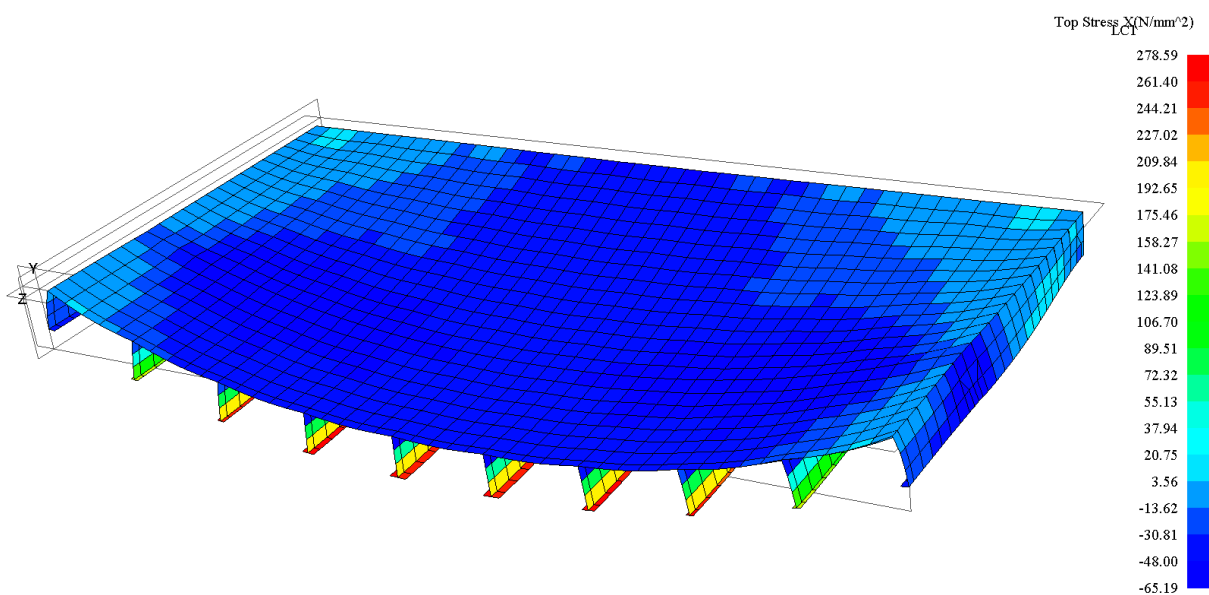
Slika 5.5 Ukupna vertikalna sila na poklopac, topologija 4x10x14L

5.2 Analiza modela sa finom mrežom konačnih elemenata



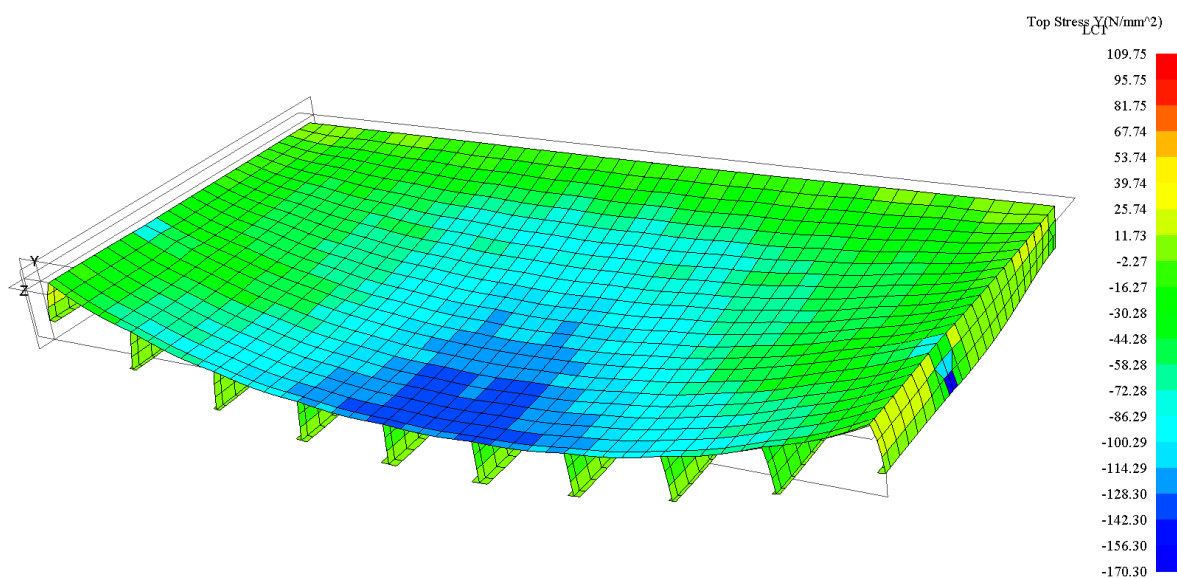
Slika 5.6 Progib modela fine mreže, topologija 4x10x14L

Maksimalni progib u sredini poklopca je manji od maksimalnog dopuštenog koji iznosi 103,6mm prema jed (3.19), poglavlje 3.2.2.



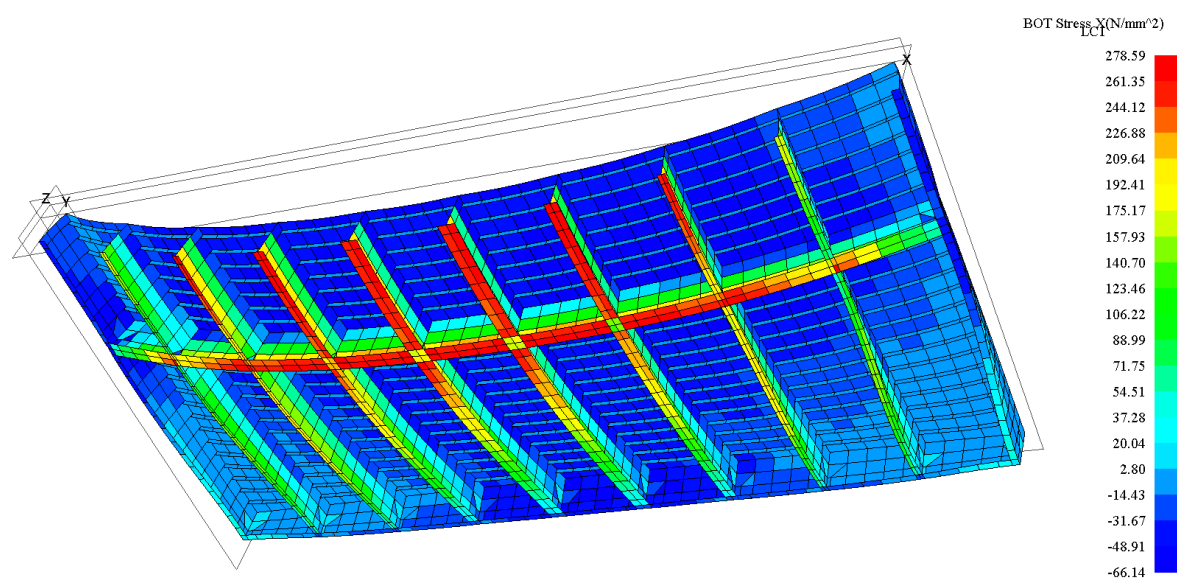
Slika 5.7 Naprezanja u oplati, X smjer, topologija 4x10x14L

Naprezanja u oplati paralelno sa smjerom ukrepa (σ_X) su relativno niska i poprimaju vrijednosti za red veličine manje od maksimalnih dopuštenih.



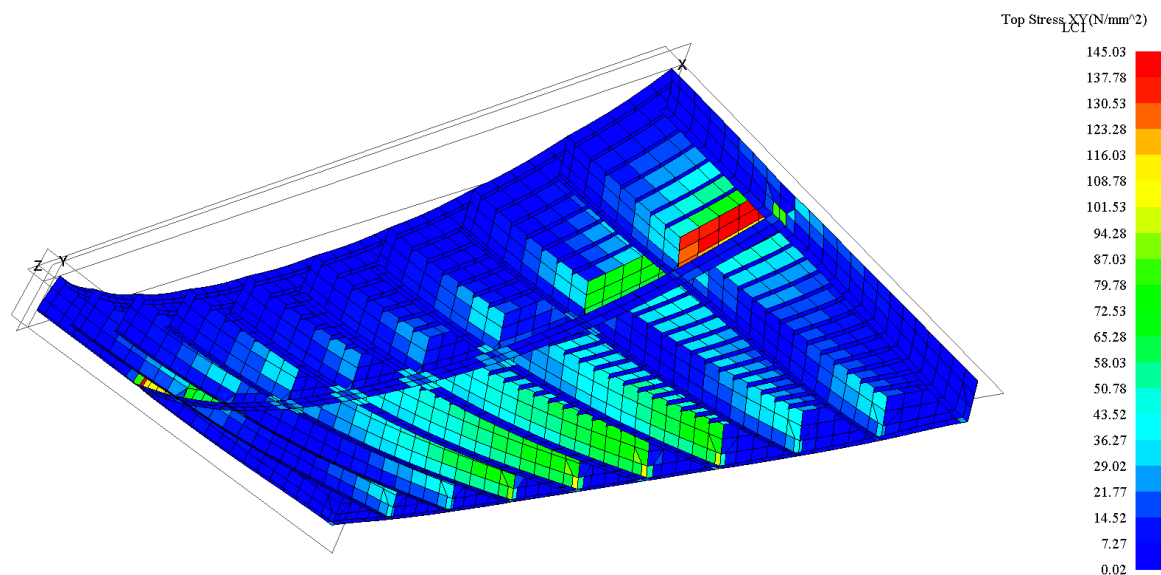
Slika 5.8 Naprezanja u oplati, Y smjer, topologija 4x10x14L

Naprezanja u oplati okomito na smjer ukrepa (σ_X) su relativno veća budući da se radi o smjeru kraće stranice neukrepljenog panela. U detaljnoj analizi ovih rezultata, danih u Prilogu, pokazati će se koja polja oplata ne zadovoljavaju kriterij izvijanja.



Slika 5.9 Naprezanja u prirubnicama, topologija 4x10x14L

Sva naprezanja u prirubnicama jakih nosača su ispod dozvoljenih 284 N/mm^2 prema jed. (4.1).



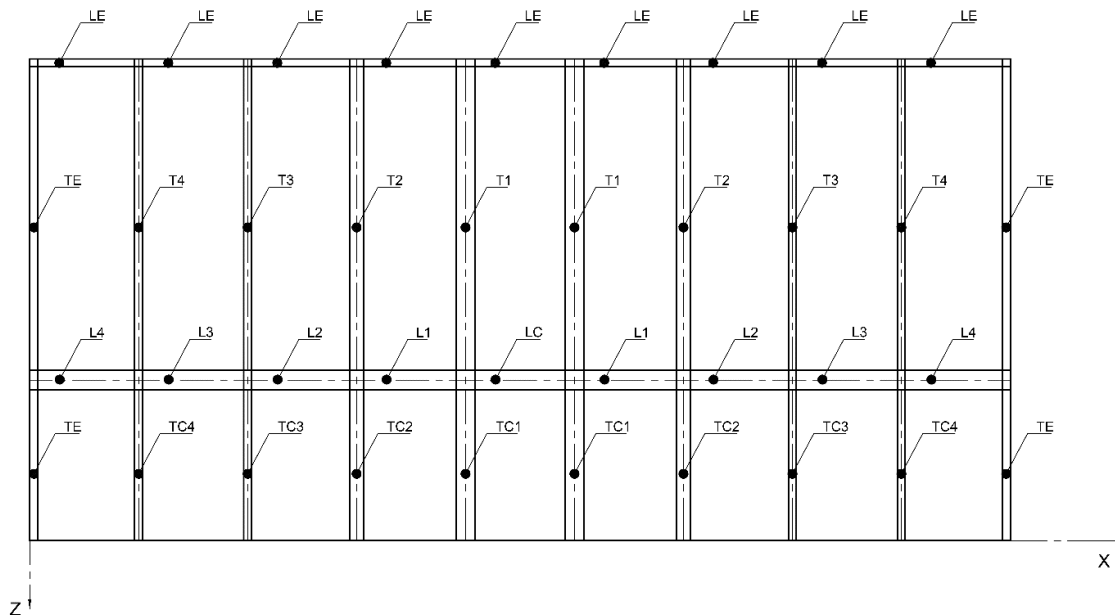
Slika 5.10. Smična naprezanja u strukovima nosača, topologija 4x10x14L

Najveća smična naprezanja u strukovima nosača se pojavljuju na rubovima uzdužnih nosača, zona L4 prema slici 5.11. Prosječna smična naprezanja u ovoj zoni iznose $123,2 \text{ N/mm}^2$ što je ispod maksimalnog dopuštenog od $142,1 \text{ N/mm}^2$ za to polje.

Ostale zone u kojima se pojavljuju povećana smična naprezanja su T1 i T2. U tablici 5.2 je prikazan izračun maksimalnih dopuštenih smičnih naprezanja za sve zone strukova jakih nosača prema kojemu je vidljivo da svi strukovi jakih nosača zadovoljavaju kriterij izvijanja.

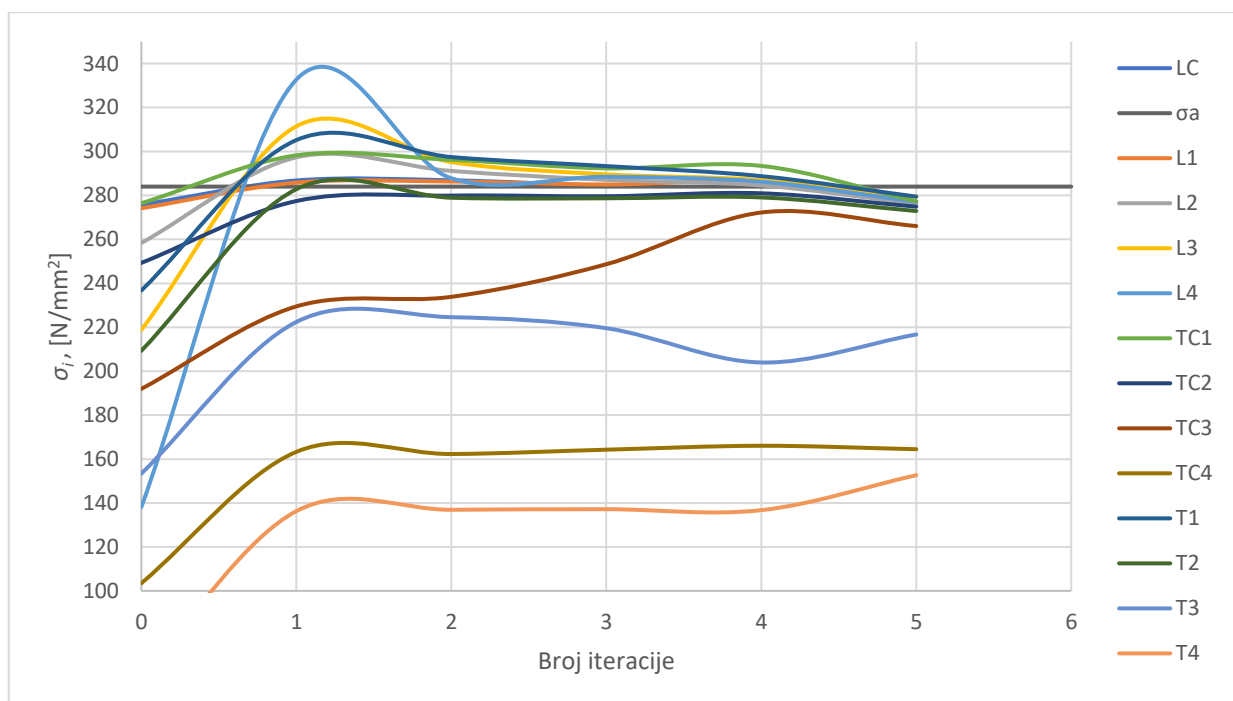
5.3 Dimenzioniranje jakih nosača

Prirubnice jakih nosača su dimenzionirane na isti način opisan u *poglavlju 4.3*. Svaki nosač je podijeljen u više zona, prikazanih na slici 5.11. i redimenzioniran zasebno. Budući da poklopac ima uzdužnu i poprečnu os simetrije, postoji ukupno 15 različitih zona jakih nosača.



Slika 5.11 Zone jakih nosača, topologija 4x10x14L

Konačne dimenzije jakih nosača određene su kroz nekoliko iteracija redimenzioniranja. Približavanje naprezanja u prirubnicama nosača prema maksimalnom dopuštenom σ_a prikazano je na slici 5.12.



Slika 5.12 Konvergencija rješenja kroz iterativno redimenzioniranje topologije 4x10x14L

Tablica 5.1 Odabrani profili jakih nosača, topologija 4x10x14L

Pozicija	Odabrani profil
LC	T900x12/360x32
L1	T900x12/360x32
L2	T900x12/360x32
L3	T900x10/360x30
L4	T900x10/360x20
LE	T900x10/150x10
TC1	T900x14/360x32
TC2	T900x10/260x30
TC3	T900x10/150x10
TC4	T900x10/150x10
T1	T900x12/360x30
T2	T900x10/260x30
T3	T900x10/150x10
T4	T900x10/150x10
TE	T900x10/150x10

Strukovi jakih nosača su provjereni na izvijanje prema pravilima IACS-CSR *Chapter 9, Section 5, 5.4.6 Critical buckling stress check of the web panels of the primary supporting members.*

Smično naprezanje u struku jakih nosača ne smije biti veće od:

$$\tau_{max} \leq \frac{0,88}{S} \cdot \tau_C \quad (5.2)$$

gdje je:

τ_{max} – Smično naprezanje u struku nosača u [N/mm²]

$S=1,1$ - Faktor sigurnosti za lokalno opterećene strukture kao što su poklopci, sukladno *Chapter 6, Section 3*

τ_C – Kritično naprezanje u [N/mm²], računato prema:

$$\tau_C = \tau_E \quad \text{za} \quad \tau_E \leq \frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}} \quad (5.3)$$

$$\tau_C = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sqrt{3} \cdot \tau_E}\right) \quad \text{za} \quad \tau_E > \frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}} \quad (5.4)$$

$$\tau_E = 0,9 \cdot k_t \cdot E \cdot \left(\frac{t_{w,net}}{1000 \cdot d}\right)^2 \quad (5.5)$$

$$k_t = 5,35 + 4,0 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2 \quad (5.6)$$

$t_{w,net}$ – Net debljina struka nosača u [mm]

a – Veća dimenzija promatranog panela struka nosača u [m]

d – Manja dimenzija promatranog panela struka nosača u [m]

Za jake uzdužne nosače paralelne sa ukrepama promatraju se stvarne dimenzije panela $a \times d$.

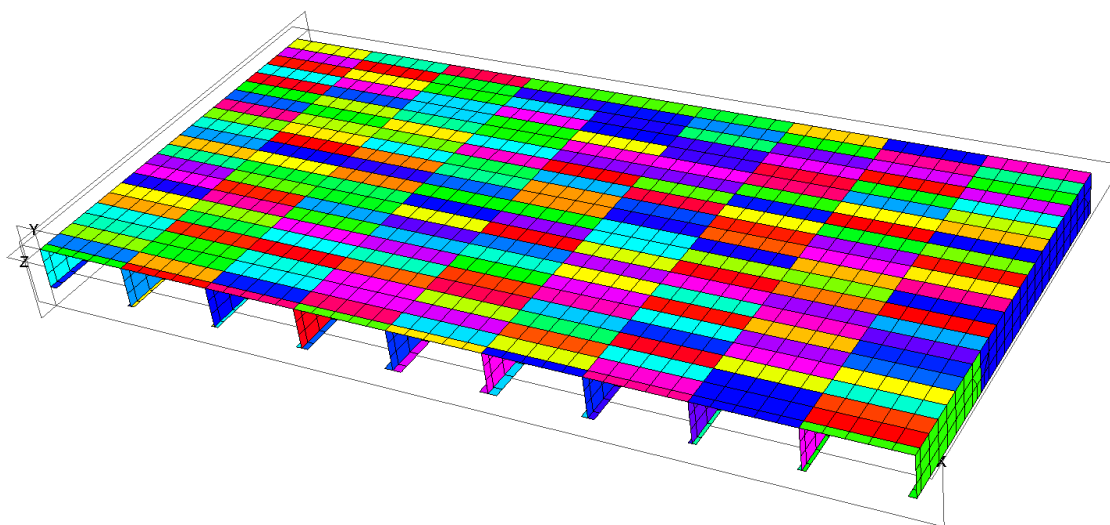
Za jake poprečne nosače okomite na smjer ukrepa promatra se pretpostavljeno kvadratno polje struka nosača dimenzije d . Referentno smično naprezanje τ_{avg} u svakom polju struka je određeno kao srednja vrijednost smičnog naprezanja na krajevima polja.

Tablica 5.2 Provjera strukova nosača na izvijanje po zonama, topologija 4x10x14L

Zona	R_{eH}	a	d	$t_{w,net}$	k_t	$R_{eH}/2\sqrt{3}$	τ_E	τ_C	τ_{max}	τ_{avg}
	N/mm ²	m	m	mm	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
LC	355	2,056	0,90	10	26,2	102,5	600,0	187,5	150,0	8,8
L1	355	2,056	0,90	10	26,2	102,5	600,0	187,5	150,0	5,5
L2	355	2,056	0,90	10	26,2	102,5	600,0	187,5	150,0	26,4
L3	355	2,056	0,90	8	26,2	102,5	384,0	177,6	142,1	67,8
L4	355	2,056	0,90	8	26,2	102,5	384,0	177,6	142,1	123,2
LE	355	2,056	0,90	8	26,2	102,5	384,0	177,6	142,1	52,3
T1	355	1,213	0,90	10	12,6	102,5	288,9	168,6	134,9	74,0
T2	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	81,5
T3	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	47,7
T4	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	41,1
TC1	355	1,213	0,90	12	12,6	102,5	416,0	179,7	143,8	26,0
TC2	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	34,8
TC3	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	35,6
TC4	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	36,2
TE	355	1,213	0,90	8	12,6	102,5	184,9	148,2	118,5	33,8

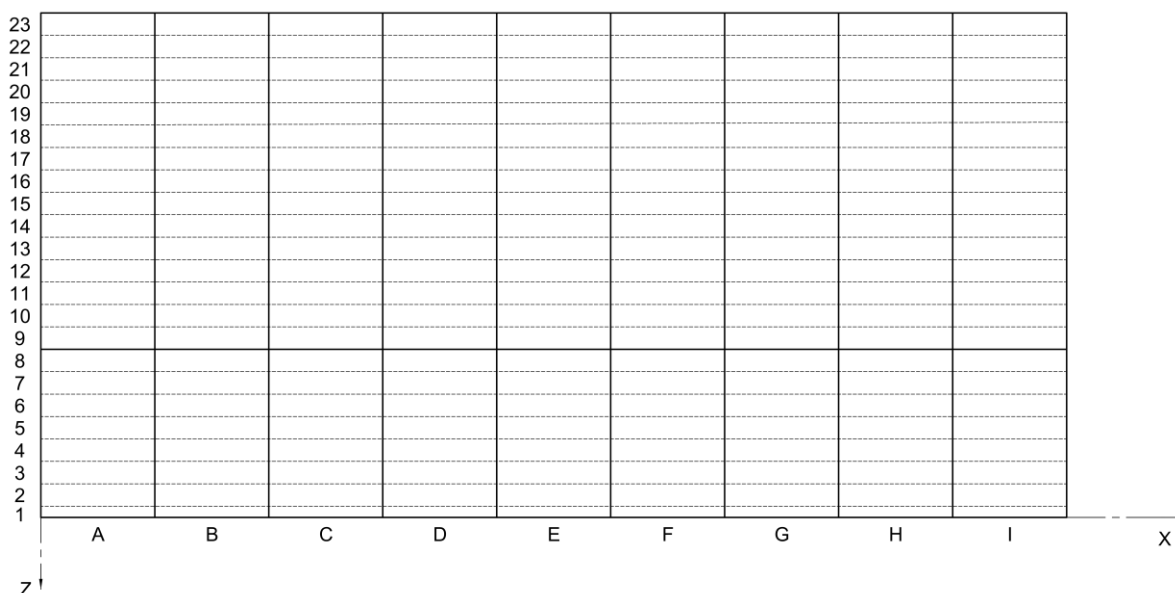
5.4 Izmjena debljine oplata

Oplata je podijeljena prema generiranim neukrepljenim poljima oplata (*evaluation patches*) iz programa MAESTRO.



Slika 5.13 Neukrepljena polja oplata (evaluation patches), topologija 4x10x14L

Redovi polja oplata su označeni brojevima od 1 do 23 po Z osi, a stupci polja su označeni slovima od A do I po X osi. Oplata topologije 4x10x14L je time podijeljena na ukupno 207 polja, redom A1, A2, ... , I23. Svako polje oplata se sastoji od 5 pločastih konačnih elemenata.



Slika 5.14 Oznake polja oplata, topologija 4x10x14L

Svako polje oplata je individualno provjereno na izvijanje, sukladno izrazima u poglavlju 4.4.uz nekoliko izmjena:

- Omjer najvećeg i najmanjeg tlačnog naprezanja okomito na smjer ukrepa za promatrani panel oplata ψ je računat za svako polje
- Duljina kraće stranice panela oplata s_s je određena s obzirom na odabrani broj ukrepa protiv izvijanja N_4 prema izrazu:

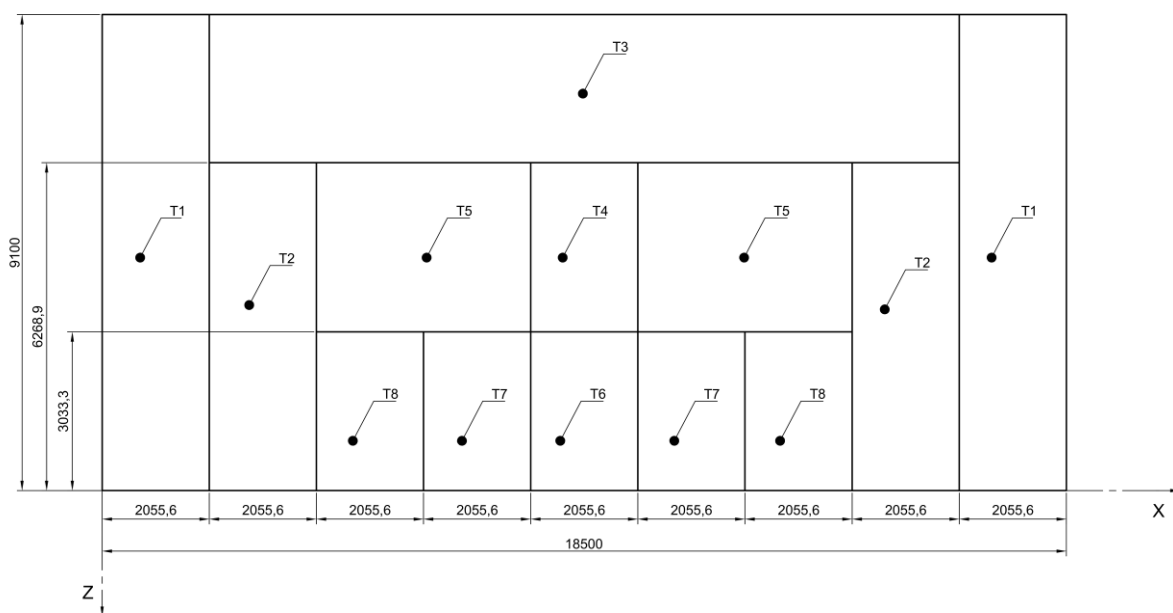
$$s_s = \text{MIN} \left(s_{HP}, \frac{l_{HP}}{N_4 + 1} \right) \quad (5.7)$$

- Duljina duže stranice panela oplata l_s je određena s obzirom na odabrani broj ukrepa protiv izvijanja N_4 prema izrazu:

$$l_s = \text{MAX} \left(s_{HP}, \frac{l_{HP}}{N_4 + 1} \right) \quad (5.8)$$

Referentna naprezanja $\sigma_{x,avg}$ i $\sigma_{y,avg}$ u svakom polju oplata su određena kao srednje vrijednosti tlačnog naprezanje koje se pojavljuju u svakom od 5 *quad* elemenata polja. Budući da poklopac ima uzdužnu i poprečnu os simetrije, na izvijanje su provjereni stupci polja A do E. Ukrepe protiv izvijanja (eng. anti-buckling stiffener) su dodane po potrebi tako da polje oplata dijele na jednake dijelove. Detaljni rezultati analize su dani u Prilogu: Excel tablica, analiza oplata na izvijanje, topologija 4x10x14L.

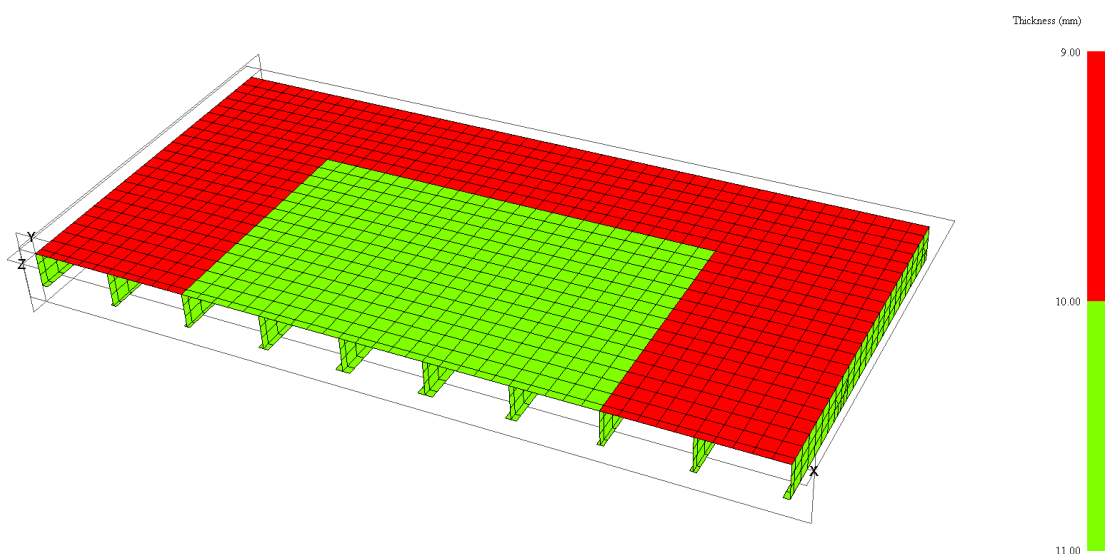
Debljine oplata su izmijenjene prema zonama prikazanim na slici 5.15.



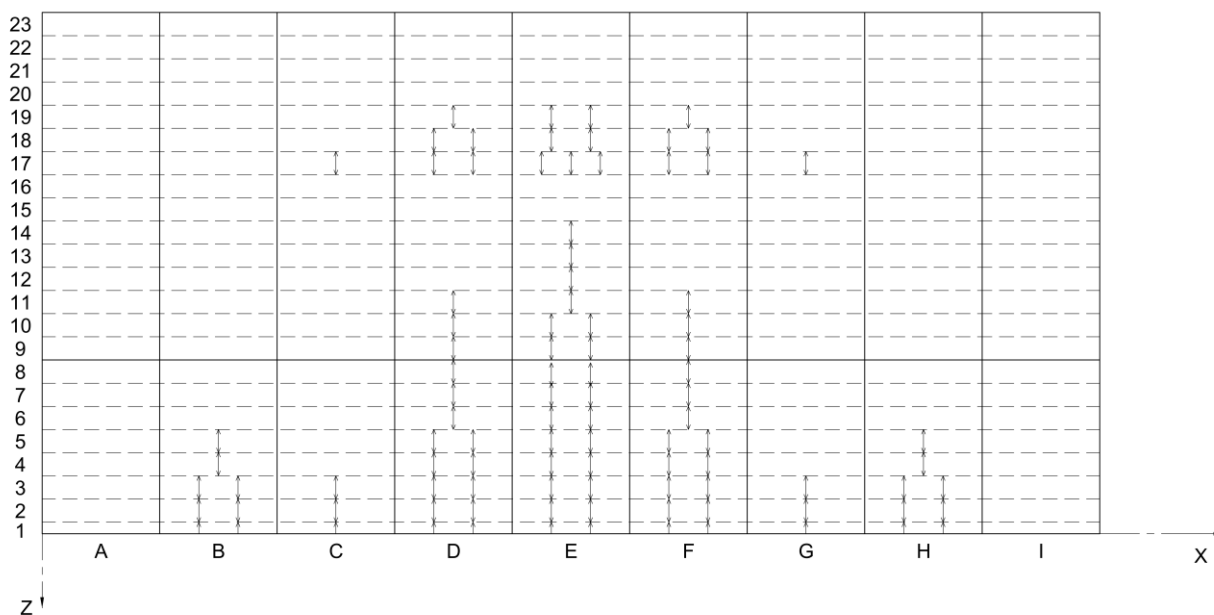
Slika 5.15 Zone oplata, topologija 4x10x14L

Tablica 5.3 Odabrane debljine oplata po zonama, topologija 4x10x14L

Zona	t_{net} [mm]	t [mm]
T1	7	9
T2	7	9
T3	7	9
T4	9	11
T5	9	11
T6	9	11
T7	9	11
T8	9	11



Slika 5.16. Odabrane debljine oplata, topologija 4x10x14L



Slika 5.17 Pozicije ukrepa protiv izvijanja, topologija 4x10x14L

Odabrani profil za ukrepe protiv izvijanja je FB80x8.

5.5 Odabir ukrepa

Osim minimalnog net momenta otpora prema *poglavljju 3.2.3*, ukrepe moraju zadovoljiti kriterije izvijanja prema IACS-CSR *Chapter 9, Section 5, 5.3.4 Critical buckling stress check*.

Tlačno naprezanje σ u prirubnici ukrepe, paralelno smjeru ukrepe mora zadovoljiti sljedeći izraz:

$$\sigma \leq \frac{0,88}{S} \cdot \sigma_{CS} \quad (5.9)$$

gdje je:

σ – Tlačno naprezanje u prirubnici paralelno sa smjerom ukrepa u [N/mm²]

$S=1,1$ - Faktor sigurnosti za lokalno opterećene strukture kao što su poklopci, sukladno *Chapter 6, Section 3*

σ_{CS} – Kritično naprezanje u [N/mm²], računato prema:

$$\sigma_{CS} = \sigma_{ES} \quad \text{za} \quad \sigma_{ES} \leq \frac{R_{eH}}{2} \quad (5.10)$$

$$\sigma_{CS} = R_{eH} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4 \cdot \sigma_{ES}}\right) \quad \text{za} \quad \sigma_{ES} > \frac{R_{eH}}{2} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{ES} = \text{MIN}(\sigma_{E3}, \sigma_{E4}) \quad (5.12)$$

$$\sigma_{E3} = 0,001 \cdot \frac{E \cdot I_a}{A \cdot l_{HP}^2} \quad (5.13)$$

I_a – Moment inercije ukrepe u [cm⁴], uključujući sunosivo opločenje

A – Poprečni presjek ukrepe u [cm²], uključujući sunosivo opločenje

$$\sigma_{E4} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{10^4 \cdot I_p \cdot l_{HP}^2} \cdot \left(m^2 + \frac{K}{m^2}\right) + 0,385 \cdot E \cdot \frac{I_t}{I_p} \quad (5.14)$$

$$K = \frac{C \cdot l_{HP}^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_w} \cdot 10^6 \quad (5.15)$$

m – broj poluvalova prema *Chapter 9, Section 5, 5.3 Ordinary stiffeners, Table 3*

Tablica 5.4 Broj poluvalova

	m	K _{min}	K _{max}
0<K<4	1	0	4
4<K<36	2	4	36
36<K<144	3	36	144
144<K<400	4	144	400

Sektorski moment inercije, u [cm⁶], ukrepe oko spoja sa oplatom

$$I_w = \frac{b_f^3 \cdot h_w^2}{12(b_f + h_w)^2} \cdot [t_f(b_f^2 + 2 \cdot b_f \cdot h_w + 4 \cdot h_w^2) + 3 \cdot t_w \cdot b_f \cdot h_w] 10^{-6} \quad (5.16)$$

Polarni moment inercije, u [cm⁴], ukrepe bez sunosive širine, oko spoja s oplatom:

$$I_p = \left(\frac{h_w^3 \cdot t_w}{3} + h_w^2 \cdot b_f \cdot t_f \right) 10^{-4} \quad (5.17)$$

St Venant-ov moment inercije, u [cm⁴], ukrepe bez prirubnice:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \left[h_w \cdot t_w^3 + b_f \cdot t_f^3 \left(1 - 0,63 \cdot \frac{t_f}{b_f} \right) \right] 10^{-4} \quad (5.18)$$

Krutost opruge oplata poklopca:

$$C = \frac{k_p \cdot E \cdot t_{net}^3}{3 \cdot s_s \cdot \left(1 + \frac{1,33 \cdot k_p \cdot h_w \cdot t_{net}^3}{1000 \cdot s_s \cdot t_w^3} \right)} \quad (5.19)$$

$$k_p = 1 - \eta_p, \text{ gdje je } k_p > 0,1 \quad (5.20)$$

$$\eta_p = \frac{\sigma}{\sigma_{E1}} \quad (5.21)$$

$$\sigma_{E1} = 3,6 \cdot E \cdot \left(\frac{t_{net}}{1000 \cdot s_s} \right)^2 \quad (5.22)$$

Provjereni HP profili za topologiju 4x10x14L prikazani su u tablici 5.5.

Tablica 5.5 Odabir ukrepe za topologiju 4x10x14L

Ukrepa	HP100x8	HP100x7	HP120x6
σ_F [N/mm ²]	202,69	224,41	159,88
σ [N/mm ²]	219,78	215,55	239,70
I_a [cm ⁴]	286,208	260,981	415,228
W_{net} [cm ³]	32,135	28,921	38,831
A_{HP} [cm ²]	9,74	8,74	9,31
Zadovoljava?	DA	NE	DA

Profil HP100x8 zadovoljava kriterij izvijanja i minimalni moment otpora prema pravilima, ali odabran je idući veći profil iz kataloga HP120x6 zbog uštede na masi.

5.6 Usporedba i odabir konačne topologije

Postupak analize i redimenzioniranja strukturnih elemenata topologije 4x10x14L opisan u ovom poglavlju je proveden i za topologiju 5x5x9L. Najpovoljnija topologija prema rezultatima usporedbe se pokazala varijanta 4x10x14L, te su samo za nju u prethodnim poglavljima prikazani odabrani profili nosača, debljine oplata, podjela na zone, itd.

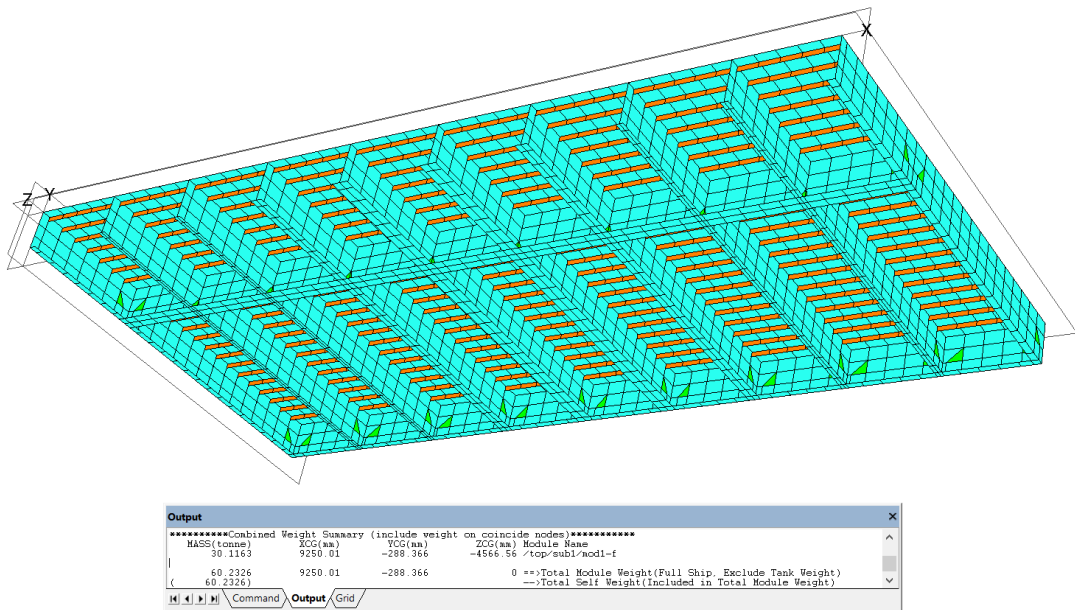
Pregled glavnih karakteristika obje topologije dan je u Tablici 5.6.

Tablica 5.6 Usporedba varijanti 4x10x14L i 5x5x9L

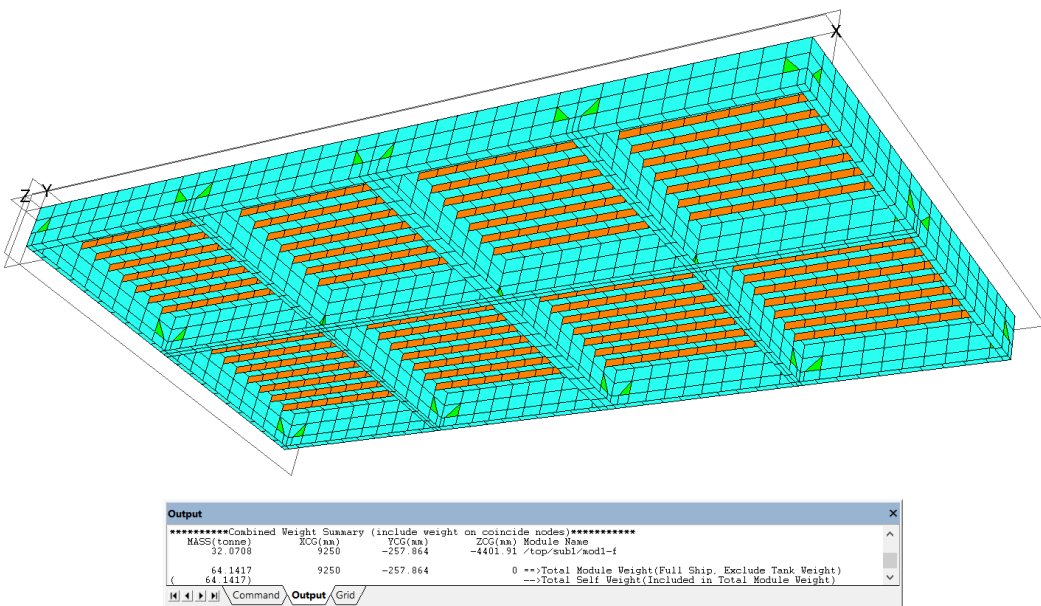
Varijanta	4x10x14L	5x5x9L
Ukrepe	HP120x6	HP200x11
t [mm]	9, 11	9, 10
m_p [kg]	25811	24449
m_{HP} [kg]	5611	14376
$N_{4,uk}$	182	144
m_{ABS}	369,81	329,17
m_{HC} [kg]	60602	64471
m_{HC} [kg/m ²]	179,99	191,48

Očitanoj masi iz programa MAESTRO dodana je proračunata ukupna masa svih ukrepa protiv izvijanja m_{ABS} , kako bi se odredila konačna ukupna masa poklopca m_{HC} .

Prema tablici 5.6 je vidljivo kako je oplata topologije 5x5x9 također podijeljena na zone oplata sa dvije različite debljine. Zbog odabira većeg profila ukrepa (HP200x11) sukladno kriteriju izvijanja, bilo je moguće odabrati nešto manju debljinu lima t za centralnu zonu poklopca, uz sličan ukupan broj svih ukrepa protiv izvijanja $N_{4,uk}$ kao i za topologiju 4x10x14L. Time je masa oplata m_p topologije 5x5x9L ispala manja, ali zajednička masa oplata i svih ukrepa je manja kod topologije 4x10x14L.



Slika 5.18 Masa poklopca, topologija 4x10x14L



Slika 5.19 Masa poklopca, topologija 5x5x9L

Konačnim odabirom topologije 4x10x14L je ostvarena ušteda mase od 3868kg, u odnosu na topologiju 5x5x9L. Za ovu odabranu topologiju poklopca je izrađena tehnička dokumentacija koja se nalazi u Prilogu.

6. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad provedeno je projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca na poziciji oko glavnog rebra broda za prijevoz rasutog tereta (nosivosti oko 300 000 DWT) prema zajedničkim Pravilima *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers*, July 2012. Osim racionalnog dimenzioniranja svih konstrukcijskih elemenata provedeno je istraživanje najpovoljnije topologije s obzirom na broj jakih poprečnih i uzdužnih nosača i broj ukrepa. Projektiranje je provedeno u nekoliko faza koristeći MKE modele različite složenosti.

Konačno odabrana topologija poklopca 4x10x14L zadovoljava sve projektne kriterije i predstavlja najbolje od svih razmatranih topoloških rješenja s obzirom na masu. Vrlo je teško odrediti stvarni optimalni raspored nosača bez automatske generacije, analize i usporedbe velikog broja različitih varijanti topologija. U ovom radu je napravljena usporedba tek desetak mogućih varijanti rasporeda konstrukcijskih elemenata grotlenog poklopca. S obzirom na broj ulaznih varijabli i ograničenja, stvaran broj mogućih varijanti mnogo je veći. Stoga je na ovoj razini projektiranja od izuzetne važnosti primijeniti racionalni inženjerski pristup rješavanju problema u okviru predviđenog projektnog vremena.

Metoda usporedbe modela sa grubom mrežom konačnih elemenata u preliminarnoj fazi se pokazala dovoljno dobra za sortiranje varijanti topologija po ukupnoj masi poklopca, ali nije do kraja vjerno pokazala stvarnu razliku između ukupnih masa različitih topologija poklopca. Tek izradom modela sa finom mrežom konačnih elemenata je bilo moguće dimenzionirati svaki jaki T nosač zasebno, te podijeliti iste na različite zone debljina struka, širina prirubnica, itd. i provesti detaljni proračun izvijanja svakog orebrenog dijela konstrukcije.

Prema rezultatima usporedbe varijanti može se zaključiti da optimalno rješenje topologije s obzirom na minimalnu masu teži varijantama sa manjim brojem jakih nosača i većim brojem ukrepa u jednom smjeru, te većim brojem jakih nosača u drugom smjeru. Time se smanjuje nepoduprti raspon ukrepa, što smanjuje njihove dimenzije. Manji nepoduprti raspon ukrepa u kombinaciji sa manjim razmakom ukrepa smanjuje površinu elementarnog panela oplata, što ima pozitivan efekt s obzirom na kriterij izvijanja oplata. Ovo omogućuje odabir manje debljine oplata, koja ima najveći doprinos ukupnoj masi konstrukcije. Veći broj jakih nosača smanjuje kraću stranicu elementarnog panela i vodi odabiru nosača manjih dimenzija, što je vidljivo i u izrazu za moment otpora nosača prema pravilima.

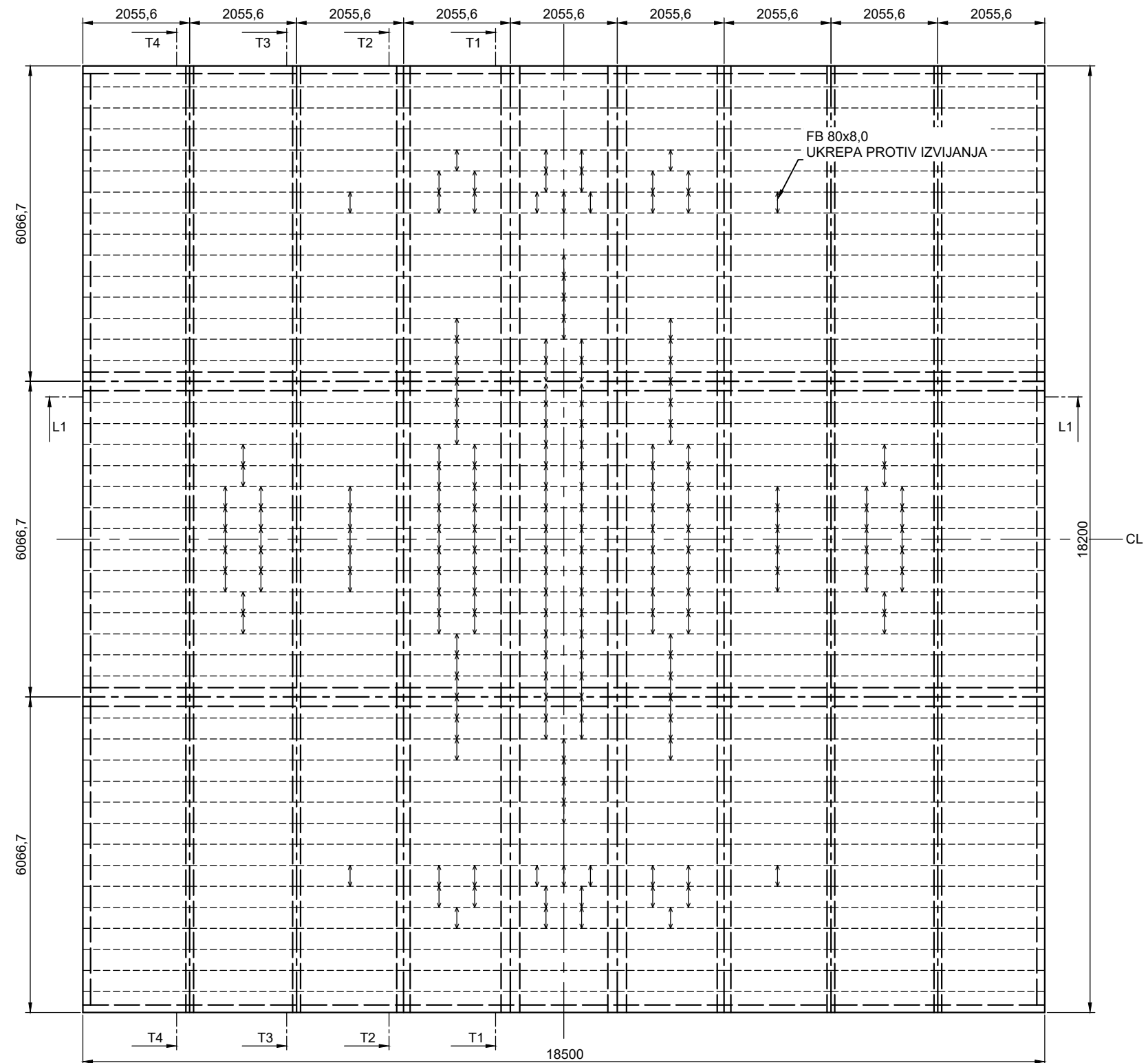
Daljnja optimizacija strukture je moguća uvođenjem jakih nosača sa varijabilnim poprečnim presjekom, zamjenom HP profila sa HAT profilima i postepenim smanjivanjem visina strukova jakih nosača prema rubovima poklopca, ali to nije provedeno u okviru ovog završnog rada.

LITERATURA


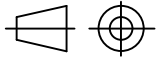
- [1] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers, July, 2012.
- [2] United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2019, United Nations, Geneva 2019.
- [3] Žiha, K., Digitalni udžbenik iz Konstrukcije broda.
- [4] MacGregor, Cargo Handling Book, MacGregor, 2016.
- [5] Andrić, J., "Metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [6] Lloyd's Register, Assesment of Steel Hatch Covers Using Finite Element Analysis, July 2007.
- [7] Zamarin, A., Jelovica, J, Hadjina, M., Optimizacija strukture s više funkcija cilja – pregled postojećih metoda genetskog algoritma, 2009.
- [8] MAESTRO, Version 11.13.1, Program documentation, Proteus engineering, Stevensville, MD, USA.

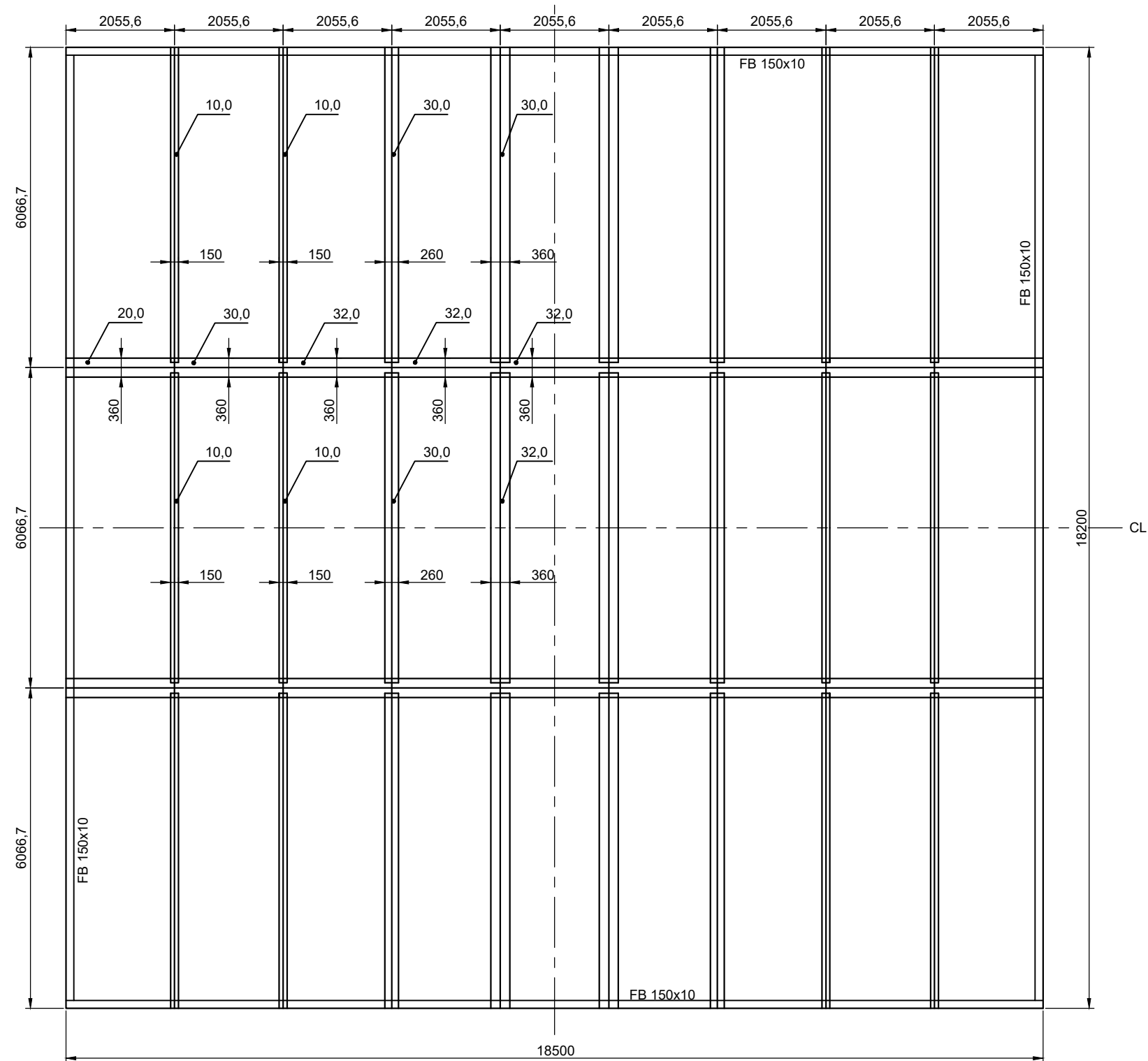
PRILOZI

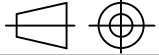
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija
- III. Excel tablica, analiza oplata na izvijanje, topologija 4x10x14L

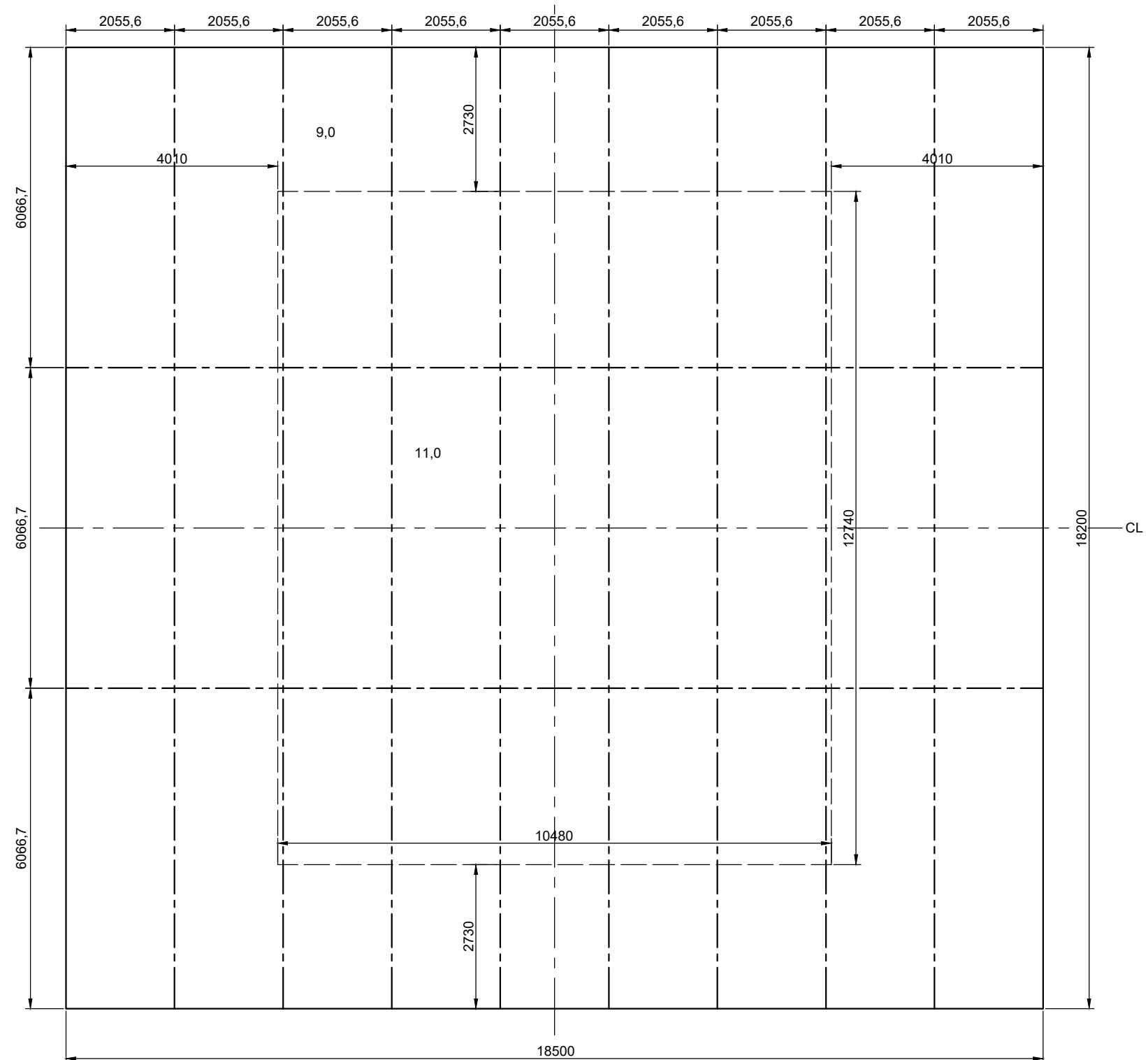



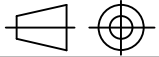

- NAPOMENE
1. UKREPE: HP120x6,0
 2. RAZMAK UKREPA: 404,4mm
 3. UKREPE PROTIV IZVIJANJA: FB80x8
 4. UKREPE PROTIV IZVIJANJA SE POSTAVLJAJU SIMETRIČNO IZMEĐU JAKIH POPREČNIH NOSAČA

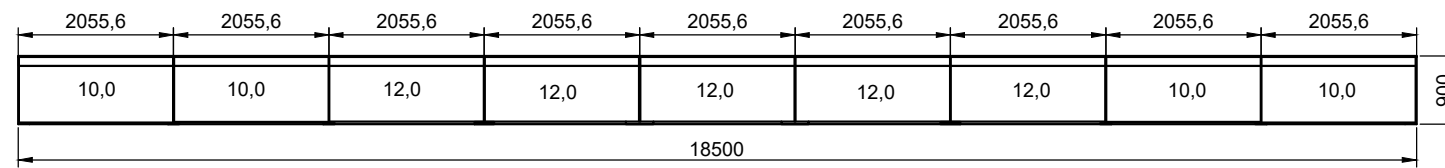
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Razradio				
Crtao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt:		Grotleni poklopac		Objekt broj: 1
				R. N. broj: 1
Napomena:				Kopija
Materijal: AH36		Masa: 60,6t		
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo:		Nacrt poklopca		Format: A3
1:100		Crtež broj: 1		Listova: 4
				List: 1



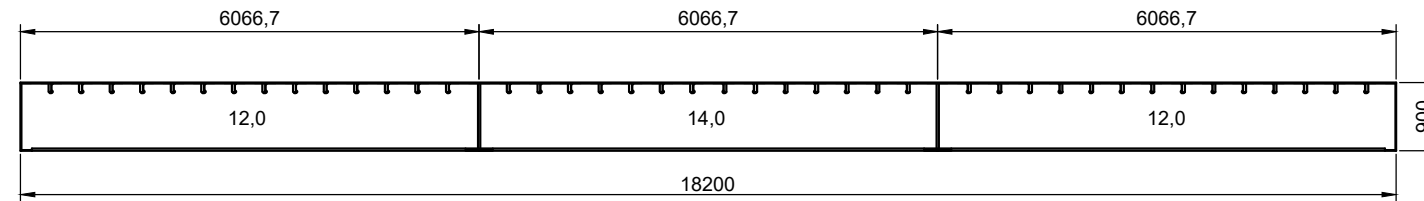
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Razradio				
Crtao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt:		Grotleni poklopac		Objekt broj: 1
				R. N. broj: 1
Napomena:				Kopija
Materijal: AH36		Masa: 60,6t		
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo:		Prirubnice jakih nosača		Format: A3
1:100		Crtež broj: 2		Listova: 4
				List: 2



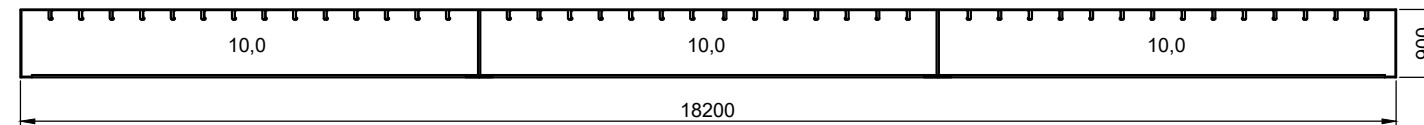
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Razradio				
Crtao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt:		Grotleni poklopac		Objekt broj: 1
				R. N. broj: 1
Napomena:				Kopija
Materijal: AH36		Masa: 60,6t		
 	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
Mjerilo:	Debljine limova			Listova: 4
1:100	Crtež broj: 3			List: 3



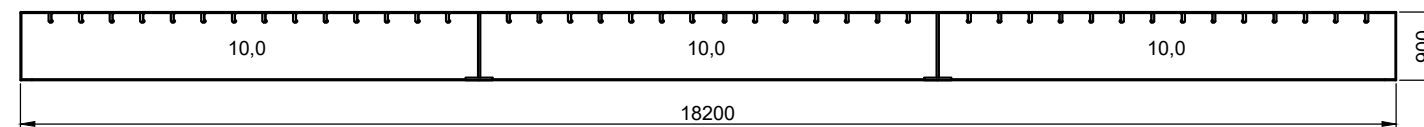
L1 - L1



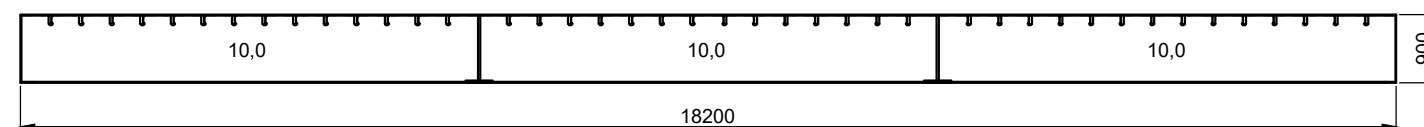
T1 - T1



T2 - T2


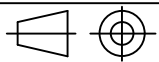


T3 - T3



T4 - T4

NAPOMENE
 1. UKREPE: HP120x6,0
 2. RAZMAK UKREPA: 404,4mm

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Razradio				
Crtao	16.9.2021.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt:		Grotleni poklopac		Objekt broj: 1
				R. N. broj: 1
Napomena:				Kopija
Materijal: AH36		Masa: 60,6t		
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo:		Strukovi nosača		Format: A3
1:100		Crtež broj: 4		Listova: 4
				List: 4

Zona oplata	Polje	$\sigma_{x,avg}$	$\sigma_{y,avg}$	ψ	ReH	N_4	l_s	s_s	l_{net}	c	m	σ_{E1}	σ_{E2}	σ_{C1}	σ_{C2}	$\sigma_{x,max}$	$\sigma_{y,max}$	Zadovoljava?
		N/mm ²	N/mm ²	-	N/mm ²	-	m	m	mm	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	DA/NE
T1	A1	12,59	40,65	0,19	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,109	222,15	117,12	213,18	117,12	170,54	93,69	DA
	A2	12,95	40,50	0,20	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,094	222,15	116,29	213,18	116,29	170,54	93,03	DA
	A3	14,29	40,41	0,23	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,045	222,15	113,59	213,18	113,59	170,54	90,87	DA
	A4	16,68	40,29	0,29	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,951	222,15	108,35	213,18	108,35	170,54	86,68	DA
	A5	20,33	40,06	0,41	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,798	222,15	99,87	213,18	99,87	170,54	79,89	DA
	A6	25,48	39,54	0,63	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,569	222,15	87,14	213,18	87,14	170,54	69,71	DA
	A7	32,64	38,65	0,86	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,389	222,15	77,15	213,18	77,15	170,54	61,72	DA
	A8	43,98	39,39	0,27	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,978	222,15	109,87	213,18	109,87	170,54	87,90	DA
	A9	44,00	39,05	0,25	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,009	222,15	111,58	213,18	111,58	170,54	89,27	DA
	A10	32,59	37,49	0,73	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,489	222,15	82,68	213,18	82,68	170,54	66,15	DA
	A11	25,14	37,32	0,80	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,434	222,15	79,63	213,18	79,63	170,54	63,71	DA
	A12	19,56	36,60	0,55	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,648	222,15	91,53	213,18	91,53	170,54	73,22	DA
	A13	15,36	35,45	0,42	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,793	222,15	99,58	213,18	99,58	170,54	79,67	DA
	A14	12,28	34,05	0,34	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,884	222,15	104,63	213,18	104,63	170,54	83,71	DA
	A15	10,03	32,39	0,30	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,936	222,15	107,49	213,18	107,49	170,54	86,00	DA
	A16	8,38	30,38	0,29	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,962	222,15	108,99	213,18	108,99	170,54	87,19	DA
	A17	7,15	27,94	0,28	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,975	222,15	109,69	213,18	109,69	170,54	87,75	DA
	A18	6,17	25,00	0,27	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,981	222,15	110,04	213,18	110,04	170,54	88,03	DA
	A19	5,29	21,51	0,27	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,988	222,15	110,41	213,18	110,41	170,54	88,33	DA
	A20	4,35	17,43	0,26	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,005	222,15	111,34	213,18	111,34	170,54	89,07	DA
	A21	3,19	12,70	0,23	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,047	222,15	113,68	213,18	113,68	170,54	90,95	DA
	A22	1,64	7,43	0,18	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,124	222,15	117,98	213,18	117,98	170,54	94,38	DA
	A23	6,94	2,32	0,08	355	0	2,056	0,404	7	1,20	2,303	222,15	127,89	213,18	127,89	170,54	102,31	DA
T2	B1	37,82	83,60	0,78	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,184	222,15	121,27	213,18	121,27	170,54	97,02	DA
	B2	38,44	82,59	0,78	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,188	222,15	121,53	213,18	121,53	170,54	97,23	DA
	B3	40,94	80,26	0,77	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,198	222,15	122,08	213,18	122,08	170,54	97,66	DA
	B4	45,17	76,28	0,75	355	1	1,028	0,404	7	1,15	1,740	222,15	96,62	213,18	96,62	170,54	77,29	DA
	B5	51,21	70,52	0,72	355	1	1,028	0,404	7	1,15	1,767	222,15	98,16	213,18	98,16	170,54	78,53	DA
	B6	59,18	62,81	0,67	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,534	222,15	85,22	213,18	85,22	170,54	68,17	DA
	B7	69,13	52,96	0,58	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,614	222,15	89,66	213,18	89,66	170,54	71,73	DA
	B8	81,29	41,85	0,41	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,796	222,15	99,75	213,18	99,75	170,54	79,80	DA
	B9	80,90	39,78	0,40	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,808	222,15	100,41	213,18	100,41	170,54	80,33	DA
	B10	67,94	46,76	0,58	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,618	222,15	89,84	213,18	89,84	170,54	71,87	DA
	B11	57,02	52,51	0,68	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,524	222,15	84,63	213,18	84,63	170,54	67,71	DA
	B12	47,80	56,18	0,75	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,468	222,15	81,53	213,18	81,53	170,54	65,22	DA
	B13	40,11	58,01	0,80	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,432	222,15	79,51	213,18	79,51	170,54	63,61	DA
	B14	33,71	58,26	0,83	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,408	222,15	78,19	213,18	78,19	170,54	62,55	DA
	B15	28,37	57,11	0,85	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,395	222,15	77,47	213,18	77,47	170,54	61,98	DA
B16	23,91	54,73	0,86	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,390	222,15	77,22	213,18	77,22	170,54	61,78	DA	
T3	B17	20,99	51,32	0,83	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,411	222,15	78,37	213,18	78,37	170,54	62,70	DA
	B18	18,80	46,27	0,81	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,421	222,15	78,93	213,18	78,93	170,54	63,14	DA
	B19	16,64	39,96	0,80	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,431	222,15	79,47	213,18	79,47	170,54	63,58	DA
	B20	14,25	32,48	0,78	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,447	222,15	80,37	213,18	80,37	170,54	64,30	DA
	B21	11,43	23,87	0,73	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,484	222,15	82,43	213,18	82,43	170,54	65,95	DA
	B22	7,89	14,22	0,63	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,570	222,15	87,18	213,18	87,18	170,54	69,74	DA
	B23	6,49	4,61	0,39	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,822	222,15	101,21	213,18	101,21	170,54	80,97	DA

Zona oplate	Polje	$\sigma_{x,avg}$	$\sigma_{y,avg}$	ψ	ReH	N_4	l_s	s_s	l_{net}	c	m	σ_{E1}	σ_{E2}	σ_{C1}	σ_{C2}	$\sigma_{x,max}$	$\sigma_{y,max}$	Zadovoljava?
		N/mm ²	N/mm ²	-	N/mm ²	-	m	m	mm	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	DA/NE
T8	C1	42,07	106,75	0,83	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,670	367,23	153,35	269,21	153,35	215,36	122,68	DA
	C2	42,41	105,99	0,83	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,672	367,23	153,52	269,21	153,52	215,36	122,82	DA
	C3	43,85	104,18	0,82	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,680	367,23	154,20	269,21	154,20	215,36	123,36	DA
	C4	46,23	101,17	0,80	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,429	367,23	131,16	269,21	131,16	215,36	104,93	DA
	C5	49,57	96,88	0,78	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,446	367,23	132,72	269,21	132,72	215,36	106,17	DA
	C6	53,87	91,23	0,75	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,471	367,23	135,02	269,21	135,02	215,36	108,02	DA
	C7	59,11	83,97	0,70	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,513	367,23	138,88	269,21	138,88	215,36	111,10	DA
	C8	65,53	75,67	0,61	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,587	367,23	145,70	269,21	145,70	215,36	116,56	DA
T5	C9	65,15	72,72	0,60	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,595	367,23	146,45	269,21	146,45	215,36	117,16	DA
	C10	57,95	75,14	0,68	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,527	367,23	140,22	269,21	140,22	215,36	112,17	DA
	C11	51,80	76,53	0,73	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,486	367,23	136,47	269,21	136,47	215,36	109,17	DA
	C12	46,41	76,32	0,76	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,461	367,23	134,15	269,21	134,15	215,36	107,32	DA
	C13	41,71	74,74	0,78	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,444	367,23	132,57	269,21	132,57	215,36	106,06	DA
	C14	37,60	71,94	0,80	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,434	367,23	131,65	269,21	131,65	215,36	105,32	DA
	C15	33,90	67,89	0,80	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,433	367,23	131,60	269,21	131,60	215,36	105,28	DA
	C16	30,40	62,59	0,78	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,445	367,23	132,69	269,21	132,69	215,36	106,16	DA
T3	C17	32,39	71,60	0,77	355	1	1,028	0,404	7	1,15	1,722	222,15	95,66	213,18	95,66	170,54	76,52	DA
	C18	30,43	62,90	0,78	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,445	222,15	80,26	213,18	80,26	170,54	64,21	DA
	C19	28,38	53,41	0,78	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,445	222,15	80,23	213,18	80,23	170,54	64,18	DA
	C20	26,19	42,94	0,76	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,461	222,15	81,14	213,18	81,14	170,54	64,91	DA
	C21	23,72	31,36	0,72	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,495	222,15	83,02	213,18	83,02	170,54	66,42	DA
	C22	20,80	18,68	0,62	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,581	222,15	87,82	213,18	87,82	170,54	70,25	DA
	C23	17,61	6,23	0,31	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,925	222,15	106,90	213,18	106,90	170,54	85,52	DA
T7	D1	43,82	128,89	0,90	355	2	0,685	0,404	9	1,08	2,055	367,23	188,62	269,21	187,97	215,36	150,37	DA
	D2	43,98	128,36	0,90	355	2	0,685	0,404	9	1,08	2,057	367,23	188,81	269,21	188,13	215,36	150,50	DA
	D3	44,63	127,22	0,89	355	2	0,685	0,404	9	1,08	2,061	367,23	189,17	269,21	188,45	215,36	150,76	DA
	D4	45,68	125,34	0,89	355	2	0,685	0,404	9	1,08	2,068	367,23	189,82	269,21	189,02	215,36	151,21	DA
	D5	47,05	122,69	0,88	355	2	0,685	0,404	9	1,08	2,078	367,23	190,80	269,21	189,88	215,36	151,90	DA
	D6	48,63	119,14	0,86	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,642	367,23	150,78	269,21	150,78	215,36	120,63	DA
	D7	50,22	114,50	0,84	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,659	367,23	152,34	269,21	152,34	215,36	121,87	DA
	D8	51,85	109,35	0,81	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,687	367,23	154,92	269,21	154,92	215,36	123,94	DA
T5	D9	51,66	106,48	0,79	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,704	367,23	156,42	269,21	156,42	215,36	125,13	DA
	D10	49,36	105,06	0,82	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,677	367,23	153,99	269,21	153,99	215,36	123,19	DA
	D11	47,03	102,98	0,84	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,659	367,23	152,32	269,21	152,32	215,36	121,86	DA
	D12	44,69	99,78	0,86	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,390	367,23	127,63	269,21	127,63	215,36	102,10	DA
	D13	42,50	95,62	0,87	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,383	367,23	126,93	269,21	126,93	215,36	101,55	DA
	D14	40,61	90,61	0,87	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,377	367,23	126,44	269,21	126,44	215,36	101,16	DA
	D15	39,08	84,65	0,87	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,382	367,23	126,92	269,21	126,92	215,36	101,53	DA
	D16	37,96	77,61	0,85	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,398	367,23	128,31	269,21	128,31	215,36	102,65	DA
T3	D17	42,16	88,84	0,87	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,088	222,15	115,95	213,18	115,95	170,54	92,76	DA
	D18	39,74	78,12	0,88	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,076	222,15	115,30	213,18	115,30	170,54	92,24	DA
	D19	38,01	66,47	0,87	355	1	1,028	0,404	7	1,15	1,633	222,15	90,68	213,18	90,68	170,54	72,55	DA
	D20	36,90	53,64	0,85	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,392	222,15	77,28	213,18	77,28	170,54	61,83	DA
	D21	36,35	39,41	0,81	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,425	222,15	79,16	213,18	79,16	170,54	63,33	DA
	D22	36,37	23,66	0,68	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,526	222,15	84,73	213,18	84,73	170,54	67,78	DA
	D23	37,57	8,15	0,32	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,919	222,15	106,59	213,18	106,59	170,54	85,27	DA

Zona oplate	Polje	$\sigma_{x,avg}$	$\sigma_{y,avg}$	ψ	ReH	N_4	l_s	s_s	l_{net}	c	m	σ_{E1}	σ_{E2}	σ_{C1}	σ_{C2}	$\sigma_{x,max}$	$\sigma_{y,max}$	Zadovoljava?
		N/mm ²	N/mm ²	-	N/mm ²	-	m	m	mm	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	DA/NE
T6	E1	43,09	137,91	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,970	367,23	180,89	269,21	180,83	215,36	144,66	DA
	E2	43,18	137,50	0,99	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,969	367,23	180,72	269,21	180,67	215,36	144,53	DA
	E3	43,50	136,63	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,969	367,23	180,80	269,21	180,74	215,36	144,59	DA
	E4	43,99	135,20	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,971	367,23	180,98	269,21	180,91	215,36	144,73	DA
	E5	44,57	133,20	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,974	367,23	181,21	269,21	181,14	215,36	144,91	DA
	E6	45,05	130,49	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,973	367,23	181,09	269,21	181,02	215,36	144,82	DA
	E7	45,23	126,87	1,00	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,959	367,23	179,82	269,21	179,79	215,36	143,83	DA
	E8	45,12	122,94	0,99	355	2	0,685	0,404	9	1,15	2,102	367,23	192,94	269,21	191,71	215,36	153,36	DA
T4	E9	45,10	120,39	0,99	355	2	0,685	0,404	9	1,15	2,099	367,23	192,67	269,21	191,47	215,36	153,18	DA
	E10	44,63	117,55	0,98	355	2	0,685	0,404	9	1,08	1,971	367,23	180,97	269,21	180,90	215,36	144,72	DA
	E11	43,84	114,11	0,97	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,555	367,23	142,78	269,21	142,78	215,36	114,22	DA
	E12	42,80	109,67	0,97	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,557	367,23	142,94	269,21	142,94	215,36	114,35	DA
	E13	41,76	104,41	0,97	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,558	367,23	143,04	269,21	143,04	215,36	114,43	DA
	E14	40,91	98,41	0,96	355	1	1,028	0,404	9	1,15	1,564	367,23	143,61	269,21	143,61	215,36	114,89	DA
	E15	40,36	91,53	0,94	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,333	367,23	122,40	269,21	122,40	215,36	97,92	DA
	E16	40,19	83,61	0,91	355	0	2,056	0,404	9	1,20	1,351	367,23	123,99	269,21	123,99	215,36	99,19	DA
T3	E17	45,38	95,43	0,93	355	3	0,514	0,404	7	1,08	2,914	222,15	161,85	213,18	161,85	170,54	129,48	DA
	E18	43,17	83,84	0,94	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,011	222,15	111,66	213,18	111,66	170,54	89,33	DA
	E19	41,81	71,32	0,94	355	2	0,685	0,404	7	1,08	2,015	222,15	111,88	213,18	111,88	170,54	89,51	DA
	E20	41,30	57,60	0,91	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,351	222,15	75,01	213,18	75,01	170,54	60,01	DA
	E21	41,60	42,35	0,86	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,387	222,15	77,01	213,18	77,01	170,54	61,60	DA
	E22	42,78	25,41	0,73	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,487	222,15	82,59	213,18	82,59	170,54	66,07	DA
	E23	45,52	8,81	0,34	355	0	2,056	0,404	7	1,20	1,891	222,15	105,00	213,18	105,00	170,54	84,00	DA