

Automatizirana priprema modela za analizu odziva grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta metodom konačnih elemenata

Kos, Gordan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:940868>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Gordan Kos

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Pero Prebeg, dipl. ing.

Student:

Gordan Kos

Zagreb, 2022.

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

Ponajprije se zahvaljujem mentoru, prof. Peri Prebegu na nebrojenim satima provedenim na konzultacijama, svom prenesenom znanju i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Prof. Jerolimu Andriću se zahvaljujem na svim savjetima, ustupljenim primjerima izvedenih konstrukcija i odgovorima na sva pitanja vezana za konstrukcijske detalje.

Zahvaljujem se ravnatelju Hrvatskog registra brodova, Damiru Roji na ukazanom povjerenju i dodijeljenoj stipendiji HRB-a, bez koje se ne bih mogao u potpunosti posvetiti diplomskom studiju.

Hvala kolegi Tomislavu Pavloviću na pomoći sa optimizacijom programskog koda korištenjem biblioteke NumPy i uloženom trudu u razvoj vizualizatora d3v-sgd koji je korišten za prikaz modela konstrukcije u okviru ovog rada.

Gordan Kos



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Gordan Kos**

JMBAG: 0035201460

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Automatizirana priprema modela za analizu odziva grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta metodom konačnih elemenata**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Automatic preparation of finite element analysis model for analysis of a bulk carrier hatch cover**

Opis zadatka:

Pri projektiranju brodske konstrukcije neophodno je provesti analizu odziva metodom primjerene točnosti. U tu svrhu, sve više se koristi metoda konačnih elemenata. Program otvorenog koda d3v-sgd (Design visualizer for Ship grillage design) omogućuje pojednostavljeno, fleksibilno modeliranje konstrukcije grotlenog poklopca te njegovu trodimenzijsku vizualizaciju. U radu je potrebno, proširenjem funkcionalnosti programa otvorenog koda d3v-sgd u programskom jeziku Python, izraditi modul za automatiziranu pripremu modela za analizu odziva poklopca broda za rasuti teret metodom konačnih elemenata (MKE). Primjenom modula za automatiziranu pripremu MKE modela potrebno je automatizirati izradu modela za program OOFEM, koji omogućuje analizu odziva metodom konačnih elemenata.

Zadatak obuhvaća sljedeće:

- upoznavanje s trenutnom verzijom programa otvorenog koda d3v-sgd, koja omogućuje pojednostavljeno, fleksibilno modeliranje konstrukcije poklopca te njegovu trodimenzijsku vizualizaciju
- upoznavanje s pravilima za projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca prema *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers*, July 2012 (IACS, 2012)
- izradu algoritma za diskretizaciju konstrukcije grotlenog poklopca konačnim elementima, u skladu s IACS, 2012
- implementaciju Python modula za automatiziranu pripremu MKE modela, prema prethodno izrađenom algoritmu za diskretizaciju konstrukcije grotlenog poklopca konačnim elementima
- primjenu implementiranog modula za automatsku izradu više različitih varijanti konstrukcije grotlenih poklopaca, s tim da se izrađene varijante moraju razlikovati po broju jakih uzdužnih nosača, broju jakih poprečnih nosača, dimenzijama jakih uzdužnih i poprečnih nosača, broju ukrepa te orijentaciji ukrepa
- izradu grafičkog sučelja u okviru programa otvorenog koda d3v-sgd koje omogućuje promjenu karakteristika diskretiziranog modela te odabir različitih vrsta konačnih elemenata.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

29. rujna 2022.

1. prosinca 2022.

12. – 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Pero Prebeg

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
2. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE ROŠTILJA	2
2.1 Model konstrukcije poklopca broda za prijevoz rasutog tereta.....	2
2.2 Struktura klasa modula za definiciju modela roštiljne konstrukcije.....	3
2.3 Karakteristike poprečnog presjeka jakih nosača i ukrepa	4
2.3.1 T profil.....	4
2.3.2 Hat profil	5
2.3.3 HP profil.....	7
2.4 Jaki nosač.....	8
2.5 Segment jakog nosača	9
2.6 Raspored ukrepa	11
2.7 Zona oplate	12
2.8 Elementarni panel oplate	13
2.9 Roštiljna konstrukcija.....	15
3. MODUL ZA IZRADU MREŽE KONAČNIH ELEMENATA	16
3.1 Struktura klasa modula za izradu mreže konačnih elemenata.....	18
3.2 Karakteristike i ograničenja varijanti mreža konačnih elemenata.....	19
3.2.1 Varijanta mreže V1	19
3.2.2 Varijanta mreže V2	21
4. IZRADA MKE MODELA SIMETRIČNE KONSTRUKCIJE	23
4.1 Algoritam za prepoznavanje osi simetrija modela	23

4.2	Algoritam za provjeru izvedivosti mreže	25
5.	INICIJALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA MREŽE KONAČNIH ELEMENATA	26
5.1	Algoritmi za identifikaciju zona oplata s obzirom na osi simetrije	27
5.2	Algoritmi za identifikaciju jakih nosača s obzirom na osi simetrije	32
5.3	Algoritmi za identifikaciju segmenata s obzirom na osi simetrije	32
5.4	Algoritmi za prepoznavanje položaja osi simetrije	34
5.4.1	Jaki nosač na osi simetrije	34
5.4.2	Ukrepa na osi simetrije	35
5.4.3	Os simetrije između ukrepa	36
6.	ODREĐIVANJE DIMENZIJA KONAČNIH ELEMENATA	37
6.1	Kontrola mreže	38
6.2	Osnovna mreža konačnih elemenata	39
6.2.1	Dimenzije elemenata oplata prema kriteriju razmaka ukrepa	40
6.2.2	Maksimalne dimenzije elemenata približnica prema aspektnom odnosu	42
6.2.3	Lokalno razmatranje i profinjenje osnovnih dimenzija mreže	45
6.2.4	Globalno razmatranje i odabir osnovnih dimenzija mreže	51
6.3	Prijelazna mreža konačnih elemenata	53
6.3.1	Prijelazni elementi varijante mreže V1	53
6.3.2	Prijelazni elementi varijante mreže V2	56
6.3.3	Globalno razmatranje dimenzija prijelaznih elemenata oplata	60
6.4	Broj konačnih elemenata	61
6.5	Razmaci između rubnih čvorova	62
7.	IZRADA MREŽE KONAČNIH ELEMENATA	64
7.1	Izrada mreže oplata	66
7.1.1	Čvorovi zone oplata	66
7.1.2	Konačni elementi opločenja	69
7.1.3	Konačni elementi ukrepa	71
7.2	Izrada konačnih elemenata jakih nosača	72

7.2.1	Čvorovi struka segmenta za varijantu mreže V1	72
7.2.2	Čvorovi struka segmenta za varijantu mreže V2	74
7.2.3	Čvorovi prirubnice segmenta za varijantu mreže V1	77
7.2.4	Čvorovi prirubnice segmenta za varijantu mreže V2.....	79
7.2.5	Elementi struka segmenta za varijantu mreže V1	81
7.2.6	Elementi struka segmenta za varijantu mreže V2	81
7.2.7	Elementi prirubnice segmenta.....	82
7.3	Spajanje mreže konačnih elemenata.....	83
7.3.1	Algoritam za ispravak preklapanja čvorova.....	83
7.3.2	Algoritam za ispravak preklapanja elemenata	86
8.	RUBNI UVJETI I OPTEREĆENJA.....	89
8.1	Rubni uvjeti na krajevima jakih nosača.....	89
8.2	Rubni uvjeti simetrije	90
8.3	Opterećenje tlakom.....	92
8.4	Opterećenje vlastitom težinom	92
9.	PRIMJENA MODULA ZA AUTOMATIZIRANU PRIPREMU MKE MODELA GROTLENOŠ POKLOPCA	93
9.1	Ispitne varijante konstrukcija.....	93
9.2	Proračun odziva konstrukcije primjenom generiranih MKE modela.....	95
9.3	Validacija rezultata	98
10.	ZAKLJUČAK	100
	LITERATURA.....	103
	PRILOZI.....	104

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Podizni grotleni poklopac [5].....	2
Slika 2.2 Poprečni presjek T profila.....	4
Slika 2.3 Poprečni presjek Hat profila	5
Slika 2.4 Dimenzije ekvivalentnog L profila [7].....	7
Slika 2.5 Identifikacijski brojevi i relativne koordinate jakih nosača	8
Slika 2.6 Identifikacijski brojevi segmenata jakih nosača	9
Slika 2.7 Definicija segmenta i referentnih točaka	10
Slika 2.8 Referentni rubovi i čvorovi za postavljanje ukrepa	11
Slika 2.9 Numeracija zona oplata i rubni segmenti.....	12
Slika 2.10 Numeracija elementarnih panela oplata	13
Slika 2.11 Sustav označavanja rubnih nosača elementarnog panela.....	13
Slika 3.1 Glavni prozor programa d3v-sgd	16
Slika 3.2 Korisničko sučelje za izradu mreže konačnih elemenata.....	17
Slika 3.3 Koncept varijante mreže VI, jedan element po širini prirubnice.....	19
Slika 3.4 Koncept varijante mreže VI, dva elementa po širini prirubnice	20
Slika 3.5 Koncept varijante mreže V2	21
Slika 4.1 Dijagram toka metode <i>assign_symmetry</i>	24
Slika 4.2 Primjer nedopuštenog mješovitog sustava orebrenja.....	25
Slika 5.1 Odabir osi simetrije u korisničkom sučelju.....	26
Slika 5.2 Puna mreža zone oplata, četvrtinski model <i>hc_var_4</i>	28
Slika 5.3 Uzdužna polovična mreža zone oplata, četvrtinski model <i>hc_var_4</i>	29
Slika 5.4 Poprečna polovična mreža zone oplata, četvrtinski model <i>hc_var_4</i>	30
Slika 5.5 Četvrtinska mreža zone oplata, četvrtinski model <i>hc_var_4</i>	31
Slika 5.6 Puna mreža segmenta, četvrtinski model ispitne varijante <i>hc_var_5</i>	33
Slika 5.7 Polovična mreža segmenta, četvrtinski model ispitne varijante <i>hc_var_5</i>	33
Slika 5.8 Jaki nosač na osi simetrije, polovični model ispitne varijante <i>hc_var_1</i>	34
Slika 5.9 Ukrepa na osi simetrije, polovični model ispitne varijante <i>hc_var_5</i>	35
Slika 5.10 Os simetrije između ukrepa, četvrtinski model ispitne varijante <i>hc_var_5</i>	36
Slika 6.1 Podjela mreže jedne zone oplata na varijanti mreže VI.....	37
Slika 6.2 Osnovna mreža konačnih elemenata.....	39
Slika 6.3 Dijagram toka metode <i>element_size_perp_to_stiffeners</i>	40

Slika 6.4 Dijagram toka metode <code>element_size_para_to_stiffeners</code>	41
Slika 6.5 Dijagram toka metode <code>get_flange_el_width</code>	42
Slika 6.6 Diskretizacija prirubnice T profila	43
Slika 6.7 Dijagram toka metode <code>get_flange_el_length</code>	43
Slika 6.8 Dijagram toka metode <code>get_min_fl_el_len</code>	44
Slika 6.9 Dijagram toka metode <code>element_size_plating_zone_perp</code>	45
Slika 6.10 Dijagram toka metode <code>element_size_plating_zone_para</code>	46
Slika 6.11 Osnovna mreža konačnih elemenata na zoni oplate, varijanta mreže VI	47
Slika 6.12 Osnovna mreža konačnih elemenata na zoni oplate, varijanta mreže V2	48
Slika 6.13 Dijagram toka metode <code>refine_plate_element</code>	49
Slika 6.14 Dijagram toka metode <code>element_size_plating_zone</code>	50
Slika 6.15 Dijagram toka metode <code>assign_base_dim_x</code>	52
Slika 6.16 Opseg prijelazne mreže konačnih elemenata oplate na varijanti mreže VI	54
Slika 6.17 Dijagram toka metode <code>transition_dim_x</code>	55
Slika 6.18 Opseg prijelazne mreže konačnih elemenata oplate na varijanti mreže V2	56
Slika 6.19 Prijelazni konačni elementi struka segmenta na varijanti mreže V2.....	57
Slika 6.20 Širine prirubnica okomitih na promatrani segment.....	58
Slika 6.21 Prijelazni konačni elementi struka, bez prijelaznih elemenata oplate	58
Slika 6.22 Prijelazni konačni elementi struka, bez trokuta	59
Slika 6.23 Prijelazni konačni elementi struka, bez trokuta i prijelaznih elemenata oplate	59
Slika 6.24 Broj konačnih elemenata osnovne mreže oplate.....	61
Slika 6.25 Dijagram toka metode <code>calculate_mesh_dimensions</code>	62
Slika 7.1 Rubovi sa preklapanjem čvorova oplate, ispitna varijanta <code>hc_var_1</code>	64
Slika 7.2 Rubovi sa preklapanjem čvorova struka, ispitna varijanta <code>hc_var_1</code>	65
Slika 7.3 Preklapanje elemenata prirubnica, ispitna varijanta konstrukcije <code>hc_var_1</code>	65
Slika 7.4 Referentne točke i numeracija čvorova na zoni oplate	66
Slika 7.5 Vektorsko određivanje koordinata čvorova oplate	67
Slika 7.6 Dijagram toka metode <code>generate_plate_nodes</code>	68
Slika 7.7 Numeracija i indeksi pločastih konačnih elemenata na zoni oplate.....	69
Slika 7.8 Numeracija i indeksi čvorova na zoni oplate	70
Slika 7.9 Numeracija i indeksi grednih konačnih elemenata na zoni oplate.....	71
Slika 7.10 Numeracija čvorova struka segmenta, varijanta mreže VI	72
Slika 7.11 Dijagram toka metode <code>generate_web_nodes</code>	73

Slika 7.12 Vektorsko određivanje koordinata čvorova segmenta	74
Slika 7.13 Numeracija čvorova struka segmenta, varijanta mreže V2	75
Slika 7.14 Jedan element po visini struka, varijanta mreže V2	76
Slika 7.15 Prijelazni red elemenata sa 2 elemenata po visini struka, varijanta mreže V2.....	76
Slika 7.16 Prijelazni red elemenata sa 5 elemenata po visini struka, varijanta mreže V2.....	76
Slika 7.17 Dijagram toka metode <code>generate_flange_nodes</code>	78
Slika 7.18 Numeracija čvorova prirubnice segmenta, varijanta mreže VI	79
Slika 7.19 Promjena širine prirubnica na spoju jakih nosača.....	80
Slika 7.20 Numeracija elemenata struka segmenta, varijanta mreže VI	81
Slika 7.21 Numeracija elemenata prirubnice L profila	82
Slika 7.22 Dijagram toka metode <code>check_node_overlap_np</code>	84
Slika 7.23 Dijagram toka metode <code>sorted_coincident_nodes</code>	85
Slika 7.24 Dijagram toka metode <code>merge_coincident_nodes</code>	86
Slika 7.25 Dijagram toka metode <code>check_element_overlap</code>	87
Slika 7.26 Dijagram toka metode <code>merge_coincident_elements</code>	88
Slika 8.1 Rubni uvjeti, puna mreža ispitne varijante <code>hc_var_5</code>	89
Slika 8.2 Rubni uvjeti, četvrtinska mreža ispitne varijante <code>hc_var_5</code>	90
Slika 8.3 Rubni uvjeti, uzdužna polovična mreža ispitne varijante <code>hc_var_5</code>	91
Slika 8.4 Rubni uvjeti, poprečna polovična mreža ispitne varijante <code>hc_var_5</code>	91
Slika 9.1 Uzdužna polovična mreža konačnih elemenata, ispitna varijanta <code>hc_var_8</code>	96
Slika 9.2 Progib ispitne varijante <code>hc_var_8</code> uz faktor povećanja deformacije 15	96
Slika 9.3 Naprezanja u prirubnicama ispitne varijante <code>hc_var_8</code>	97
Slika 9.4 Naprezanja u oplati, <i>x</i> smjer, ispitna varijanta <code>hc_var_8</code>	97
Slika 9.5 Naprezanja u oplati, <i>y</i> smjer, ispitna varijanta <code>hc_var_8</code>	98
Slika 9.6 Polovični model topologije 4x10x14L [13]	98
Slika 9.7 Progib konstrukcije, topologija 4x10x14L [13].....	99
Slika 9.8 Naprezanja u prirubnicama, topologija 4x10x14L [13].....	99
 Prilog 1: UML dijagrami klasa	
Slika 1-1 UML dijagram klasa programskog koda <code>grillage_model.py</code>	1
Slika 1-2 UML dijagram klasa programskog koda <code>grillage_mesher.py</code>	2

Prilog 2: Slike modela i mreža konačnih elemenata ispitnih varijanti konstrukcija

Slika 2-1 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_1	1
Slika 2-2 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1.....	2
Slika 2-3 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1.....	2
Slika 2-4 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1.....	3
Slika 2-5 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1.....	3
Slika 2-6 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_2	4
Slika 2-7 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2.....	5
Slika 2-8 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2.....	5
Slika 2-9 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2.....	6
Slika 2-10 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2.....	6
Slika 2-11 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_3	7
Slika 2-12 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3.....	8
Slika 2-13 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3.....	8
Slika 2-14 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3.....	9
Slika 2-15 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3.....	9
Slika 2-16 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_4	10
Slika 2-17 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4.....	11
Slika 2-18 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4.....	11
Slika 2-19 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4.....	12
Slika 2-20 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4.....	12
Slika 2-21 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_5	13
Slika 2-22 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5.....	14
Slika 2-23 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5.....	14
Slika 2-24 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_6	15
Slika 2-25 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6.....	16
Slika 2-26 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6.....	16
Slika 2-27 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6.....	17
Slika 2-28 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6.....	17
Slika 2-29 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_7	18
Slika 2-30 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7.....	19
Slika 2-31 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7.....	19

Slika 2-32 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7.....	20
Slika 2-33 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7.....	20
Slika 2-34 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_8	21
Slika 2-35 Varijanta mreže V1, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8.....	22
Slika 2-36 Varijanta mreže V1, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8.....	22
Slika 2-37 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8.....	23
Slika 2-38 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8.....	23

POPIS TABLICA

Tablica 6.1 Parametri za kontrolu mreže	38
Tablica 9.1 Topološke karakteristike ispitnih varijanti konstrukcija	93
Tablica 9.2 Specifičnosti ispitnih varijanti konstrukcija	94

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_p	mm	Duljina promatrane zone oplata u smjeru globalne osi x
B_p	mm	Širina promatrane zone oplata u smjeru globalne osi y
α^{pe}	-	Aspektni odnos konačnih elemenata oplata (eng. <i>plate</i>)
α^{fe}	-	Aspektni odnos konačnih elemenata prirubnice (eng. <i>flange</i>)
α_p^{pe}	-	Poželjni aspektni odnos konačnih elemenata oplata
α_{max}^{pe}	-	Maksimalni aspektni odnos konačnih elemenata oplata
α_{max}^{fe}	-	Maksimalni aspektni odnos konačnih elemenata prirubnice
h	mm	Visina Hat profila
t	mm	Debljina lima Hat profila
φ	°	Kut nagiba struka Hat profila
S_1	mm	Razmak između strukova Hat profila
b_f	mm	Širina prirubnice T, L ili Hat profila
t_f	mm	Debljina prirubnice T, L ili Hat profila
b_p	mm	Širina sunosivog opločenja
t_p	mm	Debljina sunosivog opločenja
t_c	mm	Korozivski dodatak
h_w	mm	Visina struka T, L ili FB profila
t_w	mm	Debljina struka T, L ili FB profila
h_w'	mm	Visina HP profila
t_w'	mm	Debljina struka HP profila
dim_x	mm	Osnovna dimenzija mreže konačnih elemenata u smjeru globalne osi x
dim_y	mm	Osnovna dimenzija mreže konačnih elemenata u smjeru globalne osi y
dim_{xf}	mm	Dimenzija elementa prirubnice segmenta u smjeru globalne osi x
dim_{yf}	mm	Dimenzija elementa prirubnice segmenta u smjeru globalne osi y
$b_{f,max1}$	mm	Najveća širina prirubnice segmenta u okomitom smjeru na kraju 1
$b_{f,max2}$	mm	Najveća širina prirubnice segmenta u okomitom smjeru na kraju 2
tr_x	mm	Dimenzija prijelaznog elementa u smjeru globalne osi x
tr_y	mm	Dimenzija prijelaznog elementa u smjeru globalne osi y
tr_{xp}	mm	Dimenzija prijelaznog elementa oplata u smjeru globalne osi x
tr_{yp}	mm	Dimenzija prijelaznog elementa oplata u smjeru globalne osi y
tr_{xf}	mm	Dimenzija prijelaznog elementa prirubnice u smjeru globalne osi x
tr_{yf}	mm	Dimenzija prijelaznog elementa prirubnice u smjeru globalne osi y

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je izrada modula za automatiziranu izradu mreže konačnih elemenata na roštiljnoj konstrukciji grotlenog poklopca u programskom jeziku Python. Modul je izveden u okviru programa otvorenog koda d3v-sgd čija je namjena modeliranje, analiza i vizualizacija jednostavnih brodskih roštiljnih konstrukcija.

Modul za automatiziranu izradu mreže konačnih elemenata izrađuje mrežu na temelju učitano modela konstrukcije, koji sadrži sve informacije o položajima i svojstvima konstrukcijskih elemenata. Učitani model se provjerava prema kriterijima izvedivosti mreže i prolazi automatsko prepoznavanje simetričnosti konstrukcije. Na temelju prepoznatih ili ručno odabranih osi simetrija određuju se granice za izradu mreže konačnih elemenata. Unutar tih granica modela se računaju dimenzije konačnih elemenata, prema parametrima za kontrolu mreže koji se podešavaju u izrađenom korisničkom sučelju. Inicijalne vrijednosti ovih parametara su postavljene prema preporukama *Lloyd's Register* i zajedničkim konstrukcijskim pravilima *International Association of Classification Societies, Common Structural Rules for Bulk Carriers*.

Za diskretizaciju konstrukcije prema izračunatim dimenzijama konačnih elemenata su izrađene dvije varijante mreža. Prva varijanta generira mrežu isključivo sa pravokutnim *quad* elementima, a druga koristi kombinaciju četverokutnih i trokutastih konačnih elemenata. Na generiranu mrežu konačnih elemenata se izrađenim algoritmima postavljaju rubni uvjeti, opterećenje vanjskim tlakom i vlastitom težinom.

Ispitivanje automatske izrade mreže konačnih elemenata je provedeno na ukupno 8 različitih ispitnih varijanti konstrukcije. Za svaku ispitnu varijantu su priloženi nacrti, navedene specifičnosti i karakteristike, prikazani modeli konstrukcije te generirane mreže konačnih elemenata u programu d3v-sgd. Za odabranu ispitnu varijantu prikazani su rezultati analize metodom konačnih elemenata sa programom OOFEM koji je integriran u d3v-sgd. Odziv konstrukcije uspoređen je sa odzivom iste konstrukcije koja je ručno modelirana i analizirana u programu Maestro.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, roštiljna konstrukcija, automatizirana izrada mreže konačnih elemenata, Python, d3v-sgd, OOFEM

SUMMARY

The objective of this master's thesis is creation of a Python module for automated finite element mesh generation of a hatch cover grillage structure. This module is developed as a part of d3v-sgd, an open-source program for modelling, analysis and visualization of simple ship grillage structures.

The finite element mesh is generated based on an input grillage model which contains all data relating to positions and properties of all structural elements. This input model is checked for mesh feasibility and goes through automatic symmetry detection. Finite element mesh extents are calculated based on the automatically discovered or overridden axis of symmetry. Finite element mesh size within the mesh extents is calculated using the input mesh control parameters, which can be set in the user interface. Initial values of mesh control parameters are set according to recommendations of *Lloyd's Register* and *International Association of Classification Societies, Common Structural Rules for Bulk Carriers*.

Discretization of the grillage structure according to the calculated mesh size can be performed using two different meshing variants. The first variant generates the finite element mesh using exclusively rectangular quad elements, while the second variant uses a combination of quad and triangle elements. Boundary conditions are automatically applied to the generated finite element mesh, along with a load case which consists of external pressure and self-weight.

Testing of automatic mesh generation has been conducted on 8 different test grillage structure variants. Blueprints, particularities, characteristics, input models and generated finite element mesh variants in d3v-sgd are shown for all test grillage variants. Results of finite element method analysis using OOFEM integrated into d3v-sgd are shown for a selected test variant. Structural response is compared with the response of the same grillage structure variant that has been manually meshed and analyzed in the program Maestro.

Key words: finite element method, grillage structure, automated finite element mesh generation, Python, d3v-sgd, OOFEM

1. UVOD

Razvojem računala i računalnih alata za analizu odziva se metoda konačnih elemenata sve više koristi za direktne proračune konstrukcija u brodogradnji i široj inženjerskoj praksi. Korištenje ove metode omogućuje ispitivanje različitih konstrukcijskih rješenja u kratkom vremenu, a time i optimizaciju konstrukcije s obzirom na odabrani cilj. U ovakvoj primjeni je automatizirana izrada mreže konačnih elemenata nezaobilazan korak u diskretizaciji konstrukcije ukoliko model sadržava geometrijske ili topološke varijable.

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačnim brojem stupnjeva slobode se zamjenjuje s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, kontinuum se dijeli na konačan broj područja koja se nazivaju konačni elementi, čime razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi su međusobno povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je polje pomaka, deformacije, naprezanja i ostalih veličina, se opisuje pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Treba imati na umu da su rješenja dobivena metodom konačnih elemenata približna, a ne egzaktna. Stvarnim vrijednostima se moguće približiti samo uz ispravan odabir proračunskog modela i konačnih elemenata koji su u stanju opisati realni proces deformacije. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, povećanjem broja elemenata raste točnost dobivenog rješenja [1].

U ovom radu je korištenjem programskog jezika Python izrađen programski kod za automatsku diskretizaciju konstrukcije grotlenog poklopca konačnim elementima. Python je interpretirani, interaktivni, objektno orijentirani programski jezik opće namjene, otvorenog koda, čiji je tvorac nizozemski programer Guido van Rossum. Odlikuju ga iznimna čitljivost, fleksibilnost proširivanja i kompatibilnost [2]. Zahvaljujući dostupnosti raznih biblioteka kao što su TensorFlow, Matplotlib, NumPy, Scipy, Pandas i druge, Python je postao *de facto* standardni programski jezik znanstvene zajednice u više znanstvenih polja.

2. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE ROŠTILJA

Modul za definiciju modela `grillage_model.py` omogućuje pojednostavljeno modeliranje roštiljne konstrukcije grotlenog poklopca uz minimalni broj nezavisnih parametara i jedan je od osnovnih modula programa `d3v-sgd` (Design Visualizer for Ship Grillage Design). Modul je izrađen u okviru timskog projekta izbornog kolegija Podobnost konstrukcije plovnih objekata, a za potrebe ovog rada dodatno je proširen. Ovaj modul osim opisivanja konstrukcije ima ulogu povezivanja ostalih modula programa `d3v-sgd` koji služe za analizu odziva analitičkom metodom izjednačenja progiba, analizu odziva metodom konačnih elemenata i analizu podobnosti prema preskriptivnim pravilima. U ovom poglavlju biti će objašnjeni korišteni pojmovi i načini definicije pojedinih dijelova roštiljne konstrukcije zbog povezanosti modula za definiciju modela i modula za izradu mreže konačnih elemenata.

Program `d3v-sgd` je dostupan na poveznici: <https://github.com/pprebeg/d3v-sgd> [3], dok je verzija programa koja je korištena u ovom diplomskom radu dostupna na:

https://github.com/pprebeg/d3v-sgd/tree/gordan_kos_final_thesis [4]

2.1 Model konstrukcije poklopca broda za prijevoz rasutog tereta

Model opisuje tipičnu izvedbu roštiljne konstrukcije grotlenog poklopca pravokutnog oblika sa sustavom jakih nosača koji teku u dva smjera i križaju se pod pravim kutom. Slikom 2.1 je prikazan primjer MacGregor podiznog grotlenog poklopca broda za opći teret.



Slika 2.1 Podizni grotleni poklopac [5]

Svaka zona oplate između jakih nosača ima određeni broj sekundarnih ukrepa, a na elementarnim panelima oplate između jakih nosača i ukrepa mogu biti postavljene interkostalne ukrepe. Modelom je opisana varijanta grotlenog poklopca sljedećih karakteristika i ograničenja:

- 1) Tip poklopca je nepropustan za vremenske uvjete (eng. *weathertight*)
- 2) Opločenje poklopca je jednostruko
- 3) Opločenje nema preluka
- 4) Oplata je u ravnini x,y na visini struka jakih nosača
- 5) Na jednoj zoni oplate je moguće postaviti samo jedan raspored ukrepa
- 6) Raspored ukrepa može imati samo jedan tip ukrepe
- 7) Jedna zona oplate može imati samo jedno svojstvo opločenja
- 8) Jaki nosači su T, L ili FB profili
- 9) Segment jakog nosača može imati samo jedno svojstvo grede
- 10) Ukrepe mogu biti T, L, FB, Bulb ili Hat profili
- 11) Dopušten je mješoviti sustav orebrenja

2.2 Struktura klasa modula za definiciju modela roštiljne konstrukcije

Struktura programskog koda za modeliranje konstrukcije je izrađena primjenom oblikovnog obrasca *Composite* kojim se opisuje hijerarhija pojedinih dijelova i njihove cjeline. Ovaj obrazac omogućuje izradu više različitih primitivnih objekata, koji se kasnije spajaju u složeniji kompozitni objekt [6]. U ovom slučaju je taj kompozitni objekt sama roštiljna konstrukcija *Grillage*, koja se sastoji od sljedećih dijelova tj. objekata:

- `PrimarySuppMem` – jaki nosač
- `Plate` – zona oplate sa pridruženim sekundarnim ukrepama

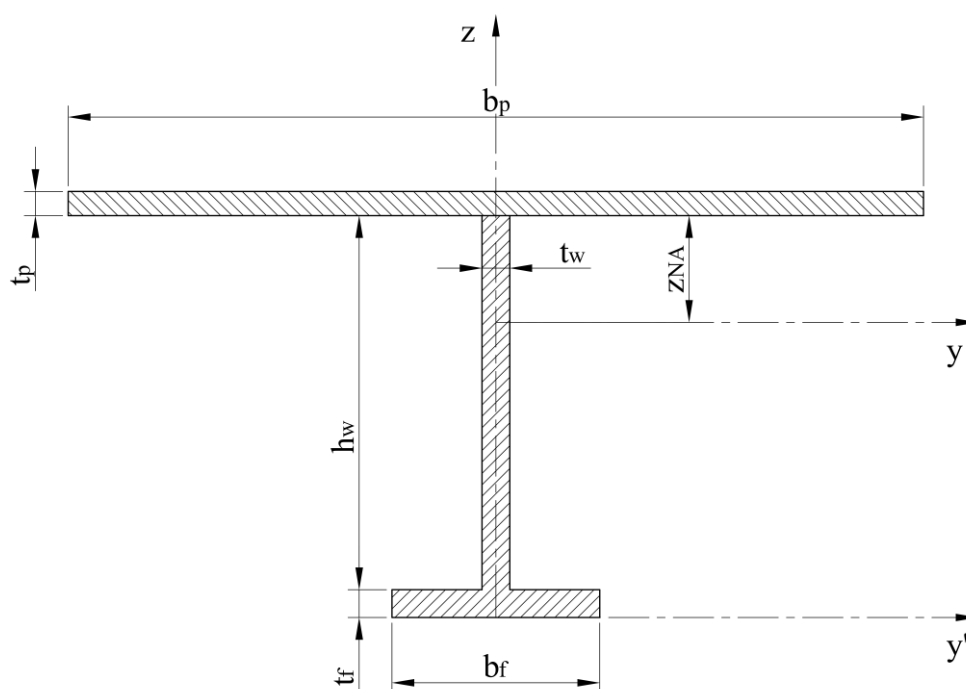
Svaki jaki nosač se može podijeliti na više dijelova, a svaki dio je opisan objektom `Segment`, kojemu se pridodaju svojstva grede i položaja u odnosu na jake nosače. Svaka zona oplate ima pridružen raspored ukrepa `StiffenerLayout` koji opisuje sve ukrepe koje se nalaze na toj zoni oplate. Ukrepama i segmentima jakih nosača se pridodaju svojstva grede u obliku objekta `BeamProperty`, koji može opisivati različite tipove poprečnih presjeka. Svakom svojstvu grede i svojstvu opločenja `PlateProperty` se pridodaje objekt koji opisuje karakteristike materijala `MaterialProperty`. U prilogu I, slika 1-1 prikazuje UML dijagram klasa programskog koda `grillage_model.py`

2.3 Karakteristike poprečnog presjeka jakih nosača i ukrepa

Svojstva greda definirana su klasom `BeamProperty` te izvedenim klasama koje sadrže posebnosti pojedine vrte profila. Ove klase sadrže metode za proračun karakteristika krutosti svih jakih nosača i ukrepa. Te metode primarno su namijenjene za analitički proračun odziva metodom izjednačenja progiba, a za potrebe ovog rada su prenesene i u modul `geofementity.py` i služe za proračun krutosti grednih konačnih elemenata običnih ukrepa. Dostupni tipovi profila unutar ovog modula su T, L, FB, Bulb i Hat. Prilikom izrade svojstava grednih konačnih elemenata koje će biti dodijeljeno konačnim elementima ukrepa se iz modela preuzimaju neto dimenzije, prema *IACS CSR Chapter 3, Section 2, Net scantling approach* [7].

2.3.1 T profil

Izvedeni izrazi za T profil prikazanog slikom 2.2 se koriste za proračun neto momenta inercije, uvrštavanjem neto dimenzija prema jednadžbama 2.1 – 2.5. Unutar programskog koda su obuhvaćeni slučajevi kada T profil nema sunosivo opločenje i/ili prirubnicu, tako da je proračun osim L profila upotrebljiv i za proračun FB profila.



Slika 2.2 Poprečni presjek T profila

Neto visina struka za slučaj kada profil ima sunosivo opločenje:

$$h_{w,net} = h_w + t_c \quad (2.1)$$

Neto visina struka za slučaj kada profil nema sunosivo opločenje:

$$h_{w,net} = h_w \quad (2.2)$$

Neto debljina struka:

$$t_{w,\text{net}} = t_w - t_c \quad (2.3)$$

Neto širina prirubnice:

$$b_{f,\text{net}} = b_f - t_c \quad (2.4)$$

Neto debljina prirubnice:

$$t_{f,\text{net}} = t_f - t_c \quad (2.5)$$

Površina poprečnog presjeka sa sunosivom širinom:

$$A = b_f \cdot t_f + h_w \cdot t_w + b_p \cdot t_p \quad (2.6)$$

Udaljenost neutralne linije od točke spoja sa opločnjem:

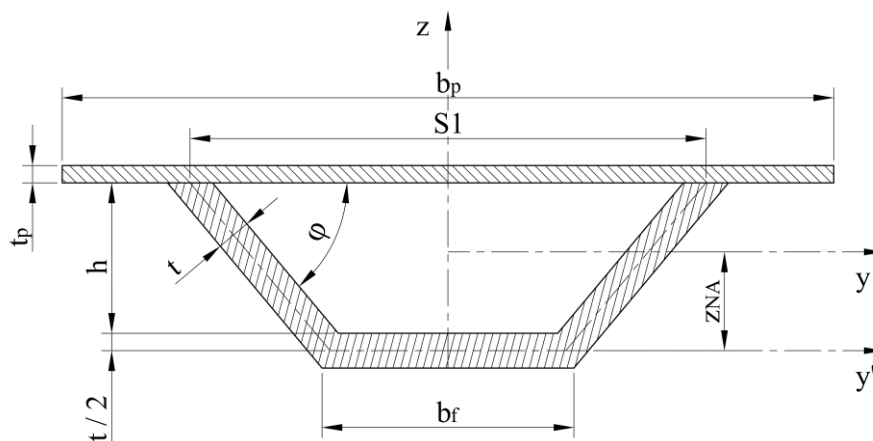
$$z_{\text{NA}} = \frac{b_f \cdot t_f \left(t_p + h_w + \frac{t_f}{2} \right) + h_w \cdot t_w \left(t_p + \frac{h_w}{2} \right) + b_p \cdot \frac{t_p^2}{2}}{A} \quad (2.7)$$

Moment inercije profila oko y osi:

$$I_y = b_f \cdot t_f \cdot \left[\frac{t_f^2}{12} + \left(\frac{t_f}{2} + h_w + t_p - z_{\text{NA}} \right)^2 \right] + h_w \cdot t_w \cdot \left[\frac{h_w^2}{12} + \left(\frac{h_w}{2} + t_p - z_{\text{NA}} \right)^2 \right] + b_p \cdot t_p \cdot \left[\frac{t_p^2}{12} + \left(z_{\text{NA}} - \frac{t_p}{2} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

2.3.2 Hat profil

Hat profil prikazan slikom 2.3 je izveden razmatranjem ekvivalentnog profila primjenom pravila o paralelnom pomaku. Prema ovom pravilu se moment tromosti s obzirom na neku os neće promijeniti ako se pojedini dijelovi presjeka pomaknu paralelno s tom osi [8].



Slika 2.3 Poprečni presjek Hat profila

Razmak strukova u razini spoja sa oploćenjem:

$$S_1 = b_f + \frac{2 \cdot h + t}{\operatorname{tg}(\varphi)} - t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.9)$$

Smanjenje širine prirubnice na jednoj strani zbog korozijskog dodatka:

$$b_{f,\text{red}} = \frac{t_c}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.10)$$

Neto širina prirubnice:

$$b_{f,\text{net}} = b_f - 2 \cdot b_{f,\text{red}} \quad (2.11)$$

Neto visina struka:

$$h_{\text{net}} = h + t_c \quad (2.12)$$

Neto debljina struka i prirubnice:

$$t_{\text{net}} = t - t_c \quad (2.13)$$

Površina poprečnog presjeka sa sunosivom širinom:

$$A = \frac{2 \cdot h \cdot t}{\sin(\varphi)} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}(\varphi)} + b_f \cdot t + b_p \cdot t_p \quad (2.14)$$

Udaljenost neutralne linije od simetrale prirubnice:

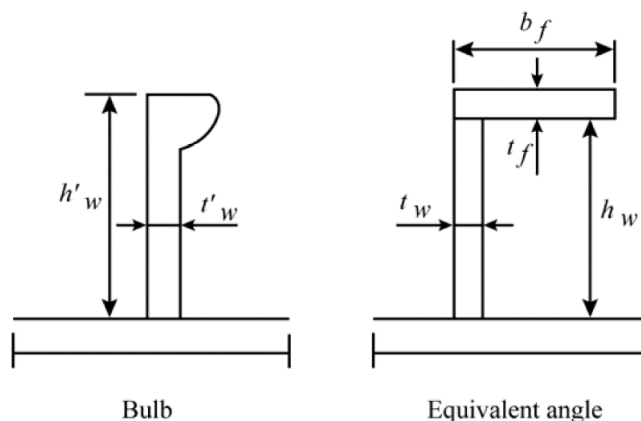
$$z_{\text{NA}} = \frac{\frac{h \cdot t}{\sin(\varphi)} \cdot (h + t) + \frac{t^3}{6 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} + \left(h + \frac{t_p + t}{2}\right) \cdot b_p \cdot t_p}{A} \quad (2.15)$$

Moment inercije profila oko y osi:

$$I_y = 2 \cdot \left[\frac{t \cdot h^3}{12 \cdot \sin(\varphi)} + \left(\frac{t + h}{2} - z_{\text{NA}}\right)^2 \cdot \frac{h \cdot t}{\sin(\varphi)} \right] + 2 \cdot \left[\frac{t^4}{36 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} + \left(z_{\text{NA}} - \frac{t}{6}\right)^2 \cdot \frac{t^2}{2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \right] + \left[\frac{b_f \cdot t^3}{12} + z_{\text{NA}}^2 \cdot b_f \cdot t \right] + \left[\frac{b_p \cdot t_p^3}{12} + \left(\frac{t_p + t}{2} - z_{\text{NA}}\right)^2 \cdot b_p \cdot t_p \right] \quad (2.16)$$

2.3.3 HP profil

Moment inercije HP profila se određuje prema već izvedenim izrazima za T profil, uvrštavanjem neto dimenzija ekvivalentnog L profila. Bruto dimenzije ekvivalentnog L profila prikazanog slikom 2.4 su određene prema *IACS CSR, Chapter 3, Section 6, 4.1.1 Stiffener profile with a bulb section* [7].



Slika 2.4 Dimenzije ekvivalentnog L profila [7]

Visina struka ekvivalentnog profila:

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9,2} + 2 \quad (2.17)$$

Širina prirubnice ekvivalentnog profila:

$$b_f = \alpha \left(t'_w + \frac{h'_w}{6,7} - 2 \right) \quad (2.18)$$

Debljina prirubnice ekvivalentnog profila:

$$t_f = \frac{h'_w}{9,2} - 2 \quad (2.19)$$

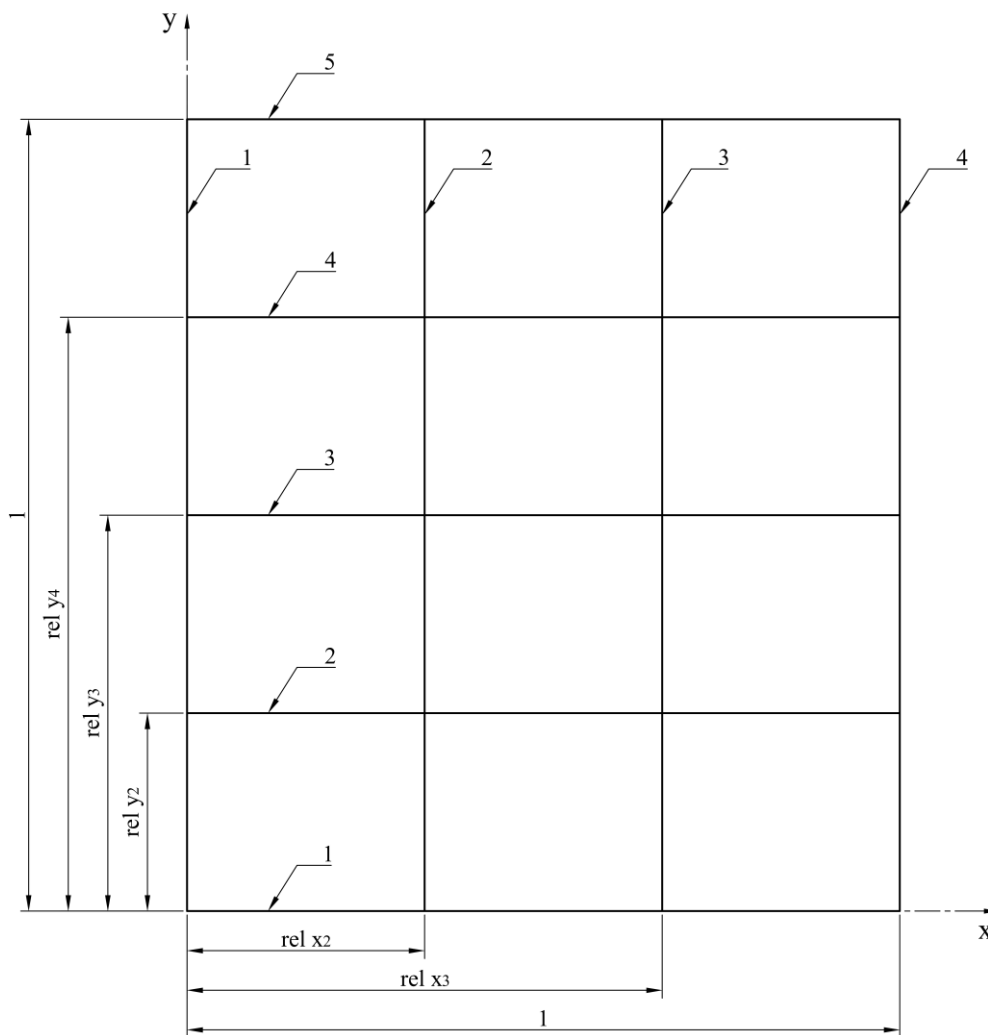
gdje su h'_w i t'_w visina i debljina struka HP profila

$$\alpha = 1,1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000} \quad \text{za } h'_w \leq 120 \text{ mm} \quad (2.20)$$

$$\alpha = 1 \quad \text{za } h'_w > 120 \text{ mm} \quad (2.21)$$

2.4 Jaki nosač

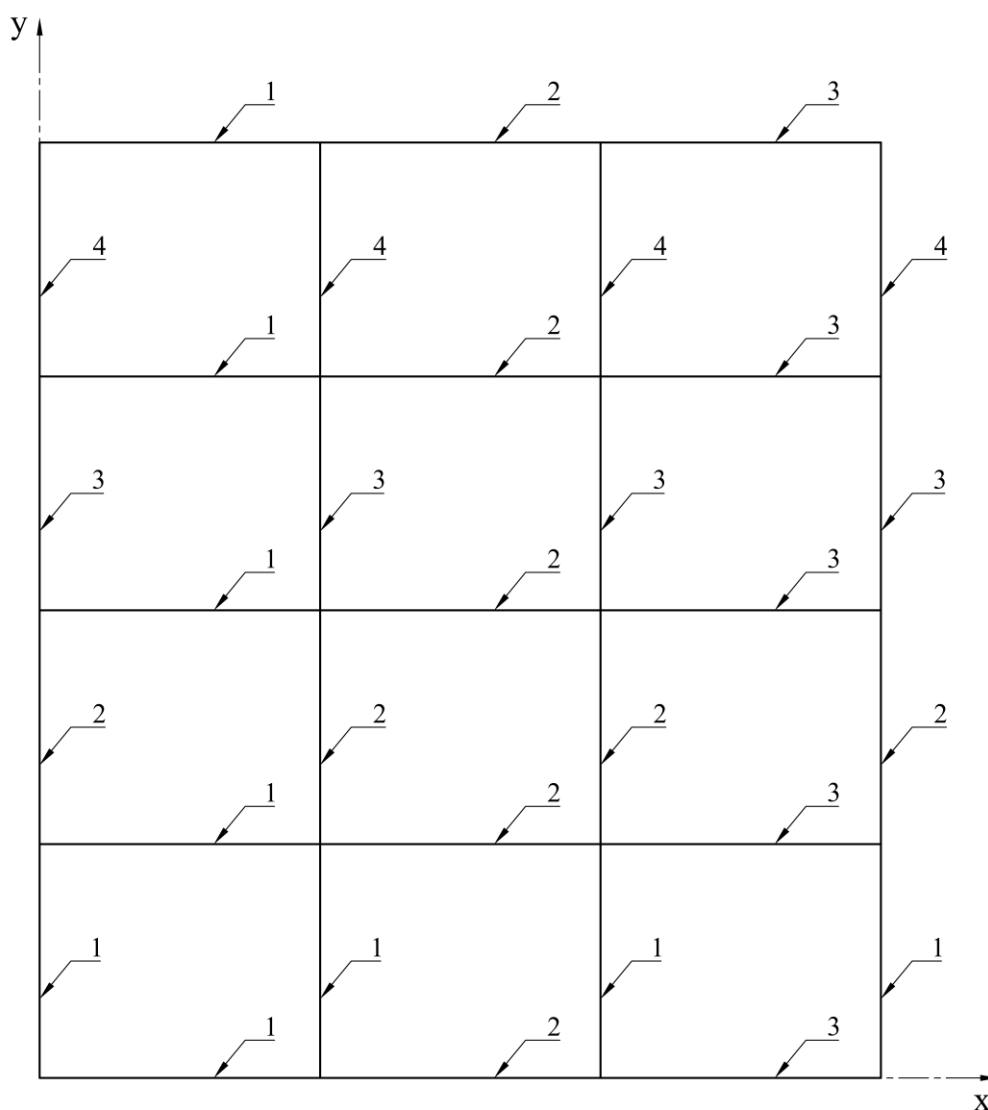
Jaki nosač definiran je klasom `PrimarySuppMem` (eng. *Primary Supporting Member*), skraćeno PSM, i opisuje gredu koja se proteže cijelom duljinom ili širinom roštiljne konstrukcije, a može biti usmjeren uzdužno (`BeamDirection.LONGITUDINAL`) ili poprečno (`BeamDirection.TRANSVERSE`). Jaki uzdužni nosač (eng. *longitudinal*) je jaki nosač koji se proteže uzdužno u smjeru globalne osi x . Jaki poprečni nosač (eng. *transversal*) je nosač koji se proteže poprečno u smjeru globalne osi y . Svaki jaki nosač osim podatka vlastitog smjera sadrži i jedinstveni identifikacijski broj `idbeam` na razini pojedinog smjera i relativnu udaljenost od globalnih koordinatnih osi `rel_dist`. Numeracija jakih nosača zasebno kreće od 1 za uzdužne i poprečne nosače, kako je prikazano slikom 2.5. Jaki rubni nosači se nalaze na relativnim koordinatama 0 i 1, a centralni jaki nosač, za neparan broj nosača, na sredini konstrukcije se nalazi na relativnoj koordinati 0.5.



Slika 2.5 Identifikacijski brojevi i relativne koordinate jakih nosača

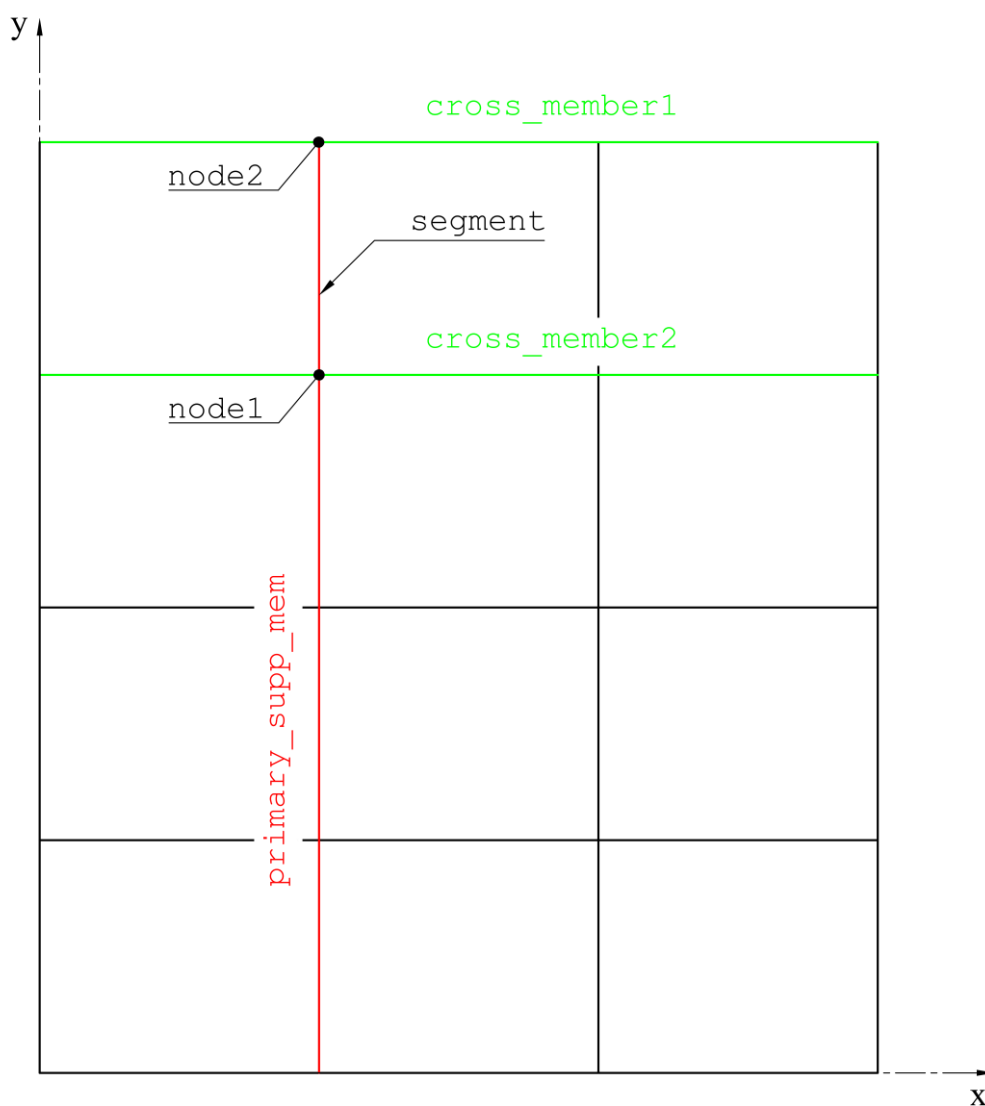
2.5 Segment jakog nosača

Segment je dio jakog nosača omeđen sa dva jaka nosača u suprotnom smjeru te može pripadati jakom uzdužnom ili jakom poprečnom nosaču, a definiran je klasom `Segment`. Uzdužni segment (eng. *longitudinal segment*) je dio jakog uzdužnog nosača omeđen sa dva jaka poprečna nosača. Poprečni segment (eng. *transverse segment*) je dio jakog poprečnog nosača omeđen sa dva jaka uzdužna nosača. Svaki segment sadrži jedinstveni identifikacijski broj `idsegment` na razini pojedinog jakog nosača, svojstvo grede `beam_prop` (eng. *beam property*), jaki nosač `primary_supp_mem` kojemu segment pripada i dva jaka nosača `cross_member1`, `cross_member2` koji definiraju segment. Numeracija segmenata zasebno kreće od 1 za svaki jaki nosač, kako je prikazano slikom 2.6.



Slika 2.6 Identifikacijski brojevi segmenata jakih nosača

Slika 2.7 prikazuje primjer definicije poprečnog segmenta jakog poprečnog nosača (crveno) koji je definiran sa dva jaka uzdužna nosača (zeleno). Na mjestima sjecišta ovih jakih nosača se nalaze referentne točke `node1`, `node2` svojstvene svakom segmentu, čije se koordinate unutar programskog koda određuju algoritmom za presjecište jakih nosača metodom `get_intersection`.



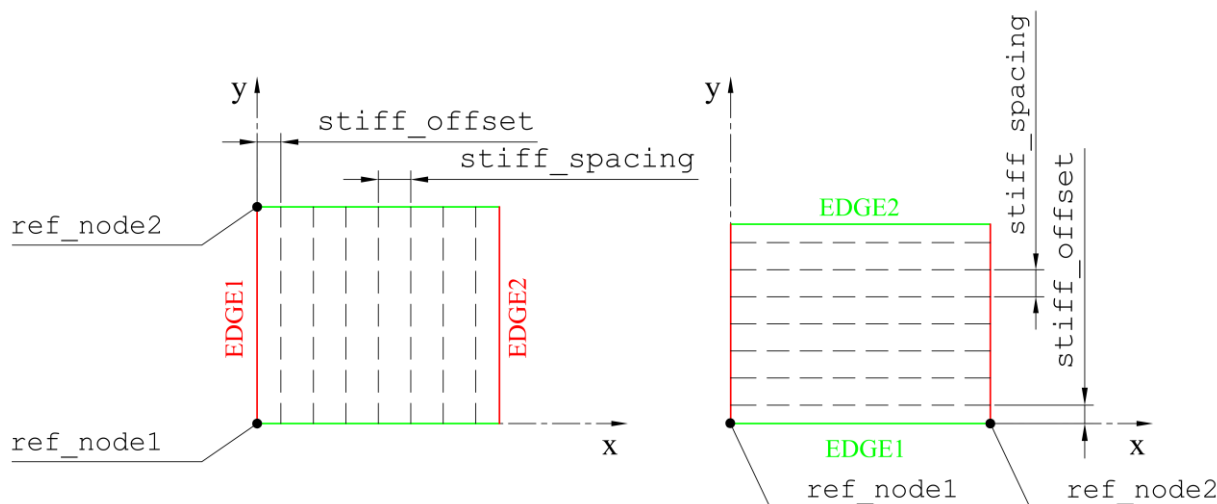
Slika 2.7 Definicija segmenta i referentnih točaka

Metodama `get_segment_node1` i `get_segment_node2` se određuju pojedine koordinate tih referentnih točaka, pri čemu je točka `node1` uvijek bliža globalnoj koordinatnoj osi. Vertikalna koordinata ovih referentnih točaka je na visini $z = h_w$, na mjestu spoja struka nosača sa opločnjem.

2.6 Raspored ukrepa

Za definiciju rasporeda ukrepa koristi se klasa `StiffenerLayout`. Na pojedinoj zoni oplata implementirane su dvije mogućnosti. Vrsta definicije ukrepa je određena sa vrijednosti `definition_type`, a može biti prema broju (`NUMBER`) ili razmaku (`SPACING`) ukrepa. Osim tipa i vrijednosti definicije, svaki raspored ukrepa sadrži jedinstveni identifikacijski broj `id_layout` i informaciju svojstva grede `beam_prop` (eng. *beam property*) koja pripada svim ukrepama pojedinog rasporeda ukrepa.

Za buduću implementaciju drugih mogućnosti definicije rasporeda ukrepa prema nekom odabranom referentnom rubu (`EDGE1` ili `EDGE2`), svaka zona oplata definira vlastiti referentni rub `ref_edge`. Ovaj referentni rub ovisi o orijentaciji ukrepa, kako je prikazano slikom 2.8.



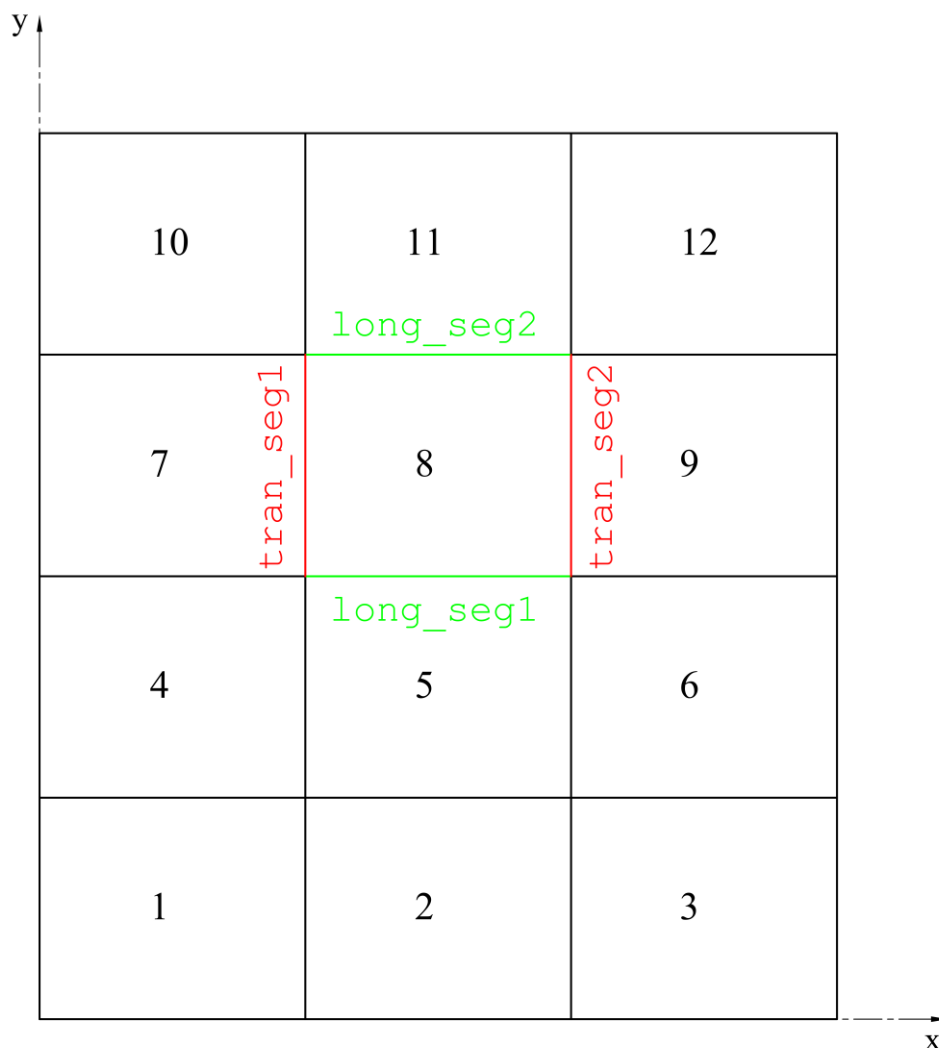
Slika 2.8 Referentni rubovi i čvorovi za postavljanje ukrepa

Svaki raspored ukrepa može imati dodijeljeno samo jedno svojstvo grede, a svaka zona oplata može imati dodijeljen samo jedan raspored ukrepa. Ovo znači da je na pojedinoj zoni oplata moguće postaviti samo jednu vrstu ukrepa, što u nekim slučajevima može biti ograničavajuće, ako je npr. samo na sredini zone oplata potrebno postaviti drugačije ukrepe.

Ovaj nedostatak bi se mogao riješiti izradom novog objekta `Stiffener` koji bi sadržavao vlastito svojstvo grede i bio dodijeljen pojedinom rasporedu ukrepa na određenoj poziciji. To bi također podrazumijevalo proširenje objekta `StiffenerLayout` koji bi trebao sadržavati dodatne informacije i metode za određivanje koja ukrepa se nalazi na kojoj poziciji.

2.7 Zona oplate

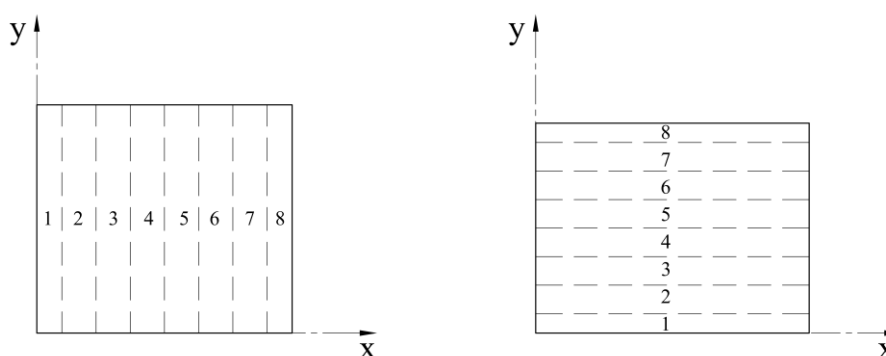
Zona oplate definirana je klasom `Plate` (eng. *Plating zone*) i predstavlja dio oplate poklopca omeđen sa četiri segmenta: `long_seg1`, `long_seg2`, `trans_seg1` i `trans_seg2`. Svaka zona oplate sadrži jedinstveni identifikacijski broj, svojstvo opločenja, raspored ukrepa, orijentaciju ukrepa i referentni rub. Primjer numeracije zona oplate identifikacijskim brojem `idplate` je prikazan slikom 2.9, gdje su također prikazani rubni uzdužni (zeleno) i poprečni (crveno) segmenti koji definiraju granice zone oplate 8. Svojstvo opločenja `plate_prop` (eng. *plate property*) sadrži informaciju o debljini i vrsti materijala. Raspored ukrepa `stiff_layout` (eng. *stiffener layout*) i orijentacija ukrepa `stiff_dir` (eng. *stiffener direction*) u potpunosti definiraju ukrepe na pojedinoj zoni oplate. Referentni rub `ref_edge` (eng. *reference edge*) je podatak koji može poslužiti za nesimetričnu definiciju rasporeda ukrepa u odnosu na neki segment (rub) zone oplate.



Slika 2.9 Numeracija zona oplate i rubni segmenti

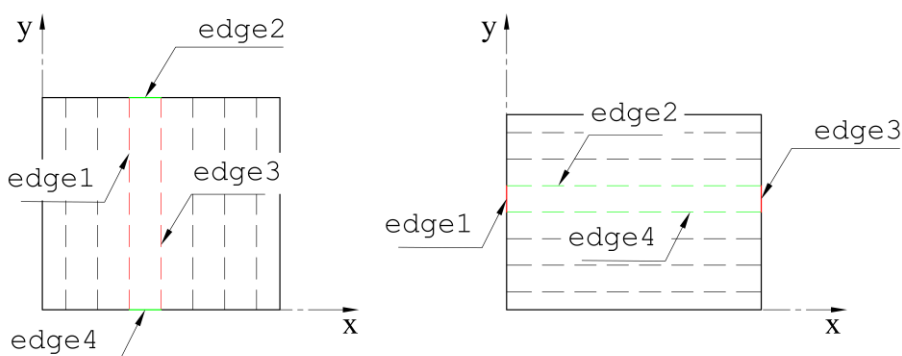
2.8 Elementarni panel oplata

Elementarni panel `ElementaryPlatePanel` je dio oplata omeđen sa jakim nosačima i rasporedom ukrepa duž svojih rubova. Svaki elementarni panel ima jedinstven identifikacijski broj `id` na razini pojedine zone oplata, broj interkostalnih ukrepa `intercostal_stiffener_num` (eng. *intercostal stiffener number*) i svojstvo tih interkostalnih ukrepa `beam_prop` (eng. *beam property*). Metoda `generate_elementary_plate_panels` izrađuje elementarne panele na svim zonama oplata, pri čemu je inicijalna vrijednost broja interkostalnih ukrepa 0, a svojstvo grede je `None`, tj. interkostalne ukrepe inicijalno ne postoje. Numeracija elementarnih panela zasebno kreće od 1 za svaku zonu oplata, u smjeru globalnih koordinatnih osi ovisno o orijentaciji ukrepa. Slika 2.10 prikazuje numeraciju elementarnih panela oplata za poprečne ukrepe (lijevo) i za uzdužne ukrepe (desno).



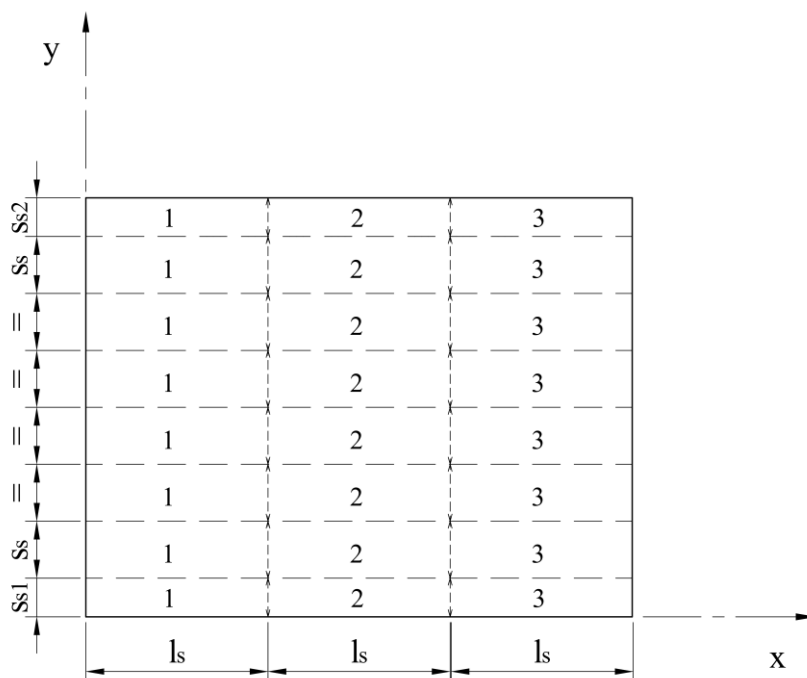
Slika 2.10 Numeracija elementarnih panela oplata

Za provjeru oploćenja prema kriterijima izvijanja potrebno je imati informaciju o tipovima nosača na svakom rubu neukrepljenog polja oplata. Lista tipova ovih rubnih nosača se određuje metodom `get_edge_beam_types`. U slučaju kada nema interkostalnih ukrepa, rubni nosači mogu biti samo jaki nosači ili obične ukrepe. Na slici 2.11 je prikazan sustav označavanja rubnih nosača za slučaj poprečnih ukrepa (lijevo) i uzdužnih ukrepa (desno).



Slika 2.11 Sustav označavanja rubnih nosača elementarnog panela

Dodavanje interkostalnih ukrepa može biti pojedinačno na odabrani elementarni panel oplata ili grupno na sve elementarne panele metodom `set_intercostal_stiffeners`, pri čemu se isti broj i svojstva interkostalnih ukrepa postavljaju na sve elementarne panele odabrane zone oplata. U slučaju kada na elementarnom panelu postoje interkostalne ukrepe, dolazi do podjele elementarnog panela na više neukrepljenih polja oplata koja se nazivaju pod paneli (eng. *sub panel*). Numeracija pod panela započinje sa brojem 1 za svaki redak ili stupac elementarnih panela između ukrepa, ovisno o orijentaciji ukrepa. Primjer numeracije pod panela jedne zone oplata sa uzdužnim ukrepama i dvije interkostalne ukrepe na svakom elementarnom panelu je prikazan slikom 2.12.



Slika 2.12 Numeracija i dimenzije pod panela zone oplata

Metoda `get_elementary_plate_dimensions` vraća manju i veću dimenziju, s_s i l_s neukrepljenog polja oplata na odabranom elementarnom panelu. Dimenzija panela paralelno s ukrepama se određuje metodom `sub_panel_length`, pri čemu se nepoduprti raspon ukrepe dijeli na jednake dijelove u ovisnosti o broju interkostalnih ukrepa. Dimenzija panela okomito na ukrepe se određuje metodom `sub_panel_width`, pri čemu se uzima u obzir razmak ukrepe od jakog nosača, razmak između ukrepa i tip profila ukrepe. Ako je ukrepa Hat profil, dimenzija panela okomito na ukrepe se smanjuje za vrijednosti razmaka između strukova S_1 .

2.9 Roštiljna konstrukcija

Cjelokupna konstrukcija definirana je klasom `Grillage` koja sadrži slijedeća svojstva:

- `L_overall` – ukupna duljina u uzdužnom smjeru globalne x osi, [m]
- `B_overall` – ukupna širina u poprečnom smjeru globalne y osi, [m]
- `N_longitudinal` – broj jakih uzdužnih nosača
- `N_transverse` – broj jakih poprečnih nosača

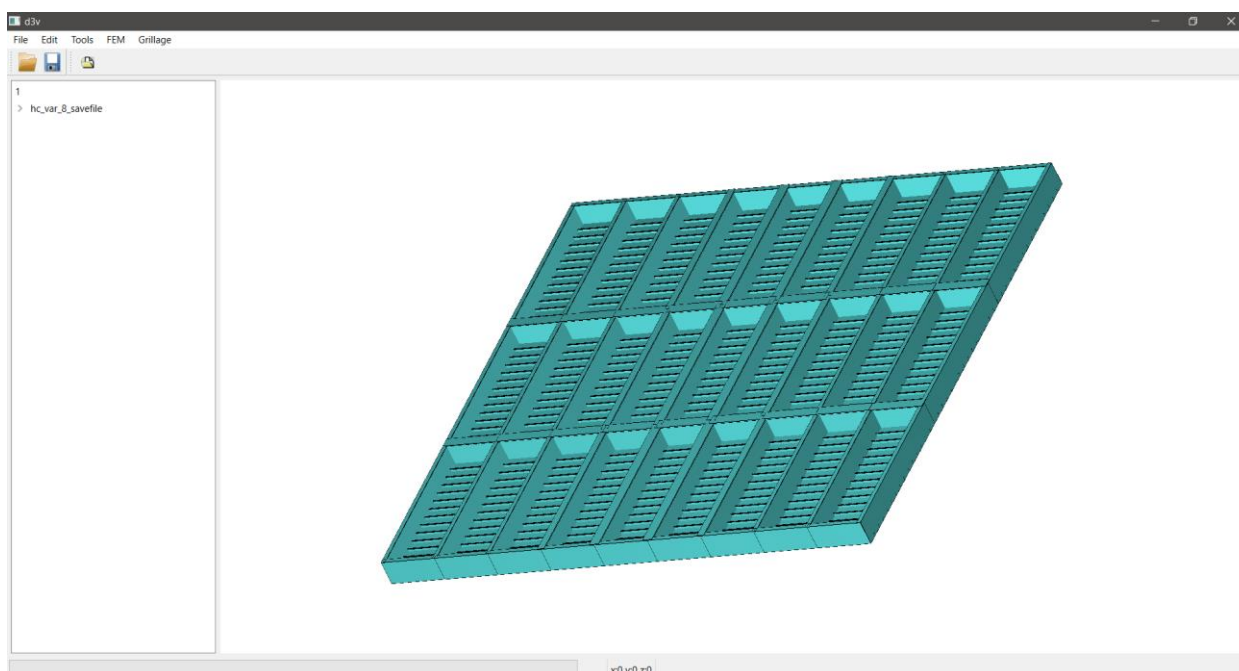
Svojstva materijala, opločenja, greda i ostalih karakteristika konstrukcije se zapisuju unutar ovog objekta u sljedećim rječnicima:

- `longitudinal_memb` – jaki uzdužni nosači
- `transverse_memb` – jaki poprečni nosači
- `material_props` – svojstva materijala
- `beam_props` – svojstva greda
- `plate_props` – svojstva opločenja
- `stiffener_layouts` – rasporedi ukrepa
- `plating` – zone oplata
- `corrosion_add` – korozijski dodatak
- `flange_direction` – usmjerenje prirubnica jakih nosača

Prilikom inicijalne generacije objekta roštiljne konstrukcije koristi se po jedno svojstvo grede za ukrepe, jake uzdužne, poprečne i rubne nosače te samo jedno svojstvo debljine oplata koje se dodjeljuje svim zonama oplata. Na ovaj način je za definiciju cijele konstrukcije potrebno definirati najviše četiri svojstva greda i jedno svojstvo opločenja, čime se pojednostavljuje i ubrzava proces izrade nove varijante konstrukcije. Za naknadnu izmjenu karakteristika segmenata i zona oplata postoje različite metode koje omogućuju pojedinačnu ili grupnu izmjenu konstrukcije. Grupne izmjene mogu biti s obzirom na simetrične elemente konstrukcije ili s obzirom na njihov položaj u odnosu na ostale elemente. Na globalnoj razini modela konstrukcije je inicijalno zadan parametar `flange_direction` koji usmjerava sve prirubnice jakih nosača prema središtu konstrukcije (`FlangeDirection.INWARD`). Naknadnom izmjenom je za pojedini jakih nosač moguće promijeniti ovaj parametar.

3. MODUL ZA IZRADU MREŽE KONAČNIH ELEMENATA

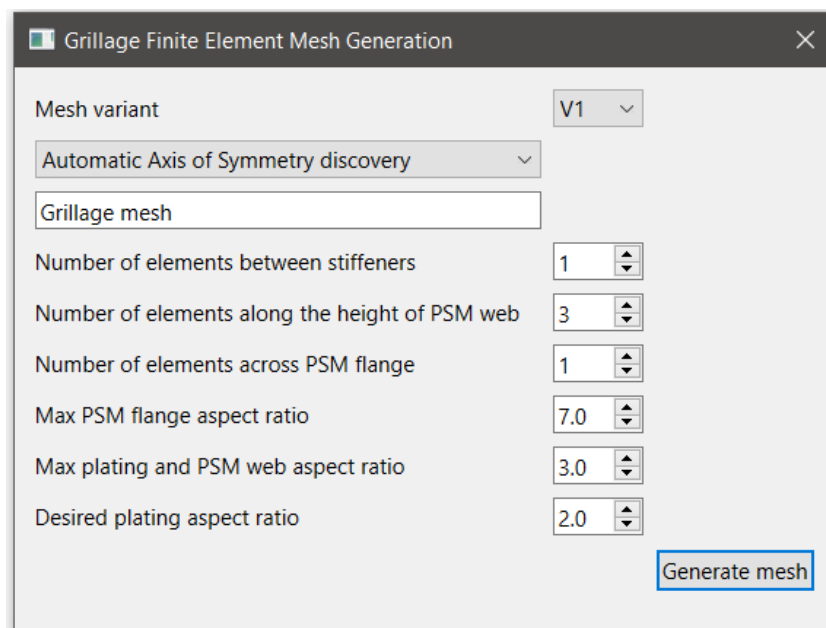
Modul za automatiziranu izradu mreže konačnih elemenata `grillage_mesher.py` je zamišljen kao jedan od dva sastavna Python modula za analizu odziva modela konstrukcije učitano u program otvorenog koda `d3v-sgd` (Design Visualizer for Ship Grillage Design). Glavni prozor programa `d3v-sgd` sa učitanim modelom ispitne varijante konstrukcije `hc_var_8` je prikazan slikom 3.1.



Slika 3.1 Glavni prozor programa `d3v-sgd`

Osim izrade mreže konačnih elemenata na modelu konstrukcije, modul u potpunosti priprema ulaznu datoteku za analizu metodom konačnih elemenata pomoću programa OOFEM. U tu svrhu se na izrađenu mrežu postavljaju odgovarajući rubni uvjeti, prema preporukama sadržanim u *Lloyd's Register, Assesment of Steel Hatch Covers Using Finite Element Analysis* [9]. Opterećenje vanjskim tlakom i vlastitom težinom je zadano prema zajedničkim konstrukcijskim pravilima IACS, *Common Structural Rules for Bulk Carriers* [7].

Modul je povezan sa grafičkim sučeljem programa `d3v-sgd`, unutar kojega se pozivaju metode za izradu mreže konačnih elemenata. U izborniku programa *Grillage /Analysis* dodana je opcija *Generate FEM* koja otvara korisničko sučelje za izradu mreže konačnih elemenata, prikazano slikom 3.2. Ovo sučelje omogućuje odabir varijante mreže, odabir osi simetrije, unos imena i podešavanje svih dostupnih parametara za kontrolu mreže.



Slika 3.2 Korisničko sučelje za izradu mreže konačnih elemenata

Odabirom opcije *Generate mesh* unutar ovog grafičkog sučelja započinje automatska generacija mreže konačnih elemenata sljedećim koracima:

- 1.) Automatsko prepoznavanje simetričnosti modela i provjera izvedivosti mreže
- 2.) Identifikacija elemenata obuhvaćenih izradom mreže s obzirom na osi simetrije
- 3.) Izrada svojstava pločastih i grednih konačnih elemenata prema karakteristikama modela
- 4.) Izračun dimenzija konačnih elemenata lokalnim razmatranjem dijelova konstrukcije
- 5.) Usklađivanje dimenzija konačnih elemenata globalnim razmatranjem konstrukcije
- 6.) Izrada čvorova i pločastih konačnih elemenata na svim zonama oplata
- 7.) Izrada grednih konačnih elemenata svih ukrepa
- 8.) Izrada čvorova i pločastih konačnih elemenata na svim segmentima jakih nosača
- 9.) Spajanje mreže ispravkom preklapanja čvorova duž rubova elemenata konstrukcije
- 10.) Ispravak preklapanja konačnih elemenata prirubnica jakih nosača
- 11.) Identifikacija i postavljanje rubnih uvjeta prema osi simetrije
- 12.) Izrada slučaja opterećenja prema zadanom projektom tlaku

Prvi korak provjere modela je opisan u četvrtom poglavlju, a određivanje opsega mreže (koraci 2 i 3) u petom poglavlju. Određivanje dimenzija mreže konačnih elemenata (koraci 4 i 5) je opisano u šestom poglavlju. Postupak izrade mreže konačnih elemenata (koraci 6 – 10) je opisan u sedmom poglavlju. Postavljanje rubnih uvjeta i opterećenja (koraci 11 i 12) je opisano u osmom poglavlju.

3.1 Struktura klasa modula za izradu mreže konačnih elemenata

Struktura klasa (eng. *class*) programskog koda je izrađena korištenjem principa SOLID za objektno orijentirano programiranje. Prema prvom principu jedne odgovornosti (eng. *Single responsibility*), svaka klasa treba imati samo jednu odgovornost tj. glavnu ili jedinu funkcionalnost koju mora dobro odrađivati. Korištenjem ovog principa se olakšava izmjena programskog koda i ispitivanje njegovih pojedinih dijelova, jer se može lako utvrditi koja klasa je odgovorna za koji zadatak [10]. Slijedeći ove principe, izvedena je implementacija modula za izradu mreže konačnih elemenata koji sadrži sljedeće klase:

- `ModelCheck` - provjera učitano modela za osi simetrije i izvedivost izrade mreže
- `MeshExtent` - određivanje opsega izrade mreže konačnih elemenata na modelu
- `MeshSize` - određivanje dimenzija i broja konačnih elemenata
- `PlateMesh` - izrada mreže konačnih elemenata na jednoj zoni oplata
- `SegmentMesh` - izrada mreže konačnih elemenata na jednom segmentu
- `GrillageMesh` - izrada mreže konačnih elemenata na cijelom modelu

Primjenom oblikovnog obrasca *Template method* je definirana struktura algoritma za izradu mreže konačnih elemenata, koji opisuje fiksni proces u kojemu pojedini koraci mogu biti drugačiji. Ovo se postiže izradom podklasa (eng. *subclass*) za redefiniciju pojedinih dijelova, što ne mijenja osnovnu strukturu algoritma [6]. Kako bi se omogućilo jednostavno dodavanje različitih načina izrade mreže konačnih elemenata, prema ovom obrascu su izrađene podklase koji nasljeđuju zajedničke metode unutar sljedećih baznih klasa (eng. *base class*):

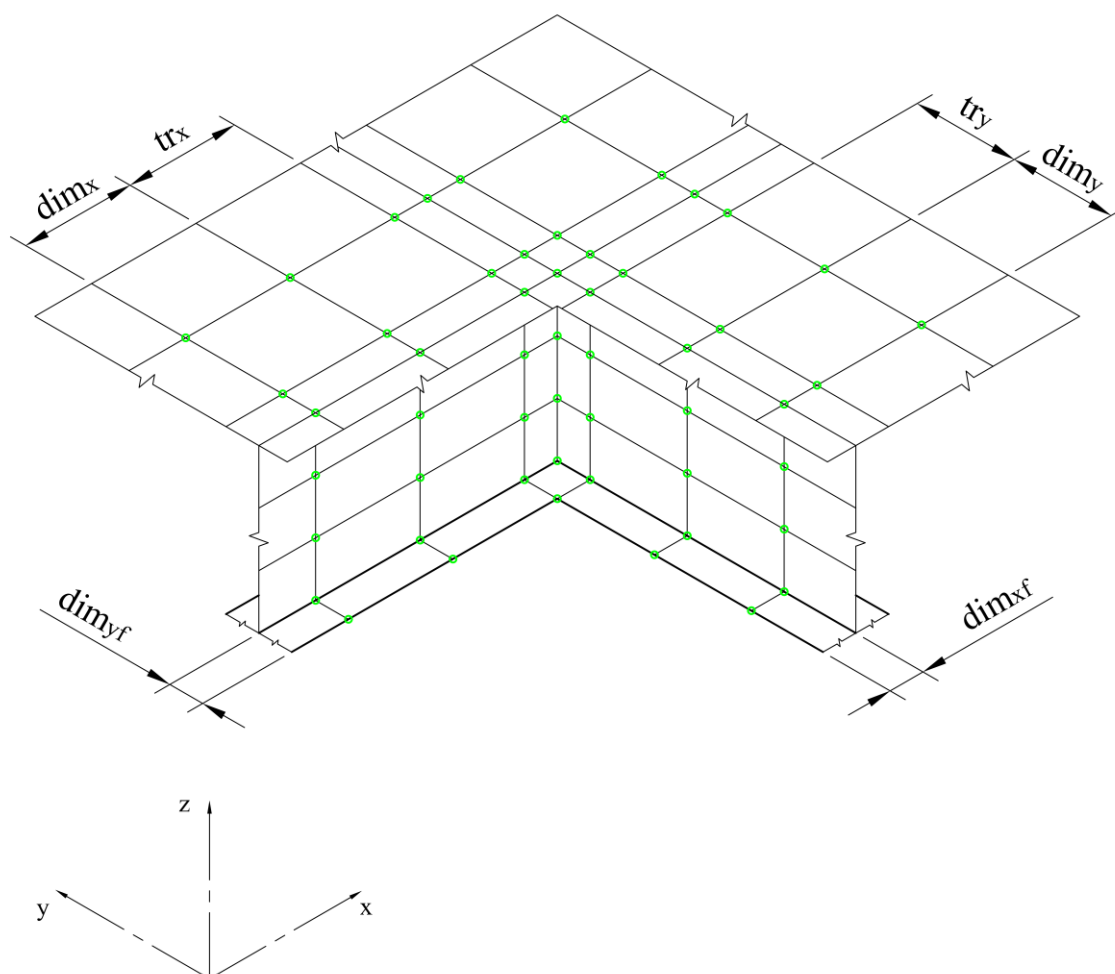
- `MeshSize`: `ElementSizeV1` i `ElementSizeV2` – određivanje dimenzija konačnih elemenata specifičnih za varijante mreže *V1* i *V2*
- `SegmentMesh`: `SegmentMeshV1` i `SegmentMeshV2` – načini izrade mreže konačnih elemenata na segmentima, specifični za varijante mreže *V1* i *V2*
- `GrillageMesh`: `MeshVariantV1` i `MeshVariantV2` - izrada mreže konačnih elemenata pojedine varijante mreže *V1* ili *V2*

Primjenom obrasca *Template method* se ujedno slijedi princip otvoren-zatvoren (eng. *open – closed*), prema kojemu je programski kod otvoren za proširenje, ali zatvoren za izmjene. Ovo znači da je proširenje koda npr. dodavanjem nove varijante mreže moguće bez potrebe za izmjenom ili preinakom postojećih metoda. U prilogu I, slika 1-2 prikazuje UML dijagram klasa programskog koda `grillage_mesher.py`.

3.2 Karakteristike i ograničenja varijanti mreža konačnih elemenata

3.2.1 Varijanta mreže VI

Prva varijanta mreže VI koristi tehniku preslikavanja elementa prirubnica jakih nosača na oplatu. Time su mreža oplate i prirubnica usko povezani, a određivanjem ovakve mreže oplate je također istovremeno definirana cijela mreža konačnih elemenata prirubnica. Slikom 3.3 je prikazan koncept varijante mreže VI na spoju dva jaka T nosača, gdje je vidljiv način preslikavanja elemenata prirubnice na mrežu opločenja.

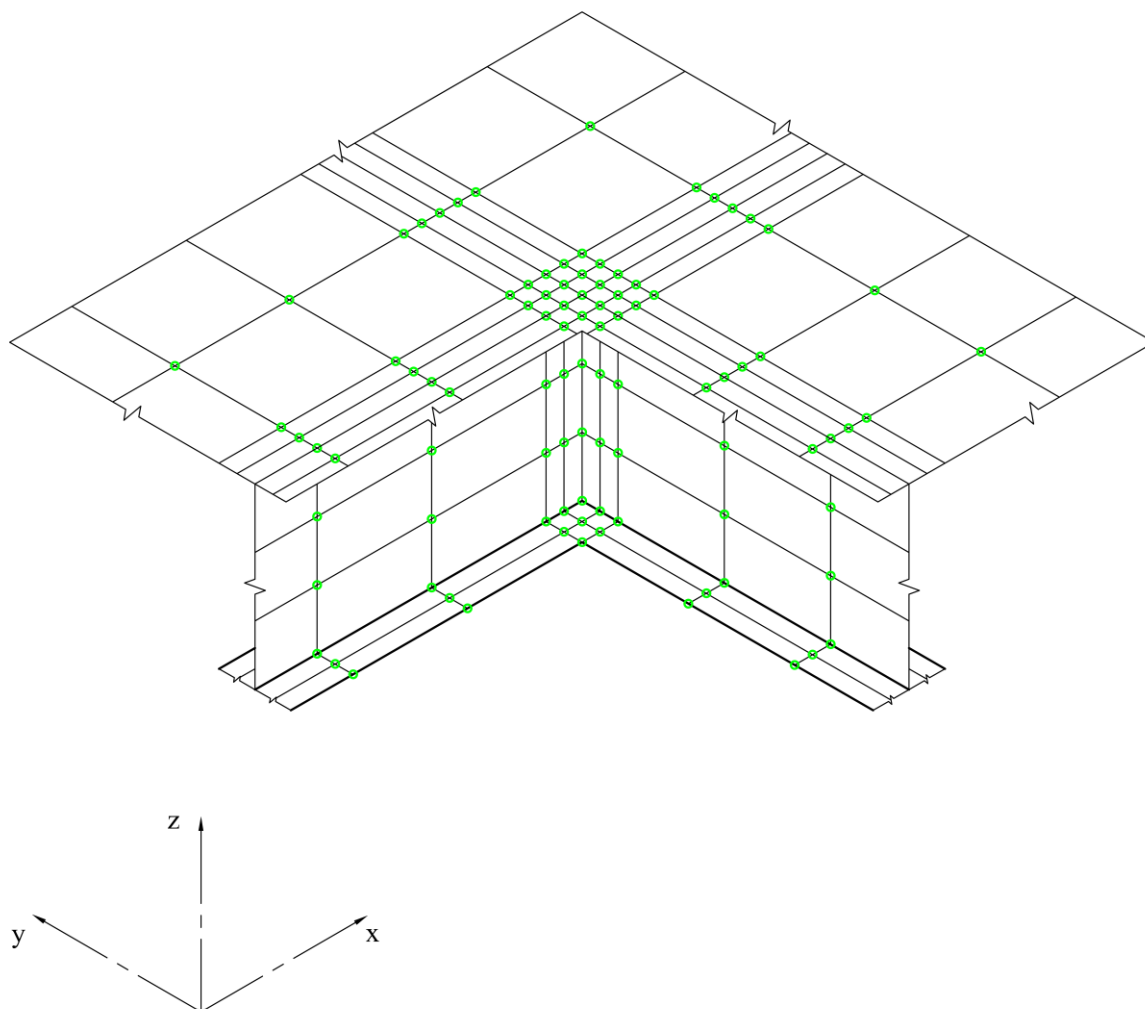


Slika 3.3 Koncept varijante mreže VI, jedan element po širini prirubnice

Ograničenja varijante VI su sljedeća:

- 1) Širine prirubnica moraju biti jednake duž cijelog jakog nosača
- 2) Visine svih jakih nosača moraju biti jednake, a prirubnice im biti u istoj ravnini

Glavni nedostaci varijante VI su povišena gustoća mreže konačnih elemenata oko spoja opločenja sa strukovima jakih nosača i nezadovoljavajući aspektni odnos preslikanih elemenata prirubnice na opločenje. Ovo je posebno izraženo kod grubljih mreža konačnih elemenata uz odabir većeg broja elemenata po širini prirubnice, što je vidljivo na Slici 3.4.

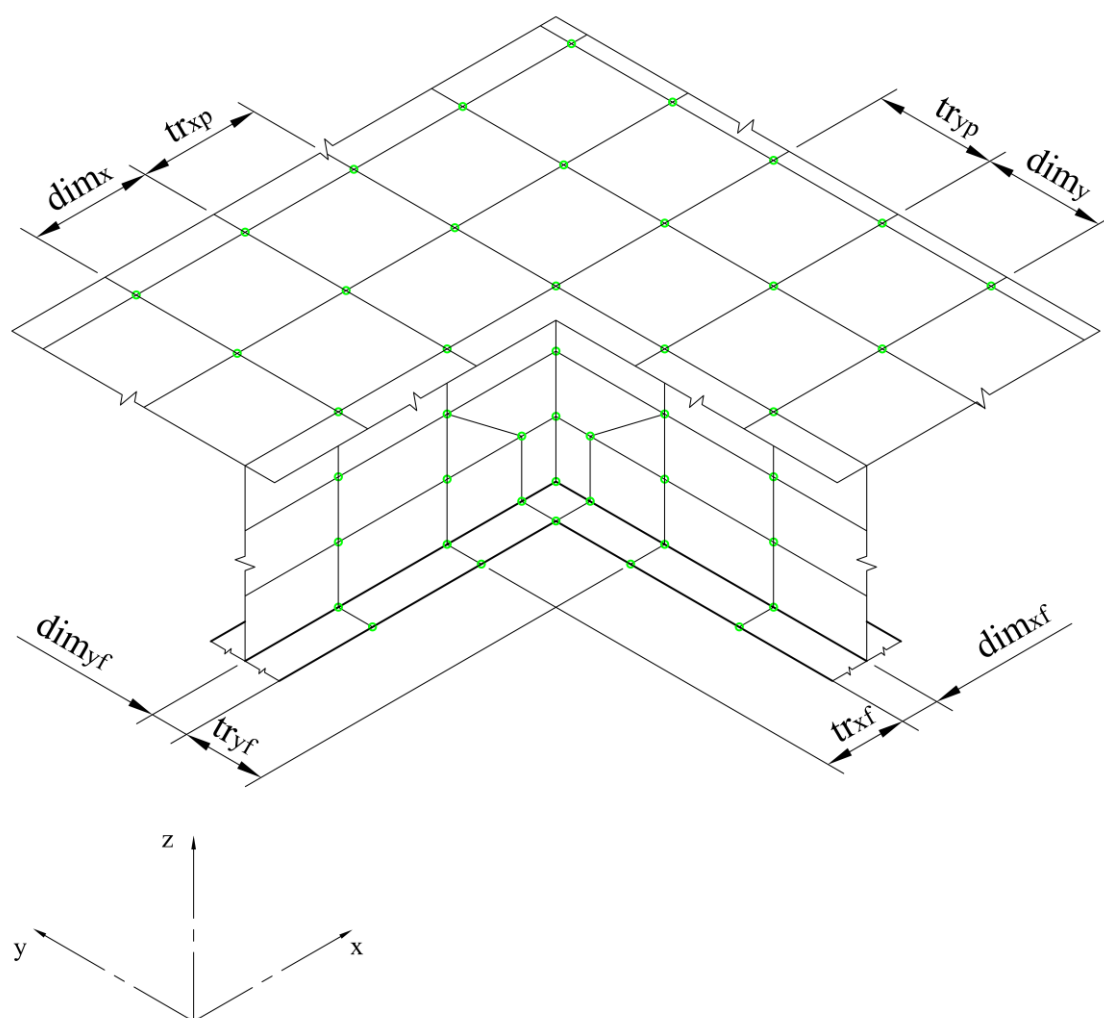


Slika 3.4 Koncept varijante mreže VI, dva elementa po širini prirubnice

Prednost varijante VI je iznimno robustan algoritam koji uspješno generira vrlo fine mreže konačnih elemenata i nema ograničenje minimalne dimenzije elemenata. Prilikom testiranja na ispitnim varijantama konstrukcije, korištenjem ovog algoritma su generirane mreže sa više od 90000 elemenata i dimenzijama elemenata reda veličine $3/2 t$. Ograničenje koje se javlja kod izrade ovako finih mreža je vrijeme čekanja za izradu i prikaz, koje može potrajati do nekoliko minuta ovisno o računalnim kapacitetima.

3.2.2 Varijanta mreže V2

Drugom varijantom mreže V2 se nastoji smanjiti utjecaj preklapanja prirubnica jakih nosača na mrežu oplata tako što se eliminira preslikavanje elemenata prirubnica na oplatu. Na ovaj način varijanta V2 omogućuje izradu mreže na jakim nosačima koji nemaju konstantnu širinu prirubnice. Postupak određivanja dimenzija elemenata oplata je time značajno jednostavniji i rezultira pravilnijom mrežom opločenja. S druge strane, izrada mreže konačnih elemenata na prirubnicama i strukovima jakih nosača postaje složenija zbog potrebe za prijelazom mreže. Ovaj prijelaz mreže se izvodi kombinacijom deformiranih četvrtastih i trokutastih konačnih elemenata u prijelaznom redu elemenata. Slikom 3.5 je prikazan koncept varijante mreže V2 na spoju dva jaka T nosača, gdje je vidljiv prijelaz mreže.



Slika 3.5 Koncept varijante mreže V2

Ograničenja varijante V2 su sljedeća:

- 1) Visine svih jakih nosača moraju biti jednake, a prirubnice im biti u istoj ravnini
- 2) Broj elemenata po širini prirubnice je ograničen na 1
- 3) Dimenzije konačnih elemenata imaju donju granicu

Zbog složenosti prijelaza mreže u slučaju kada je broj elemenata po širini prirubnice veći od 1, za varijantu mreže V2 se usvaja ograničenje od jednog elementa po širini prirubnice. Donja granica dimenzije konačnih elemenata proizlazi iz dimenzija prijelaznih konačnih elemenata prirubnice i širina prirubnica okomitih na promatrani segment. Ovo ograničenje je opisano u poglavlju 6.3.2.

Varijanta mreže V2 zbog navedenih ograničenja nije prikladna za generaciju fine mreže konačnih elemenata. Prilikom korištenja ove varijante se preporuča zadržavanje inicijalnih kontrolnih parametara, postavljenih prema preporukama *Lloyd's Register* i zajedničkim konstrukcijskim pravilima *IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers*. U slučaju izrade finijih mreža konačnih elemenata je potrebna pažljiva provjera izvedenog prijelaznog reda konačnih elemenata. Programski kod sadrži automatske provjere izvedivosti varijante mreže V2, koje će zaustaviti program i javiti grešku u predviđenim situacijama kada je poznato da varijanta neće generirati zadovoljavajuću mrežu konačnih elemenata. Međutim u okviru ovog rada nisu provjerene sve moguće permutacije nestandardnih roštiljnih konstrukcija i kontrolnih parametara za izradu mreže, te postoji mogućnost za neočekivane rezultate.

Prednost varijante mreže V2 je značajno pravilnija mreža i zadovoljavajući aspekti odnos elemenata opločenja kod grubljih mreža konačnih elemenata. Zbog prijelaznog reda elemenata varijanta V2 također omogućuje izradu mreže konačnih elemenata na jakim nosačima sa različitim širinama prirubnica pojedinih segmenata.

4. IZRADA MKE MODELA SIMETRIČNE KONSTRUKCIJE

Na razini globalnog razmatranja roštiljne konstrukcije postoji mogućnost jednostruke ili dvostruke simetrije, što se uzima u obzir prilikom izrade mreže konačnih elemenata. Programski kod unutar klase `ModelCheck` sadrži niz algoritama za automatsko prepoznavanje osi simetrija učitano modela. S obzirom na globalni parametar osi simetrije AOS (eng. *Axis of Symmetry*) moguće je generirati sljedeće vrste mreža konačnih elemenata:

- Puna - nesimetričan model, nema osi simetrije
- Polovična - postoji uzdužna ili poprečna os simetrije
- Četvrtinska - postoji obostrana simetrija

Automatski prepoznatu os simetrije je moguće poništiti odabirom parametra osi simetrije `axis_of_symm_override` i na taj način izraditi mrežu za željenu vrstu modela. Ovaj parametar može poprimiti sljedeće vrijednosti, za različite osi simetrije:

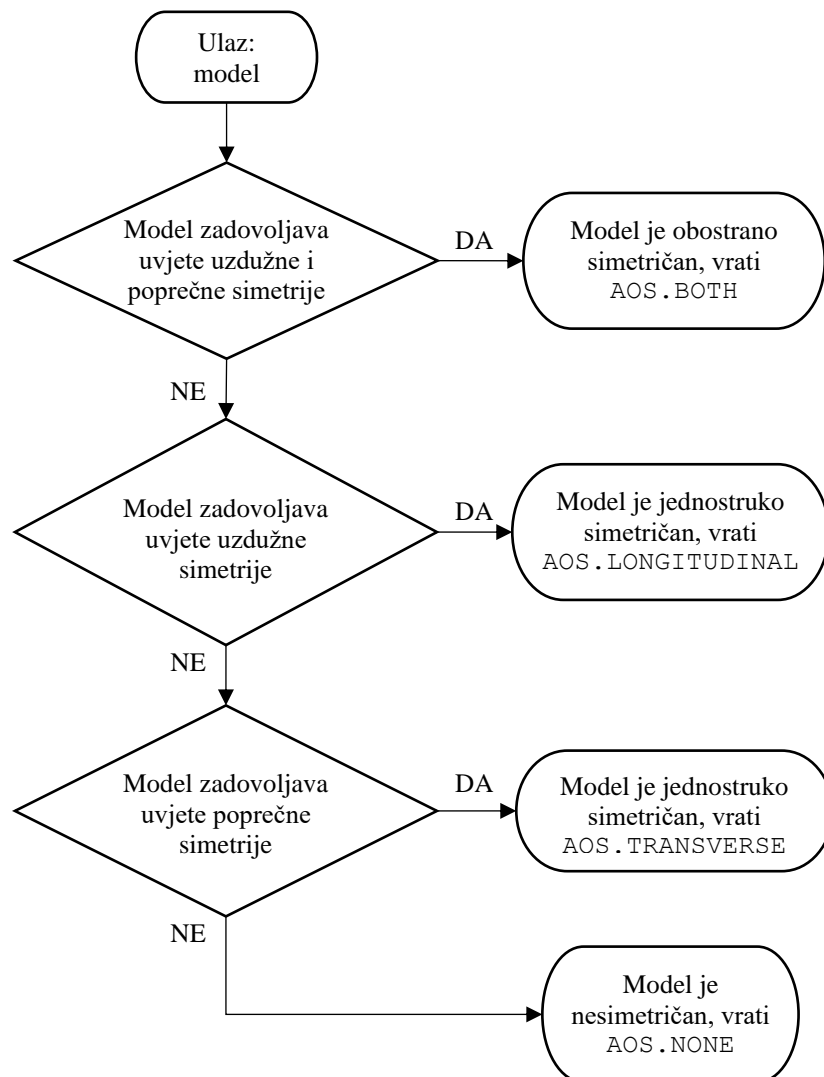
- Uzdužna os simetrije: `AOS.LONGITUDINAL`
- Poprečna os simetrije: `AOS.TRANSVERSE`
- Obostrana simetrija: `AOS.BOTH`
- Nema osi simetrije: `AOS.NONE`

4.1 Algoritam za prepoznavanje osi simetrija modela

Prepoznavanje osi simetrija se temelji na nizu testova kojima se zasebno određuje postoji li uzdužna ili poprečna os simetrije. Ukoliko svi testovi simetrije vraćaju istinitu vrijednost, prepoznata je obostrana simetrija. Alternativno ako samo testovi uzdužne ili poprečne simetrije vraćaju istinitu vrijednost, prepoznata je odgovarajuća jednostruka simetrija. Konačno ako ne prolaze testovi niti uzdužne niti poprečne simetrije, radi se o nesimetričnom modelu. Testovi simetrije uključuju sljedeće provjere:

- 1.) Relativne koordinate simetričnih jakih nosača
- 2.) Pozicija centralnog jakog nosača za neparan broj nosača
- 3.) Debljina lima, karakteristike ukrepa i smjer ukrepa na simetričnim zonama oplata
- 4.) Svojstva simetričnih segmenata jakih nosača

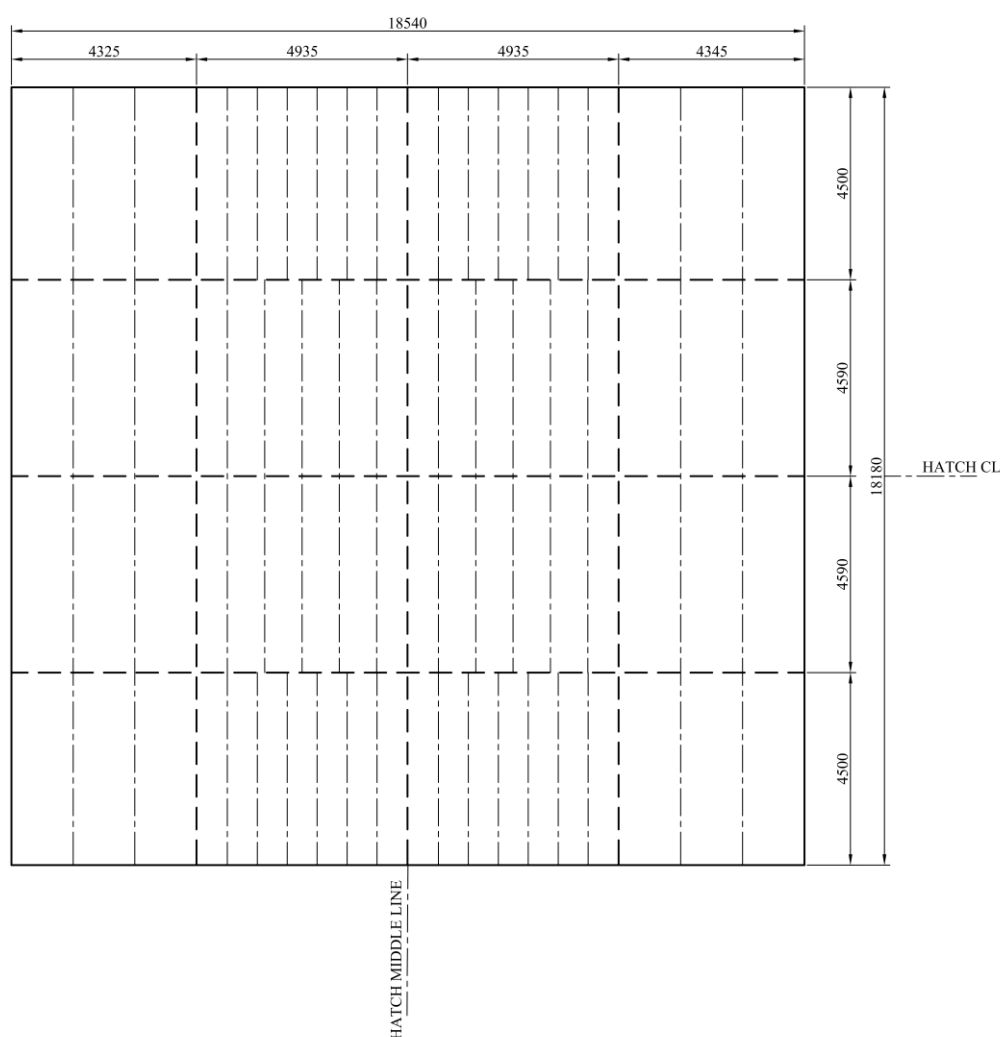
Metode `long_symmetry_tests` i `tran_symmetry_tests` omogućuju jednostavno dodavanje dodatnih testova simetrije u listu. Kada svi testovi simetrije odgovarajućeg smjera unutar ove liste vraćaju istinitu vrijednost, model je simetričan oko te osi. Dijagram toka konačne metode `assign_symmetry` za identifikaciju simetrije modela prikazan je slikom 4.1.

Slika 4.1 Dijagram toka metode `assign_symmetry`

Važno je napomenuti da ručnim odabirom parametra osi simetrije nije moguće generirati mrežu konačnih elemenata uz os simetrije koja na modelu zapravo ne postoji. Ako algoritam za identifikaciju osi simetrije npr. prepozna uzdužnu simetriju, dozvoljen je samo ručni odabir izrade mreže na punom modelu. Kada bi se u ovom slučaju ručno odabrala izrada mreže sa poprečnom osi simetrije, program će vratiti odgovarajuću grešku s porukom da izrada mreže nije moguća za tu ručno odabranu os simetrije.

4.2 Algoritam za provjeru izvedivosti mreže

Metoda `mesh_feasibility` osigurava da na konstrukciji ne postoji nelogično zadan mješoviti sustav orebrenja za koji implementiranim algoritmima nije moguće izraditi mrežu konačnih elemenata. Prema ovoj provjeri, zone oplata između dva susjedna jaka nosača ne smiju imati istu orijentaciju ukrepa paralelnu sa promatranim jakim nosačima i različiti razmak ukrepa. Ukoliko ovaj uvjet nije zadovoljen, metoda prekida program prije određivanja granica izrade mreže konačnih elemenata i vraća odgovarajuću grešku. Primjer varijante konstrukcije sa ovakvim nedopuštenim mješovitim sustavom orebrenja za koju nije moguća generacija mreže je prikazan slikom 4.2.

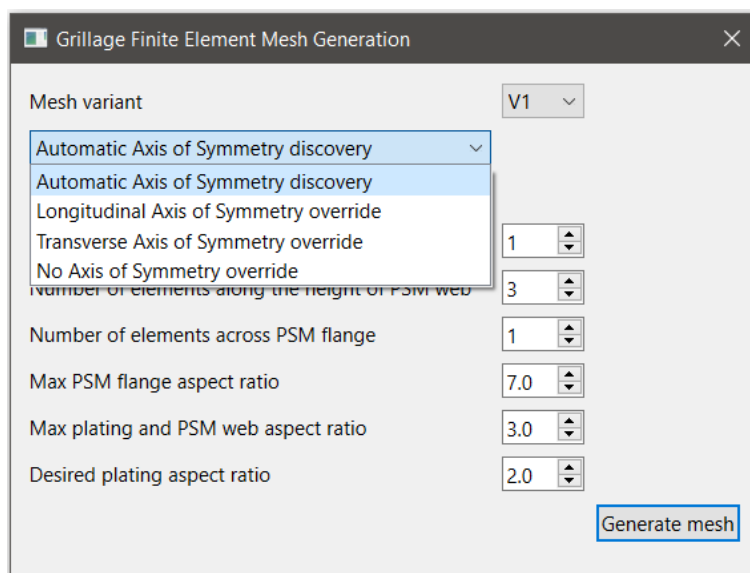


Slika 4.2 Primjer nedopuštenog mješovitog sustava orebrenja

Program će za ovaj primjer nedopuštenog mješovitog sustava orebrenja prepoznati isti smjer i različiti razmak ukrepa, te će vratiti grešku da se oni ne poklapaju na zonama oplata 2 i 6.

5. INICIJALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA MREŽE KONAČNIH ELEMENATA

Kako bi se započeo proračun dimenzija elemenata mreže, potrebno je odrediti na kojim dijelovima konstrukcije će se izrađivati mreža i kakva će ona biti. Klasa `MeshExtent` sadrži niz metoda u kojima su implementirani algoritmi koji određuju granice izrade mreže konačnih elemenata, posebno za zone oplata i posebno za segmente jakih nosača. Ovaj korak određivanja granica mreže ovisi o već spomenutom izbornom parametru `axis_of_symm_override`, koji je moguće odabrati kroz korisničko sučelje za izradu mreže konačnih elemenata prikazano slikom 5.1. Ako ovaj izborni parametar nije zadan, tj. ako je u korisničkom sučelju ostavljena inicijalno odabrana opcija, koristi se automatski prepoznata os simetrije pomoću metode `assign_symmetry`.



Slika 5.1 Odabir osi simetrije u korisničkom sučelju

Klasa `MeshExtent` također sadrži metode koje prepoznaju korištena svojstva ploča i greda na modelu konstrukcije. Na temelju njih se izrađuju nova svojstva materijala, ploča i greda koja će biti korištena prilikom izrade pločastih i grednih konačnih elemenata.

Zbog mogućnosti da se ukrepa nađe na osi simetrije, postoje zasebne metode za izradu polovičnih svojstava grednih elemenata svakog dostupnog tipa profila. Prilikom izrade svojstva pločastih konačnih elemenata za T i L nosače se zasebno razmatraju i izrađuju svojstva za struk i prirubnicu. Za svako jedinstveno svojstvo ploče ili grede koje je korišteno na modelu konstrukcije se izrađuje novo ekvivalentno svojstvo tipa `GeoFEM` za dodjelu pločastim i grednim konačnim elementima.

5.1 Algoritmi za identifikaciju zona oplate s obzirom na osi simetrije

Na razini pojedine zone oplate su moguće sljedeće mogućnosti izrade mreže konačnih elemenata:

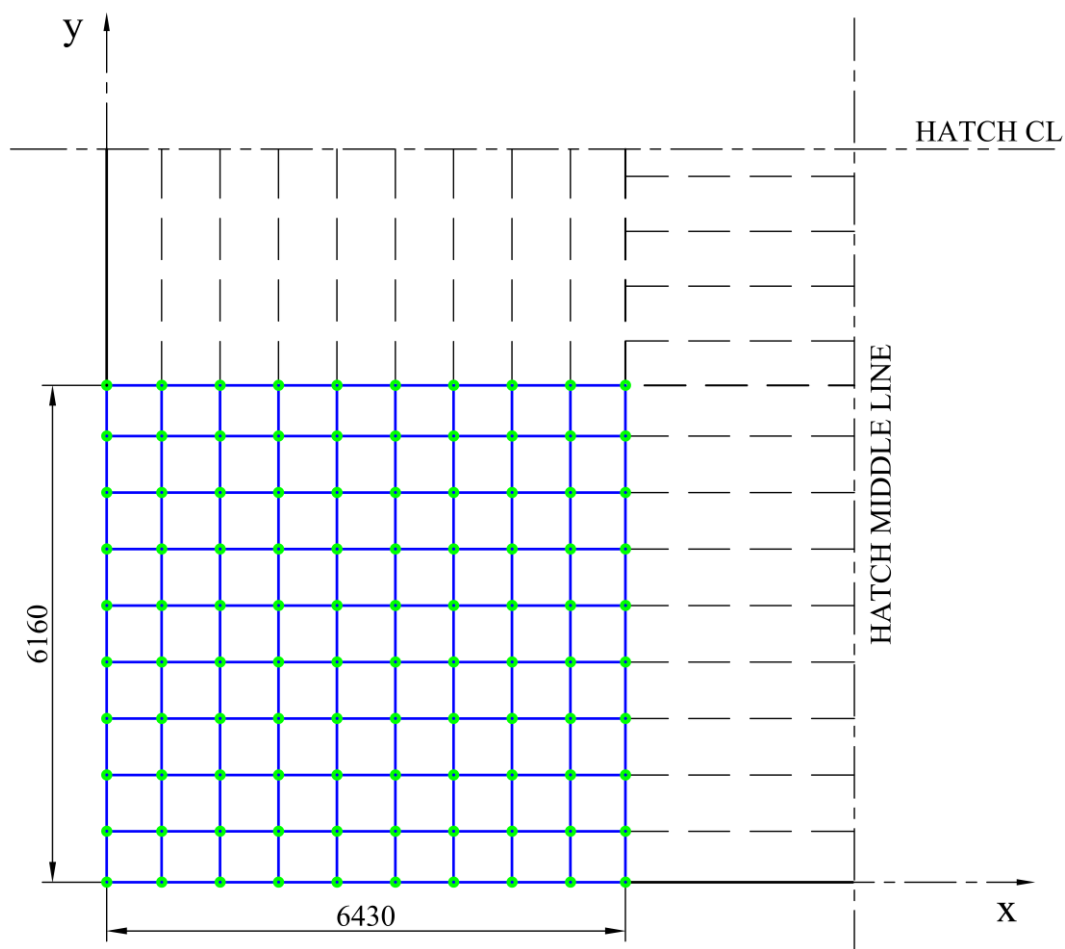
- 1.) Puna mreža – izrada mreže na cijeloj zoni oplate
- 2.) Uzdužna polovična – izrada mreže na uzdužnoj polovici zone oplate
- 3.) Poprečna polovična – izrada mreže na poprečnoj polovici zone oplate
- 4.) Četvrtinska - izrada mreže na jednoj četvrtini zone oplate

S obzirom na os simetrije modela konstrukcije, moguće su sljedeće permutacije izrade mreže na pojedinoj zoni oplate:

- 1.) Uzdužna os simetrije (AOS . LONGITUDINAL)
 - Zone sa punom mrežom
 - Zone sa uzdužnom polovičnom mrežom
- 2.) Poprečna os simetrije (AOS . TRANSVERSE)
 - Zone sa punom mrežom
 - Zone sa poprečnom polovičnom mrežom
- 3.) Obostrana simetrija (AOS . BOTH)
 - Zone sa punom mrežom
 - Zone sa uzdužnom polovičnom mrežom
 - Zone sa poprečnom polovičnom mrežom
 - Zona sa četvrtinskom mrežom
- 4.) Nema osi simetrije (AOS . NONE)
 - Zone sa punom mrežom

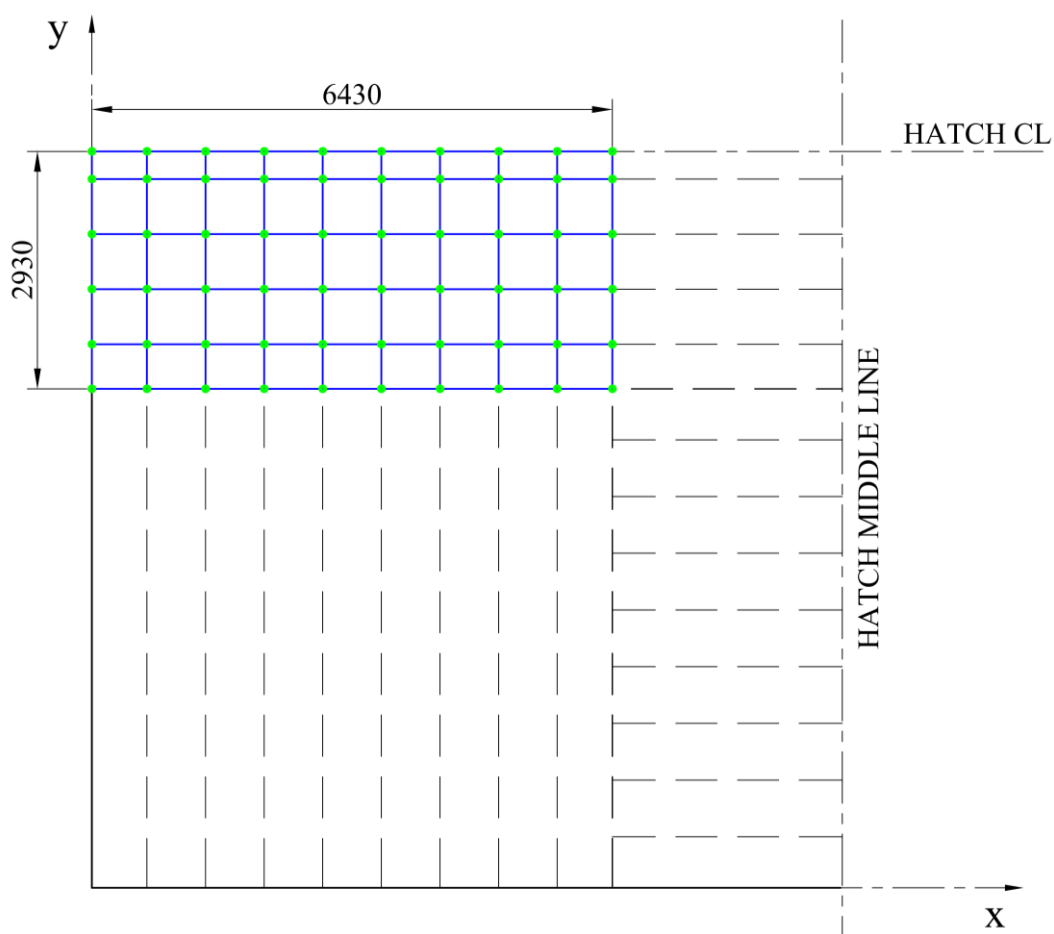
Kako bi se obuhvatile sve moguće kombinacije, izrađeno je sedam zasebnih algoritama za identifikaciju različitih mogućnosti izrade mreže na pojedinoj zoni oplate. Za ispitivanje ovih algoritama je odabrana obostrano simetrična ispitna varijanta konstrukcije `hc_var_4`, koja ima 4 jaka uzdužna i poprečna nosača, a time na polovičnom modelu ova konstrukcija sadrži sve četiri mogućnosti različitih mreža zona oplate. U nastavku će upravo na primjeru četvrtinskog modela ove ispitne varijante biti prikazani različiti slučajevi za varijantu mreže konačnih elemenata V_2 i navedene metode za identifikaciju.

Slika 5.2 prikazuje punu mrežu zone oplata broj 1, na četvrtinskom modelu ispitne varijante hc_var_4. U slučaju ovakve obostrano simetrične konstrukcije, zone oplata za izradu pune mreže se identificiraju metodom `identify_both_full_plate_zones`. U slučaju uzdužne simetrije, koristi se metoda `identify_long_full_plate_zones`, a za poprečno simetrične konstrukcije metoda `identify_tran_full_plate_zones`. Svaka od ovih metoda identificiranu zonu oplata sprema u rječnik `full_plate_zones`.



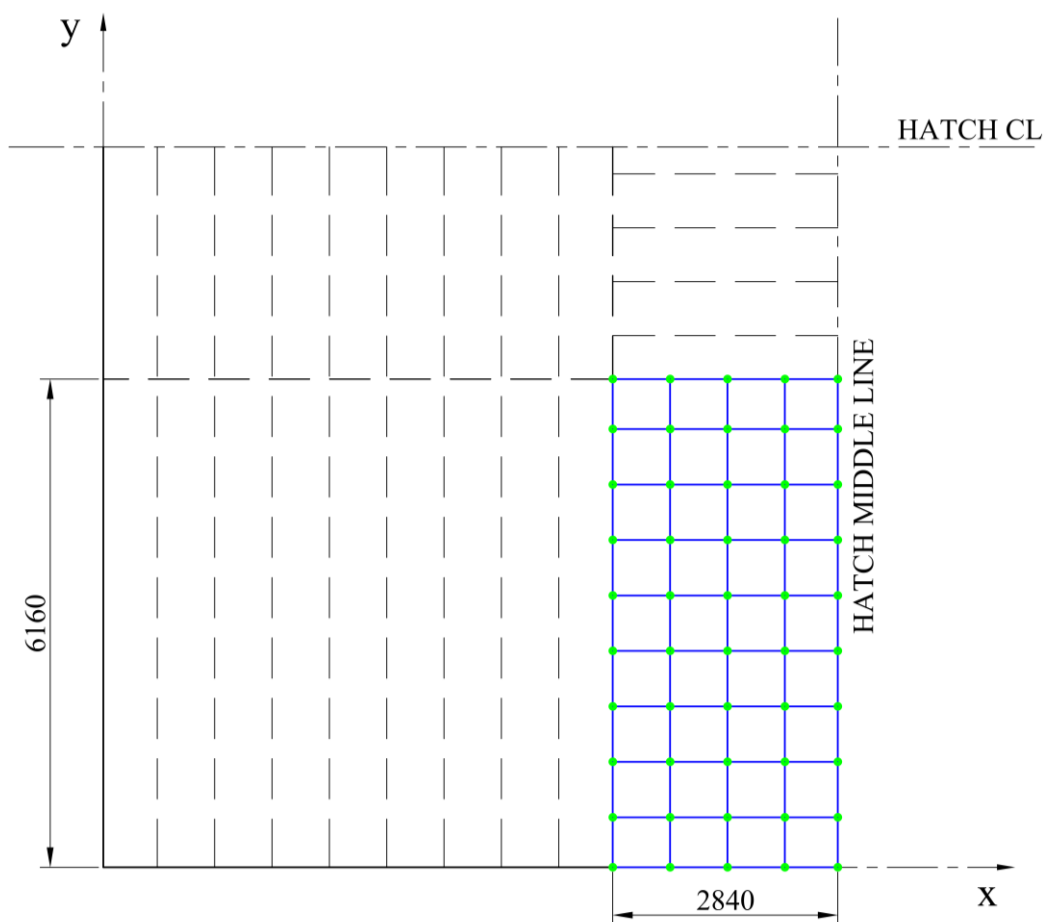
Slika 5.2 Puna mreža zone oplata, četvrtinski model hc_var_4

Slika 5.3 prikazuje uzdužnu polovičnu mrežu zone oplate broj 4, na modelu ispitne varijante hc_var_4. U slučaju obostrano simetrične konstrukcije, zone oplate za izradu uzdužne polovične mreže se identificiraju metodom `identify_both_half_plate_zones`, dok se za uzdužnu osi simetrije koristi metoda `identify_long_half_plate_zones`. Svaka od ovih metoda identificiranu zonu oplate sprema u rječnik `long_half_plate_zones`. Konstrukcije koje imaju isključivo poprečnu os simetrije ne mogu imati uzdužnu polovičnu mrežu zone oplate, stoga metoda za identifikaciju tog slučaja ne postoji.



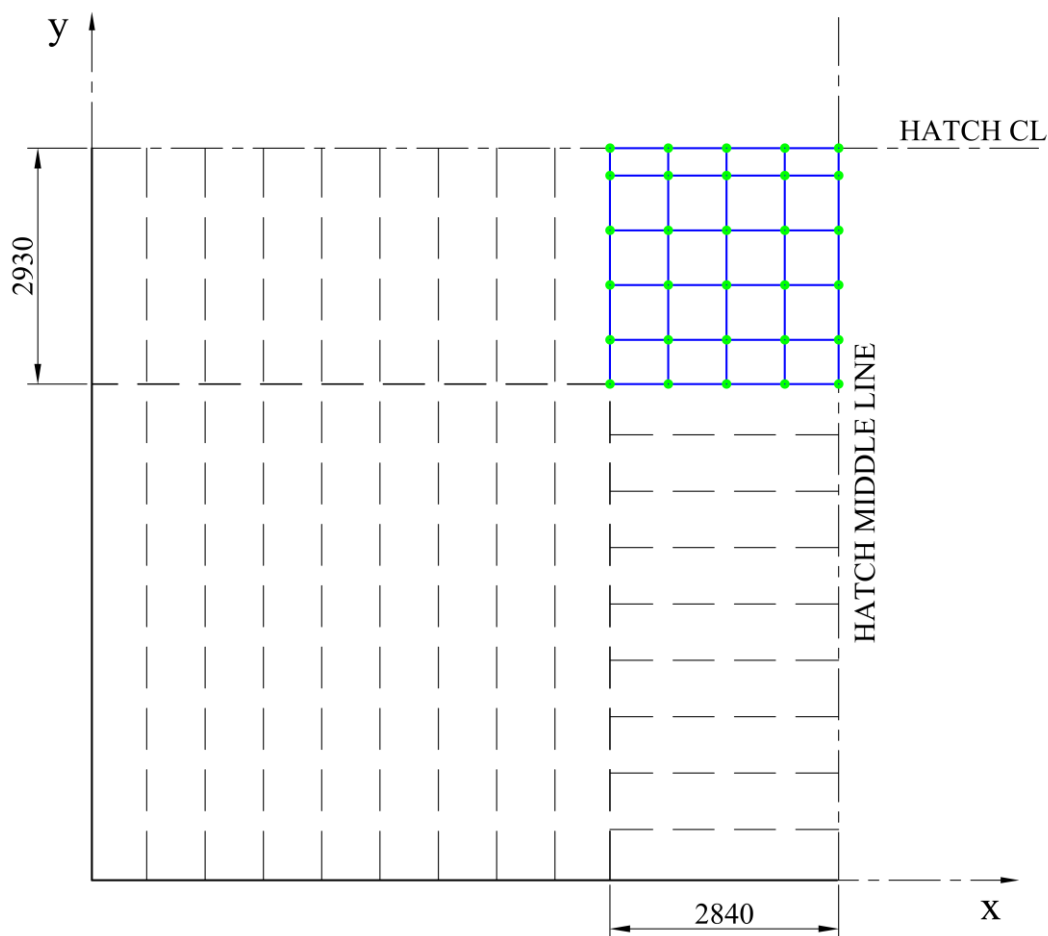
Slika 5.3 Uzdužna polovična mreža zone oplate, četvrtinski model hc_var_4

Slika 5.4 prikazuje poprečnu polovičnu mrežu zone oplata broj 2, na modelu ispitne varijante hc_var_4. U slučaju obostrano simetrične konstrukcije, zone oplata za izradu poprečne polovične mreže se identificiraju metodom `identify_both_half_plate_zones`, dok se za poprečnu osi simetrije koristi metoda `identify_tran_half_plate_zones`. Svaka od ovih metoda identificiranu zonu oplata sprema u rječnik `tran_half_plate_zones`. Konstrukcije koje imaju isključivo uzdužnu os simetrije ne mogu imati poprečnu polovičnu mrežu zone oplata, stoga metoda za identifikaciju tog slučaja ne postoji.



Slika 5.4 Poprečna polovična mreža zone oplata, četvrtinski model hc_var_4

Slika 5.5 prikazuje četvrtinsku mrežu zone oplate broj 5, na modelu ispitne varijante hc_var_4. Ovakav tip mreže zone oplate je moguć samo u slučaju obostrane simetrije sa parnim brojem jakih uzdužnih i poprečnih nosača. Metoda za identifikaciju zone oplate sa ovakvom mrežom je `identify_quarter_plate_zone`. Iako je moguće identificirati samo jednu zonu oplate u ovakvom slučaju, ta zona oplate se zbog dosljednosti sa ostalim metodama sprema u rječnik `quarter_plate_zone`.



Slika 5.5 Četvrtinska mreža zone oplate, četvrtinski model hc_var_4

Metodom `grillage_plate_extent` se pozivaju sve navedene metode za identifikaciju tipa mreže na pojedinoj zoni oplate, u ovisnosti o automatski prepoznatoj ili odabranoj osi simetrije. Ukoliko model konstrukcije nije simetričan oko niti jedne osi ili je odabrana izrada mreže na cijelom modelu, u rječnik `full_plate_zones` se upisuju sve zone oplate koje se nalaze na modelu unutar rječnika `plating`.

5.2 Algoritmi za identifikaciju jakih nosača s obzirom na osi simetrije

Odabir na kojim jakim nosačima će se izrađivati mreža, obzirom na osi simetrije se temelji na podjeli broja jakih nosača sa brojem dva i cjelobrojnim zaokruživanjem na prvu veću vrijednost. Na ovaj način je osigurano da će izrada mreže obuhvatiti jaki centralni nosač u slučaju neparnog broja jakih nosača. Moguće permutacije koji nosači će biti obuhvaćeni izradom mreže, s obzirom na odabranu os simetrije su sljedeće:

- 1.) Uzdužna ili obostrana simetrija (`AOS.LONGITUDINAL` ili `AOS.BOTH`)
 - Pola jakih uzdužnih nosača
 - Svi jaki poprečni nosači
- 2.) Poprečna ili obostrana simetrija (`AOS.TRANSVERSE` ili `AOS.BOTH`)
 - Pola jakih poprečnih nosača
 - Svi jaki uzdužni nosači

Metoda `longitudinal_psm_extent` za slučaj uzdužne ili obostrane simetrije konstrukcije određuje ukupan broj jakih uzdužnih nosača koji su obuhvaćeni izradom mreže, te vraća rječnik sa tim uzdužnim nosačima `longitudinals`. Ako je konstrukcija poprečno simetrična ili nema osi simetrije, metoda vraća cijeli rječnik svih uzdužnih nosača `longitudinal_members`. Analogno, metoda `transverse_psm_extent` za slučaj poprečne ili obostrane simetrije vraća rječnik poprečnih nosača `transversals`, a ako je konstrukcija uzdužno simetrična ili nema osi simetrije, metoda vraća rječnik svih poprečnih nosača `transverse_members`.

5.3 Algoritmi za identifikaciju segmenata s obzirom na osi simetrije

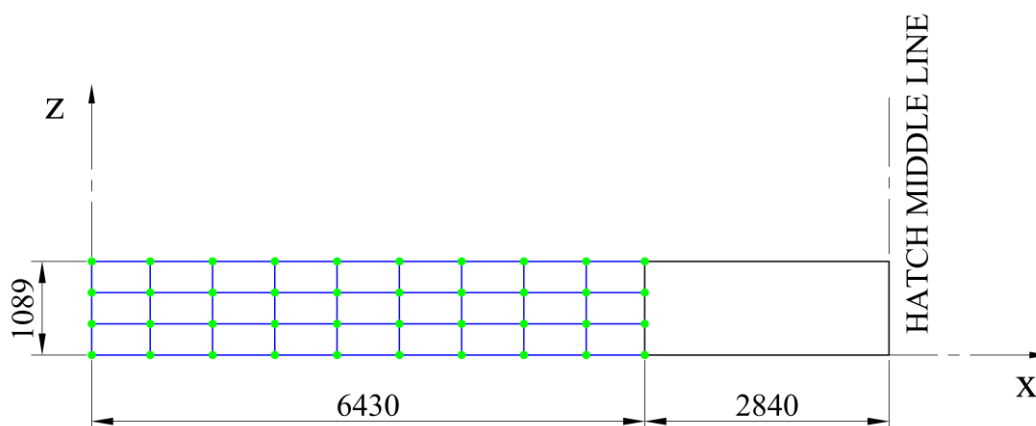
Identifikacija vrste mreže na segmentu je bitan podatak za ispravno određivanje broja konačnih elemenata na strukovima i prirubnicama jakih nosača. Na razini pojedinog segmenta jakog nosača su moguće dvije vrste mreže s obzirom na osi simetrije modela konstrukcije:

- 1.) Puna mreža – izrada mreže duž cijelog segmenta
- 2.) Polovična mreža – izrada mreže na polovici duljine segmenta

U ovisnosti o odabranoj ili automatski prepoznatoj osi simetrije, segmenti za izradu pune mreže konačnih elemenata se identificiraju sljedećim metodama:

- Uzdužna simetrija (`AOS.LONGITUDINAL`): `identify_long_full_segments`
- Poprečna simetrija (`AOS.TRANSVERSE`): `identify_tran_full_segments`
- Obostrana simetrija (`AOS.BOTH`): `identify_both_full_segments`
- Nema osi simetrije (`AOS.NONE`): `identify_none_full_segments`

Slika 5.6 prikazuje punu mrežu prvog segmenta jakog uzdužnog nosača na primjeru četvrtinske mreže konačnih elemenata ispitne varijante konstrukcije hc_var_5.

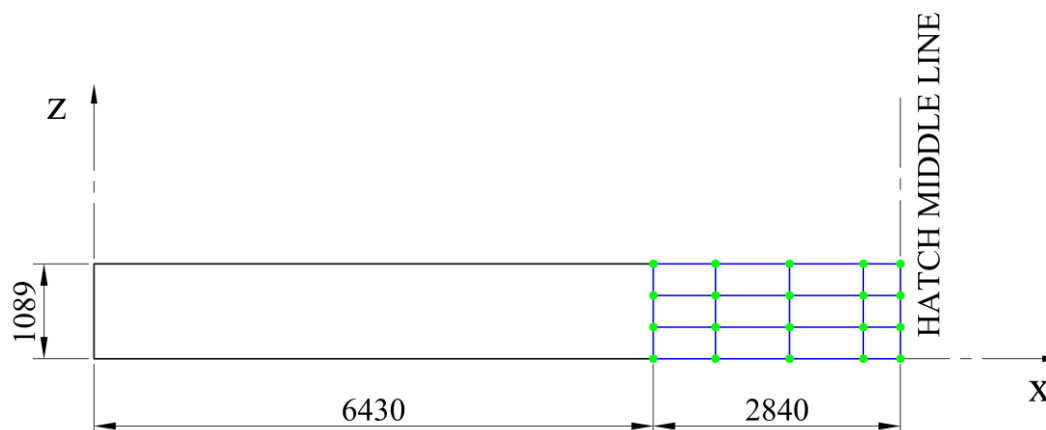


Slika 5.6 Puna mreža segmenta, četvrtinski model ispitne varijante hc_var_5

Polovična mreža konačnih elemenata segmenta postoji u slučaju osi simetrije koja je paralelna sa parnim brojem jakih nosača. Segmenti za izradu polovične mreže konačnih elemenata se identificiraju sljedećim metodama:

- Uzdužna simetrija (AOS.LONGITUDINAL): `identify_long_half_segments`
- Poprečna simetrija (AOS.TRANSVERSE): `identify_tran_half_segments`
- Obostrana simetrija (AOS.BOTH): `identify_both_half_segments`

Slikom 5.7 je prikazan primjer polovične mreže drugog segmenta jakog uzdužnog nosača na primjeru četvrtinske mreže konačnih elemenata ispitne varijante konstrukcije hc_var_5. Ova ispitna varijanta ima paran broj jakih uzdužnih i poprečnih nosača, pa u slučaju izrade mreže sa obostranom simetrijom postoje uzdužni i poprečni segmenti sa polovičnom mrežom.



Slika 5.7 Polovična mreža segmenta, četvrtinski model ispitne varijante hc_var_5

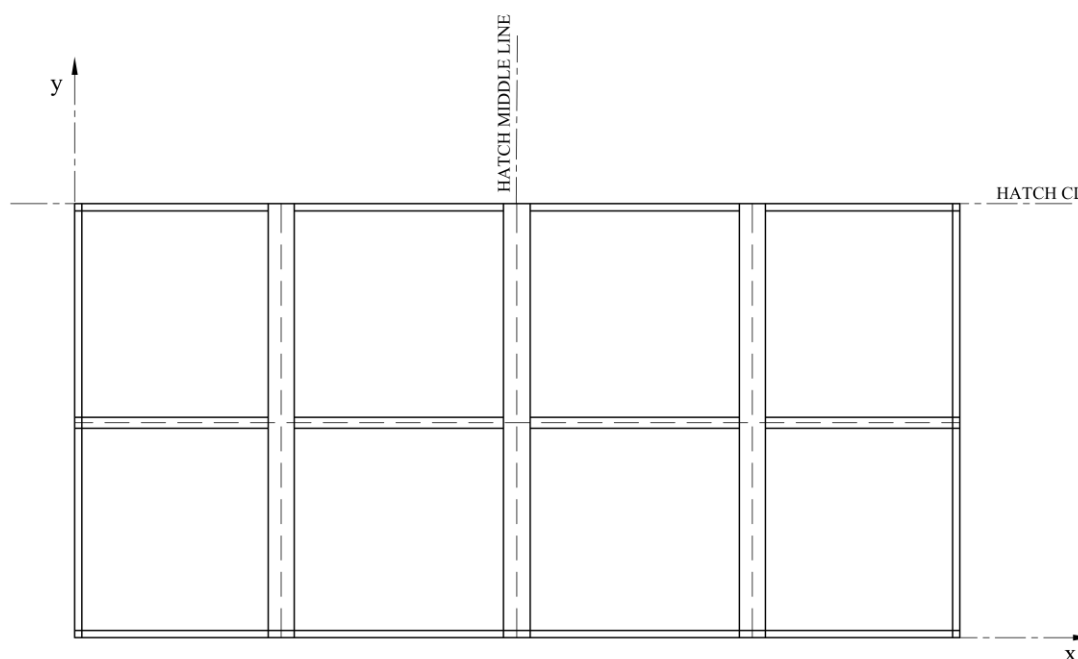
5.4 Algoritmi za prepoznavanje položaja osi simetrije

Položaj osi simetrije u odnosu na elemente konstrukcije modela je bitan podatak za ispravno određivanje broja konačnih elemenata, dodjelu svojstava konačnih elemenata i izradu mreže konačnih elemenata na ispravnoj strani prirubnice jakih nosača. Programski kod unutar klase `MeshExtent` sadrži algoritme koji obuhvaćaju provjeru za svaki od sljedećih slučajeva:

1. Jaki nosač se nalazi na osi simetrije
2. Ukrepa se nalazi na osi simetrije
3. Os simetrije prolazi između ukrepa

5.4.1 Jaki nosač na osi simetrije

U slučaju da se jaki nosač nalazi na os simetrije, konačnim elementima struka tog nosača je potrebno dodijeliti svojstvo sa upola manjom debljinom. Ukoliko je taj jaki nosač T profil, elementi prirubnice se izrađuju na samo jednoj strani. Slika 5.8 prikazuje primjer polovičnog modela ispitne varijante konstrukcije `hc_var_1` sa jakim uzdužnim nosačem na uzdužnoj osi simetrije.

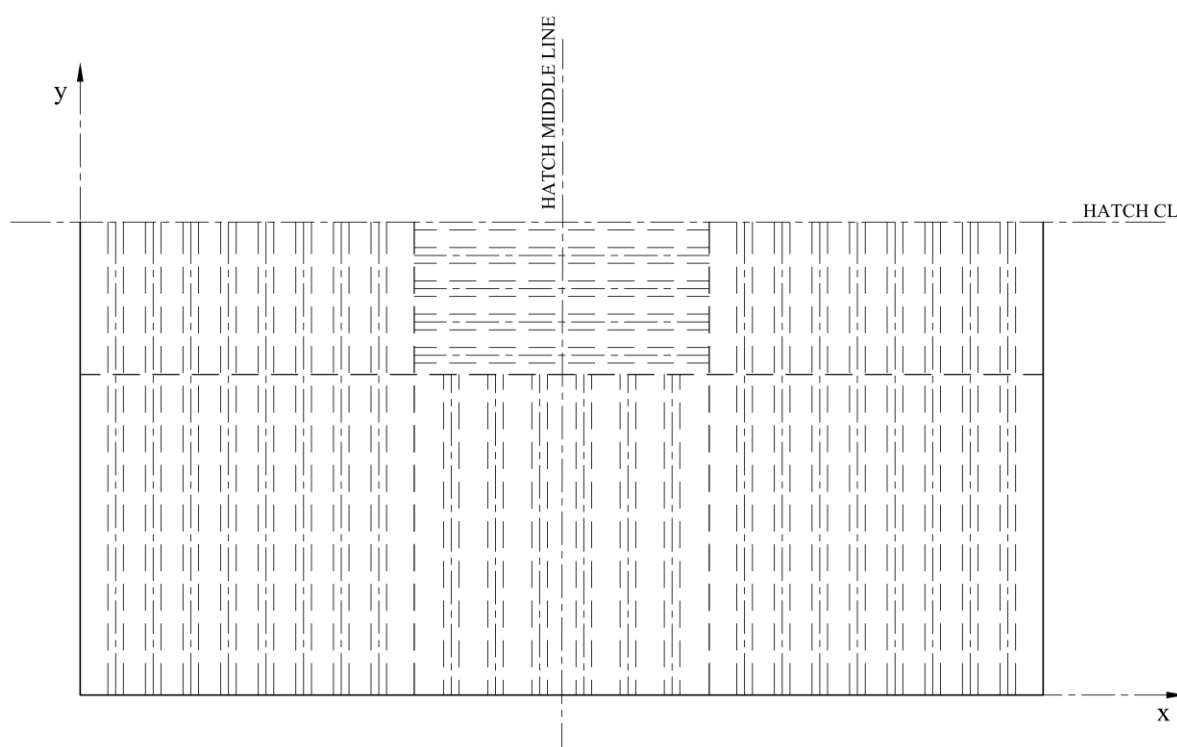


Slika 5.8 Jaki nosač na osi simetrije, polovični model ispitne varijante `hc_var_1`

Metodom `aos_on_segment` se identificiraju ovakvi slučajevi za svaki pojedini segment, usporedbom smjera jakog nosača sa osima simetrije i provjerom nalazi li se jaki nosač na relativnoj koordinati 0.5. Ako se promatrani segment nalazi na osi simetrije, metoda vraća logičku vrijednost istine *True*.

5.4.2 Ukrepa na osi simetrije

U slučaju da se ukrepa nalazi na osi simetrije, grednim konačnim elementima te ukrepe je potrebno dodijeliti pola originalnih karakteristika krutosti. Ovo podrazumijeva izradu novog svojstva grede sa polovičnim karakteristikama poprečne površine presjeka i momenta inercije. Slika 5.9 prikazuje primjer polovičnog modela ispitne varijante `hc_var_5` sa uzdužnom ukrepom, Hat tipa profila, na zoni oplate 5 koja se nalazi na uzdužnoj osi simetrije.



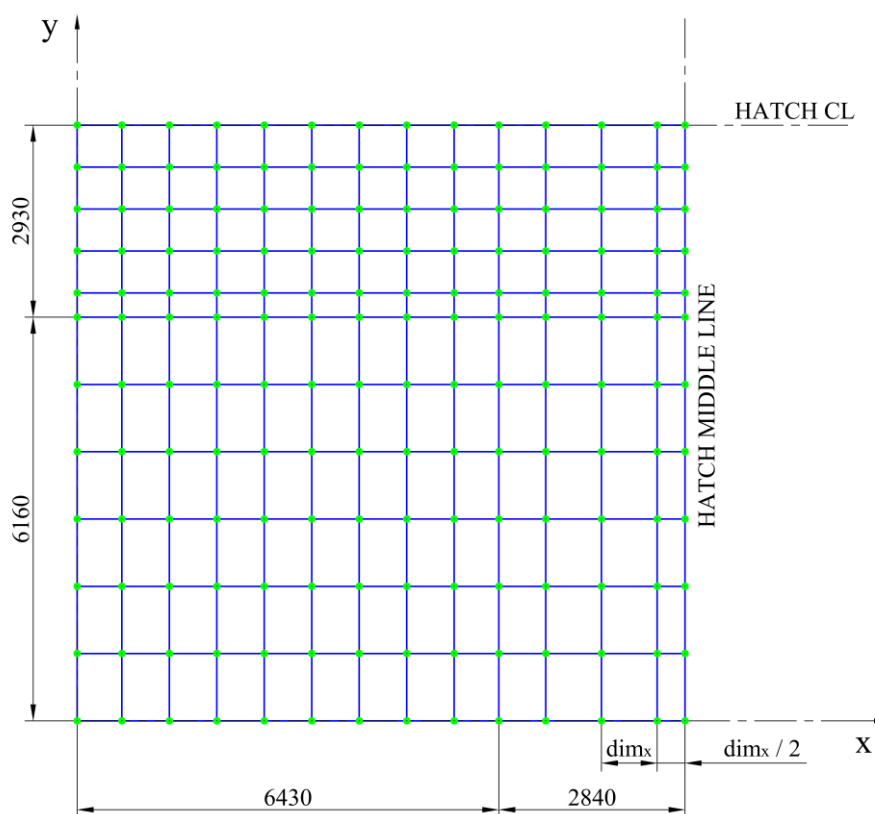
Slika 5.9 Ukrepa na osi simetrije, polovični model ispitne varijante `hc_var_5`

Metodom `aos_on_stiffener` se identificiraju ovakvi slučajevi za svaku pojedinu zonu oplate, usporedbom smjera ukrepa sa osima simetrije i provjerom je li broj ukrepa paran ili neparan. Ako se na promatranoj zoni oplate nalazi ukrepa na osi simetrije, metoda vraća logičku vrijednost istine *True*.

Algoritam ove metode je specifično izrađen s obzirom na moguće vrste definicije rasporeda ukrepa na modelu, prema kojima nije moguće nesimetrično postavljanje ukrepa na zoni oplate. Ukoliko bi postojao neki drugi način zadavanja ukrepa koji omogućuje njihovo nesimetrično postavljanje, ova metoda neće ispravno identificirati ukrepu na osi simetrije. U tom slučaju je potrebna izmjena algoritma koja će omogućiti usporedbu koordinata krajeva pojedine ukrepe sa položajem osi simetrije.

5.4.3 Os simetrije između ukrepa

U slučaju da između dvije ukrepe prolazi os simetrije, postoji mogućnost da se konačni element oplata dijeli na pola zbog te osi simetrije. Slika 5.10 prikazuje ovaj slučaj na primjeru četvrtinske mreže konačnih elemenata na ispitnoj varijanti konstrukcije `hc_var_5`. Element osnovne dimenzije dim_x na zoni oplata 2 se na ovom primjeru zbog poprečne osi simetrije dijeli na pola.



Slika 5.10 Os simetrije između ukrepa, četvrtinski model ispitne varijante `hc_var_5`

Metodom `aos_between_stiffener` se identificiraju ovakvi slučajevi za svaku pojedinu zonu oplata, analogno metodi za određivanje ukrepa na osi simetrije. Ako na promatranoj zoni oplata osi simetrije prolazi između dvije ukrepe, metoda vraća logičku vrijednost istine *True*. Ova metoda je sastavni dio drugih metoda kojima se provjerava dolazi li zaista do podjele konačnog elementa na pola. Koristi se unutar metoda `identify_long_split_zones` i `identify_tran_split_zones` kojima se identificiraju sve zone oplata na kojima postoji ovakav slučaj osi simetrije između ukrepa. Metodama `long_split_element` i `tran_split_element` se tada na temelju dimenzija osnovne mreže konačnih elemenata utvrđuje dolazi li do prepolavljanja elemenata.

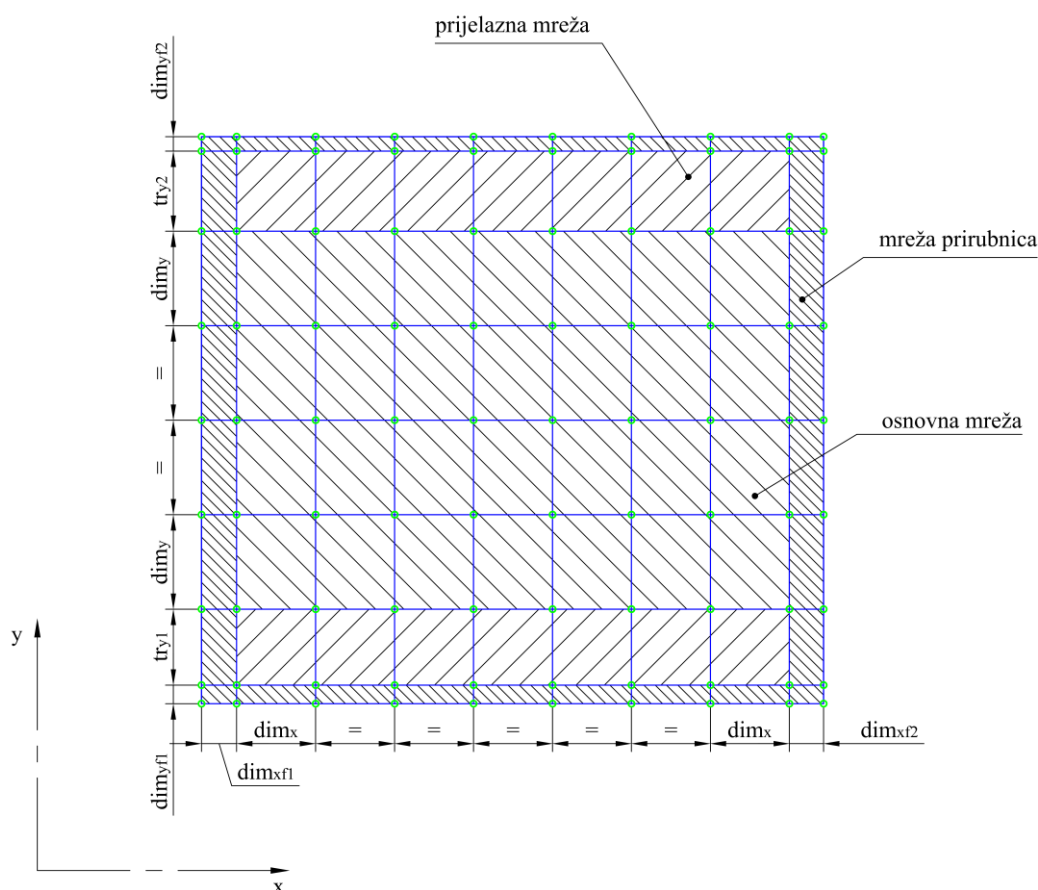
6. ODREĐIVANJE DIMENZIJA KONAČNIH ELEMENATA

Nakon definiranja granica izrade mreže konačnih elemenata je moguće krenuti sa korakom određivanja dimenzija konačnih elemenata na svakom razmatranom dijelu konstrukcije. Glavni cilj ovog koraka je određivanje dimenzija elemenata, koje će osigurati pravilnost mreže i podudaranje čvorova duž rubova svakog razmatranog dijela konstrukcije.

Na svakoj zoni oplata i segmentu se mreža konačnih elemenata može podijeliti na:

- Osnovnu mrežu (eng. *base mesh*)
- Prijelaznu mrežu (eng. *transition mesh*)
- Mrežu prirubnica (eng. *flange mesh*)

Slikom 6.1 je prikazana podjela mreže konačnih elemenata na primjeru jedne zone oplata varijante mreže VI.



Slika 6.1 Podjela mreže jedne zone oplata na varijanti mreže VI

Metodama unutar bazne klase `MeshSize` se određuju dimenzije osnovne i prijelazne mreže, a mreža prirubnica posljedično slijedi iz tih dimenzija. Za svaku izrađenu varijantu mreže postoje podklase `ElementSize` pomoću kojih se određuju dimenzije konačnih elemenata specifične za pojedino rješenje izrade tj. varijantu mreže. U okviru ovog rada su izrađene dvije varijante mreže, za koje se specifične metode nalaze unutar `ElementSizeV1` i `ElementSizeV2`.

6.1 Kontrola mreže

Dimenzije mreže konačnih elemenata se određuju na temelju niza varijabli koje je prije izrade mreže moguće odabrati, a svaka ima predodređene početne vrijednosti. Vrijednosti ovih varijabli se u toku izvođenja algoritama neće automatski promijeniti, ali ovisno o varijabli neće biti strogo usvojene. Tablicom 6.1 su prikazani dostupni parametri za kontrolu mreže, korištena imena argumenata u programskom kodu, opis i njihove inicijalne vrijednosti.

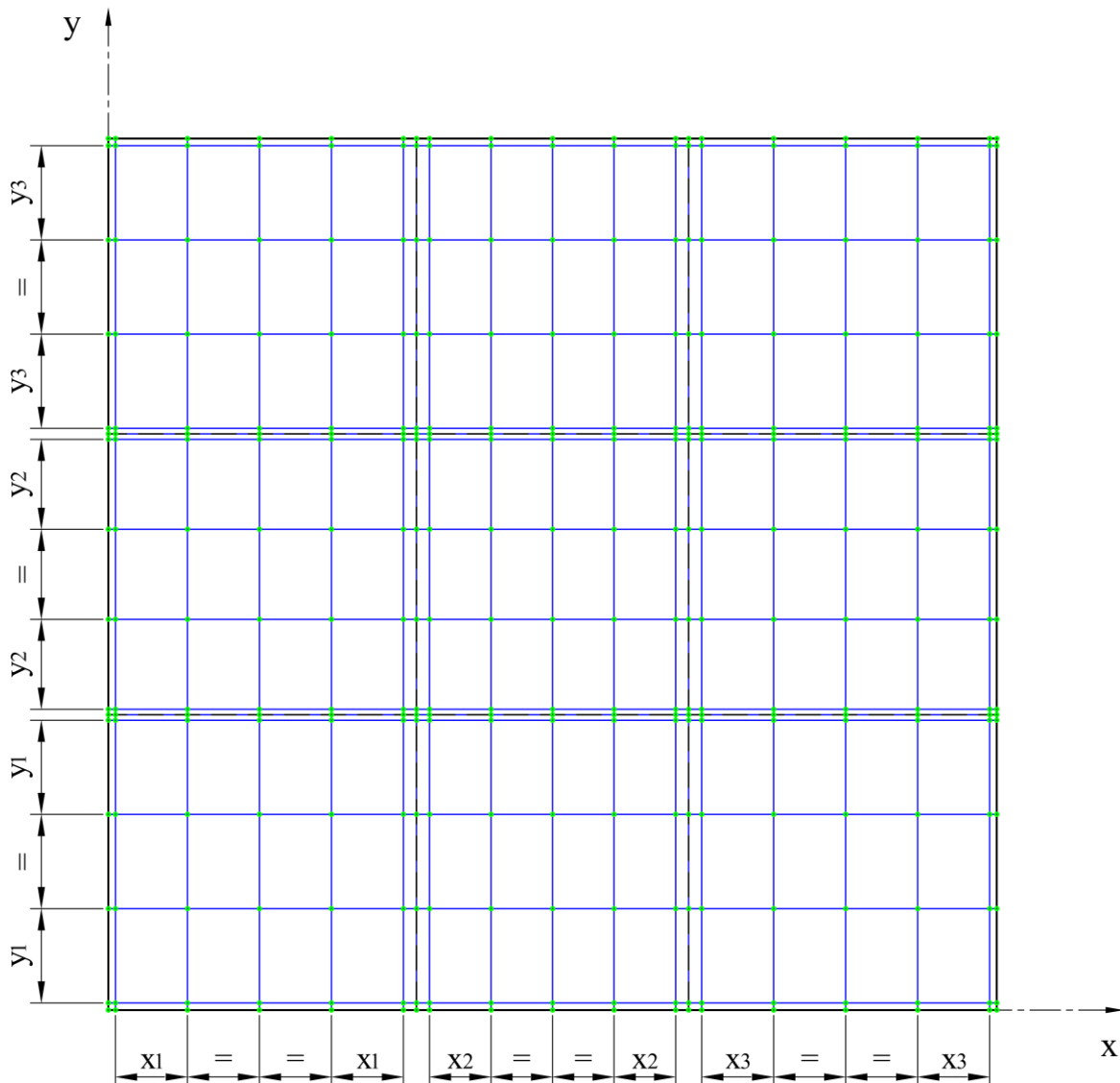
Tablica 6.1 Parametri za kontrolu mreže

Naziv parametra	Opis	Početna vrijednost
<code>min_num_ebs</code>	Minimalni broj elemenata između ukrepa (eng. <i>minimum number of elements between stiffeners</i>)	1
<code>min_num_eweb</code>	Minimalni broj elemenata po visini struka (eng. <i>minimum number of web elements</i>)	3
<code>num_eaf</code>	Broj elemenata po širini prirubnice (eng. <i>number of elements across flange</i>)	1
<code>flange_aspect_ratio</code>	Maksimalni aspektni odnos konačnih elemenata prirubnice (eng. <i>flange aspect ratio</i>)	7
<code>plate_aspect_ratio</code>	Maksimalni aspektni odnos konačnih elemenata oplata (eng. <i>plate aspect ratio</i>)	3
<code>des_plate_aspect_ratio</code>	Poželjni aspektni odnos konačnih elemenata oplata (eng. <i>desired plate aspect ratio</i>)	2

6.2 Osnovna mreža konačnih elemenata

Osnovna mreža konačnih elemenata definiira pravilnu mrežu pločastih *quad* elemenata koja se nalazi na većem dijelu mreže oplata, strukova i prirubnica. Dimenzije ove osnovne mreže su određene na temelju kriterija razmaka ukrepa, širina prirubnica, poželjnog i maksimalnog aspektnog odnosa konačnih elemenata opločenja i prirubnica. Osnovna dimenzija konačnog elementa je jednaka na svim zonama oplata u smjeru osi x između dva susjedna jaka poprečna nosača, a u smjeru osi y između dva susjedna jaka uzdužna nosača.

Slikom 6.2 su na primjeru modificirane ispitne varijante poklopca *hc_var_5* prikazane različite osnovne dimenzije x_1 , x_2 i x_3 za svaki stupac, te y_1 , y_2 i y_3 za svaki redak zona oplata između jakih nosača.



Slika 6.2 Osnovna mreža konačnih elemenata

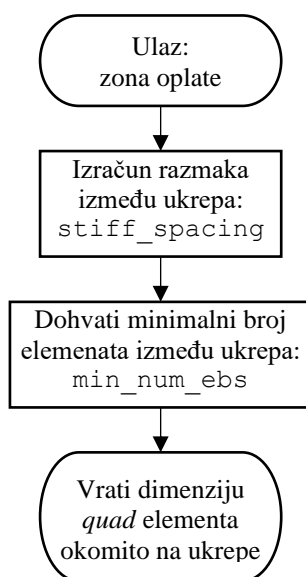
Usvajanjem samo jedne osnovne dimenzije za cijeli redak ili stupac zona oplate između susjednih uzdužnih ili poprečnih nosača se osigurava pravilnost mreže. Ove dimenzije se također prenose na elemente strukova i prirubnica, čime se eliminira mogućnost nepoklapanja rubnih čvorova mreže oplate, strukova i prirubnica. Dimenzije elemenata osnovne mreže se određuju kroz četiri koraka:

- 1.) Prema kriteriju razmaka između ukrepa na pojedinoj zoni oplate
- 2.) Prema dimenzijama elemenata prirubnica segmenata koji definiraju zonu oplate
- 3.) Kombinacijom prva dva kriterija, lokalnim razmatranjem pojedine zone oplate
- 4.) Globalnim razmatranjem redova i stupaca zona oplate između jakih nosača

Zbog važnosti određivanja dimenzija elemenata prema kojima će biti generirana cijela mreža konačnih elemenata, u nastavku ovog poglavlja su prikazani i objašnjeni korišteni algoritmi u svakom od navedenih koraka.

6.2.1 Dimenzije elemenata oplate prema kriteriju razmaka ukrepa

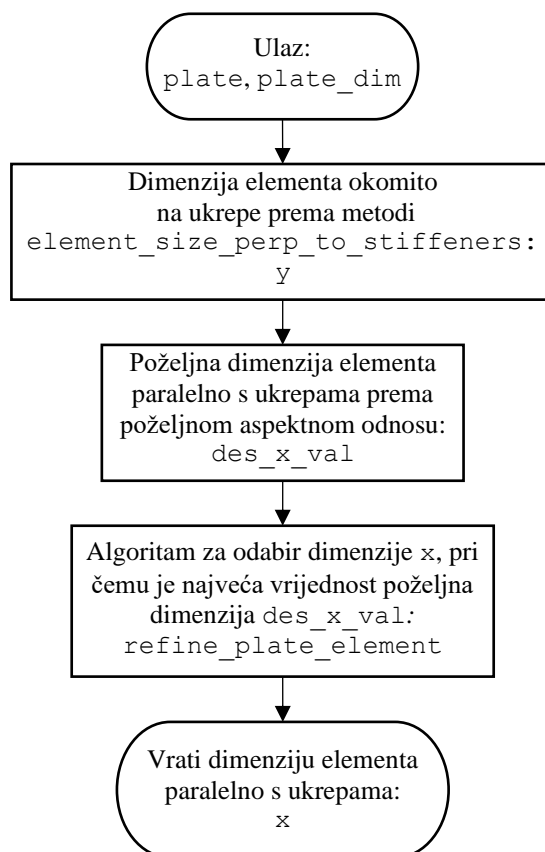
Prvi korak određivanja osnovnih dimenzija *quad* elemenata pojedine zone oplate je prema kriteriju razmaka ukrepa. Unutar programskog koda je izračun podijeljen na više metoda. Prva u nizu je metoda `element_size_perp_to_stiffeners`, za koju je prikazan dijagram toka na slici 6.3, koja definira najveću moguću dimenziju konačnih elemenata okomito na ukrepe isključivo prema minimalnom broju elemenata između ukrepa i razmaku ukrepa. Minimalni broj elemenata između ukrepa `min_num_ebs` prema pravilima *IACS CSR* za veličinu mreže konačnih elemenata iznosi 1, što je i zadana početna vrijednost.



Slika 6.3 Dijagram toka metode `element_size_perp_to_stiffeners`

Odabrani minimalni broj elemenata između ukrepa predstavlja donju granicu broja elemenata, a konačni broj elemenata između ukrepa ovisi o odabranim aspektnim odnosima. Poseban utjecaj kod manjih dimenzija širine prirubnica ima odabrani maksimalni aspektni odnos prirubnica `flange_aspect_ratio`. Zbog ovog aspektnog odnosa može doći do profinjenja mreže i povećanja broja elemenata između ukrepa, što je na odabranim ispitnim varijantama konstrukcije bio redovit slučaj.

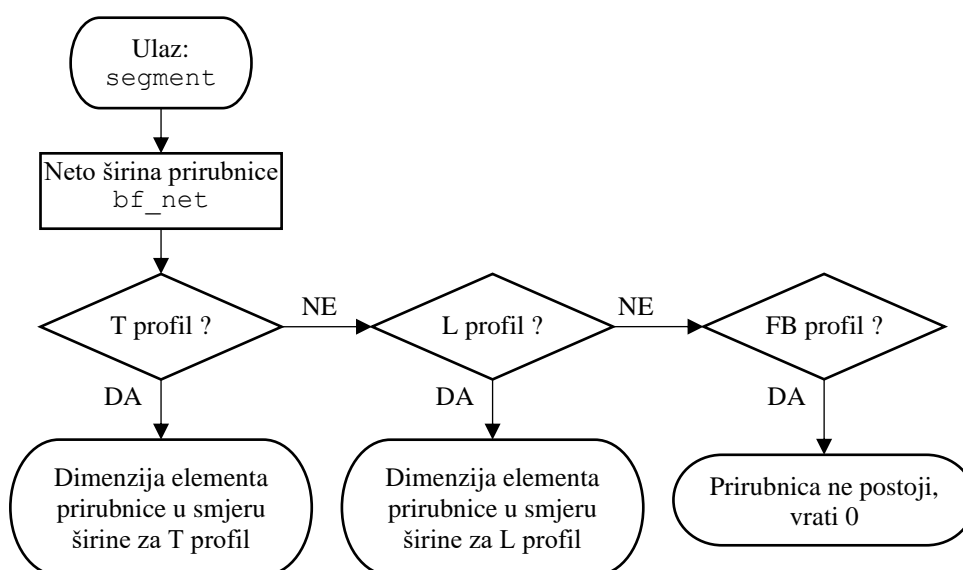
Osnovna dimenzija mreže oplata u smjeru paralelnom s ukrepama se određuje metodom `element_size_para_to_stiffeners`, čiji je dijagram toka prikazan slikom 6.4. Ova metoda koristi algoritam `refine_plate_element` s obzirom na poželjnu dimenziju konačnog elementa `des_x_val`. Ta poželjna dimenzija je definirana kao umnožak poželjnog aspektnog odnosa i dimenzije elementa okomito na ukrepe. Primarna svrha poželjnog aspektnog odnosa je kontrola grubljih mreža konačnih elemenata, kod kojih se zadržava inicijalno postavljena vrijednost od jednog elementa između ukrepa. Ovaj kontrolni parametar gubi svoj utjecaj u trenutku kada zbog ostalih kriterija dođe do povećanja broja elemenata između ukrepa. Tada se dimenzije elemenata određuju prema maksimalnom dopuštenom aspektnom odnosu.



Slika 6.4 Dijagram toka metode `element_size_para_to_stiffeners`

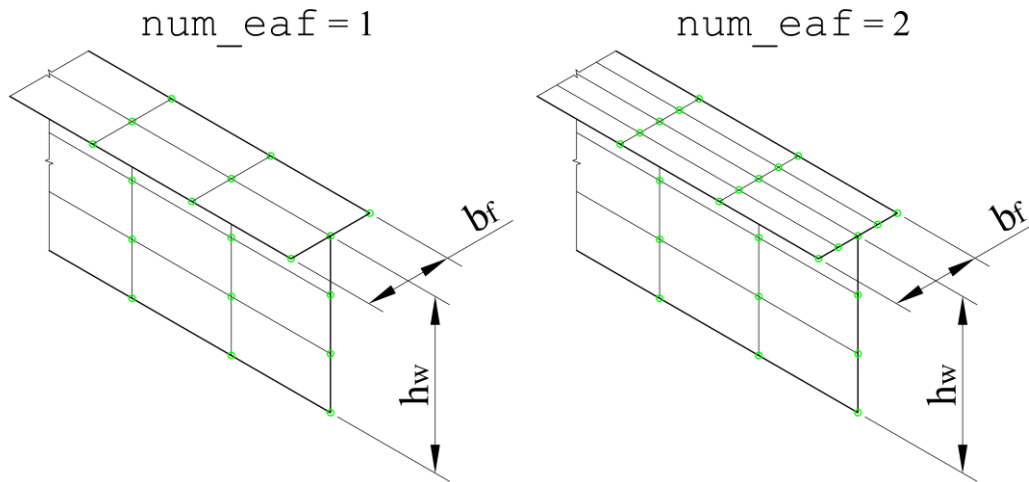
6.2.2 Maksimalne dimenzije elemenata prirubnica prema aspektnom odnosu

Drugi korak određivanja osnovnih dimenzija elemenata je određivanje maksimalnih dopuštenih dimenzija prema širini i aspektnom odnosu prirubnica, za sve segmente koji omeđuju zonu oplata. Metoda `get_flange_el_width` vraća dimenziju *quad* elementa prirubnice u smjeru njezine širine, ovisno o tipu profila nosača. Za uzdužno orijentirane segmente se prema tome određuje dimenzija prirubnice u smjeru globalne osi *y*, a za poprečno orijentirane segmente se određuje dimenzija u smjeru globalne osi *x*. Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.5.



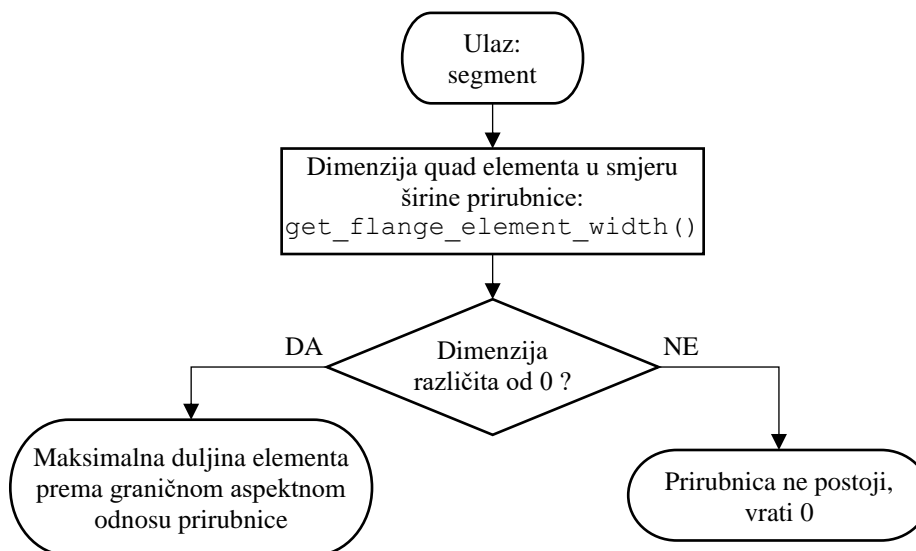
Slika 6.5 Dijagram toka metode `get_flange_el_width`

Prema inicijalno postavljenoj vrijednosti parametra `num_eaf`, prirubnica T profila se diskretizira sa dva elementa u smjeru širine, a prirubnica L profila sa jednim elementom. Izmjenom ovog kontrolnog parametra je moguće odabrati broj elemenata u smjeru širine prirubnice, npr. postavljanjem njezine vrijednosti na 2 će prirubnica T profila biti diskretizirana sa ukupno 4 elementa, kako je prikazano na slici 6.6. Analogno će u tom slučaju prirubnica L profila biti diskretizirana sa 2 elementa. Ako je segment FB profil, metoda će vratiti 0, što je bitno za kasnije provjere i određivanje dimenzija prijelaznih elemenata.

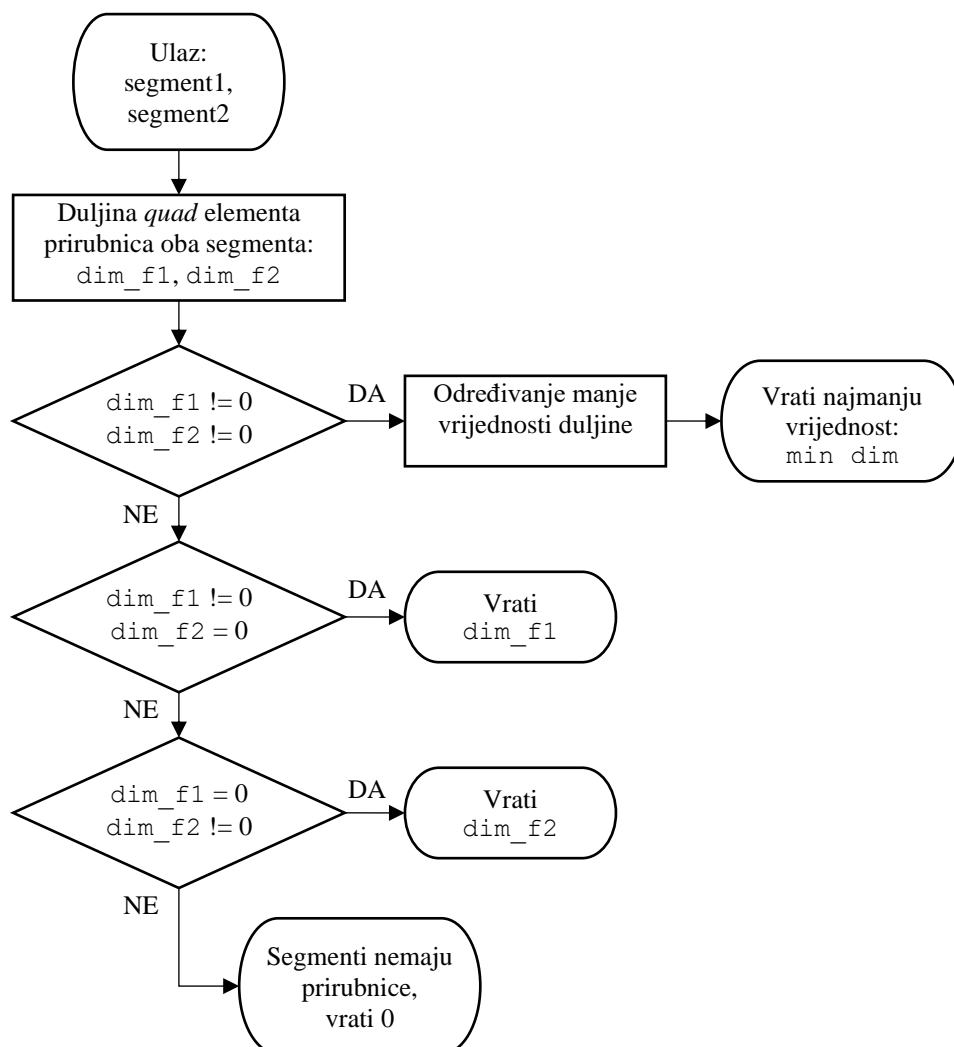


Slika 6.6 Diskretizacija prirubnice T profila

Metoda `get_flange_el_length` vraća maksimalnu dozvoljenu duljinu *quad* elementa prirubnice, prema dimenziji elementa u smjeru širine prirubnice i maksimalnom aspektnom odnosu. Za uzdužno orijentirane segmente prema tome metoda vraća dimenziju u smjeru globalne osi x , za poprečno orijentirane segmente dimenziju u smjeru osi y . Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.7.

Slika 6.7 Dijagram toka metode `get_flange_el_length`

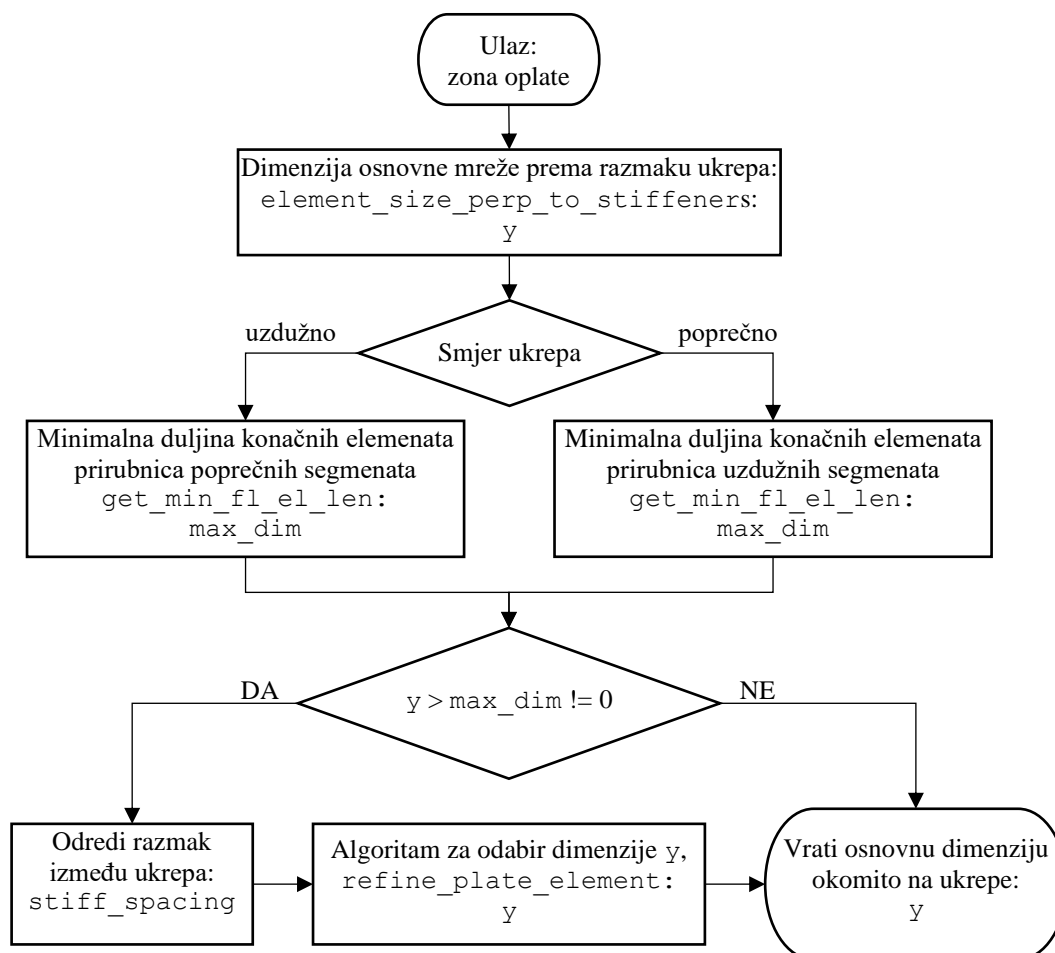
Metoda `get_min_fl_el_len` kao ulazne parametre uzima dva segmenta, za svaki određuje maksimalnu dozvoljenu duljinu *quad* elementa prirubnice i vraća manju vrijednost. Također sadrži provjeru je li segment FB profil, prepoznavanjem je li duljina elementa prirubnice jednaka nuli. Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.8. Potreba za određivanjem ove minimalne vrijednosti proizlazi iz toga da je svaka zona oplata definirana sa dva uzdužna i dva poprečna segmenta. Najveća dozvoljena dimenzija elementa osnovne mreže je upravo definirana najmanjom vrijednosti duljine elementa prirubnice. Zbog istog razloga je potrebno odrediti minimalnu vrijednost duljine elemenata prirubnice svih segmenata jakih nosača koji se nalaze između dva susjedna jaka nosača u suprotnom smjeru, metodom `get_min_fl_el_len_between_psm`.



Slika 6.8 Dijagram toka metode `get_min_fl_el_len`

6.2.3 Lokalno razmatranje i profinjenje osnovnih dimenzija mreže

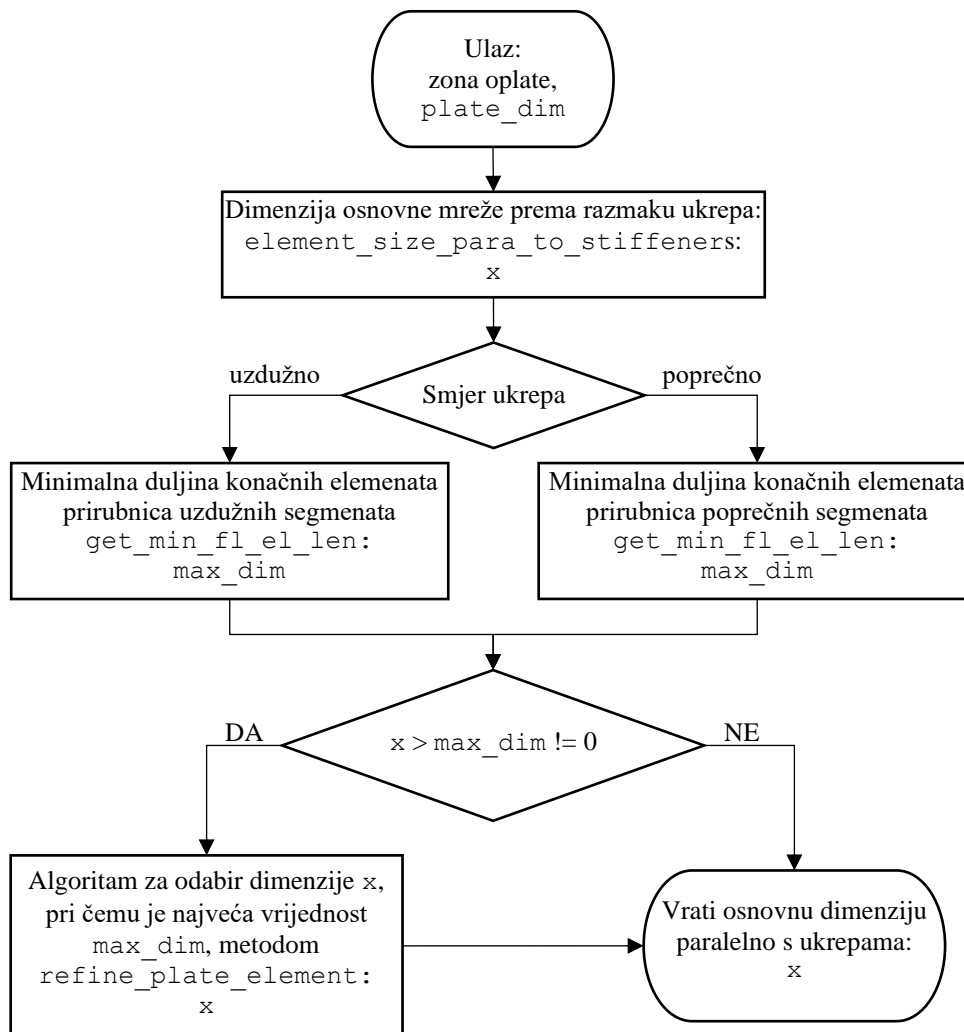
Treći korak određivanja osnovnih dimenzija elemenata je lokalno razmatranje svake zone oplata zasebno. Lokalno razmatranje osnovnih dimenzija elemenata na pojedinoj zoni oplata se provodi kombinacijom kriterija razmaka ukrepa i maksimalnih širina prirubnica, posebnim metodama za smjer okomit i paralelan s ukrepama. Metoda `element_size_plating_zone_perp` za odabranu zonu oplata određuje dimenziju elementa osnovne mreže okomito na ukrepe. Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.9.



Slika 6.9 Dijagram toka metode `element_size_plating_zone_perp`

Ova metoda za uzdužno usmjerenje ukrepa traži minimalnu vrijednost duljine konačnih elemenata prirubnica prvog i drugog poprečnog segmenta koji definiraju promatranu zonu oplata, dok se za poprečne ukrepe razmatraju uzdužni segmenti. Ta vrijednost predstavlja maksimalnu dozvoljenu dimenziju osnovne mreže okomito na ukrepe. Ako dimenzija y prema kriteriju razmaka ukrepa prelazi ovaj maksimum, provodi se profinjavanje mreže na duljini razmaka između ukrepa `stiff_spacing`, metodom `refine_plate_element` pri čemu je najveća dozvoljena vrijednost `max_dim`.

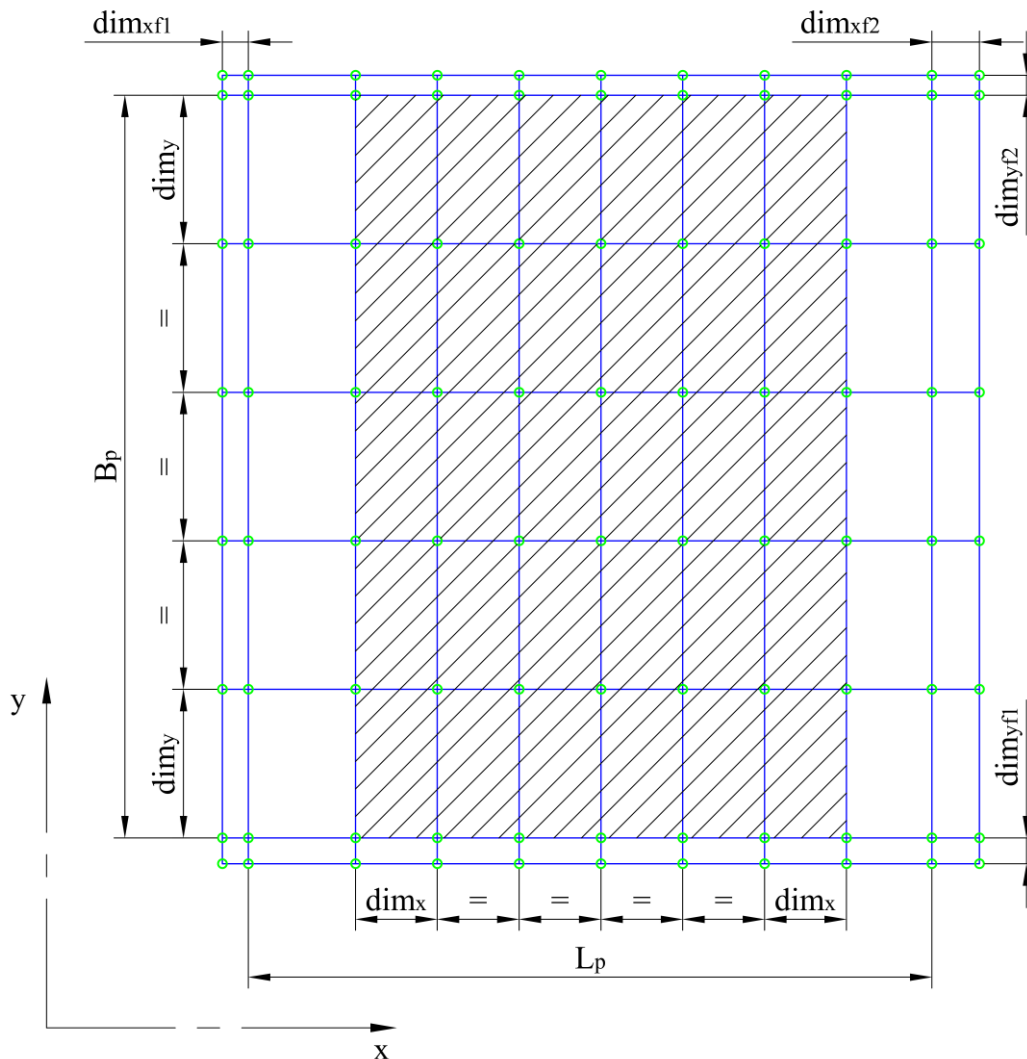
Metoda `element_size_plating_zone_para` za odabranu zonu oplata određuje dimenziju elementa osnovne mreže paralelno s ukrepama. Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.10.



Slika 6.10 Dijagram toka metode `element_size_plating_zone_para`

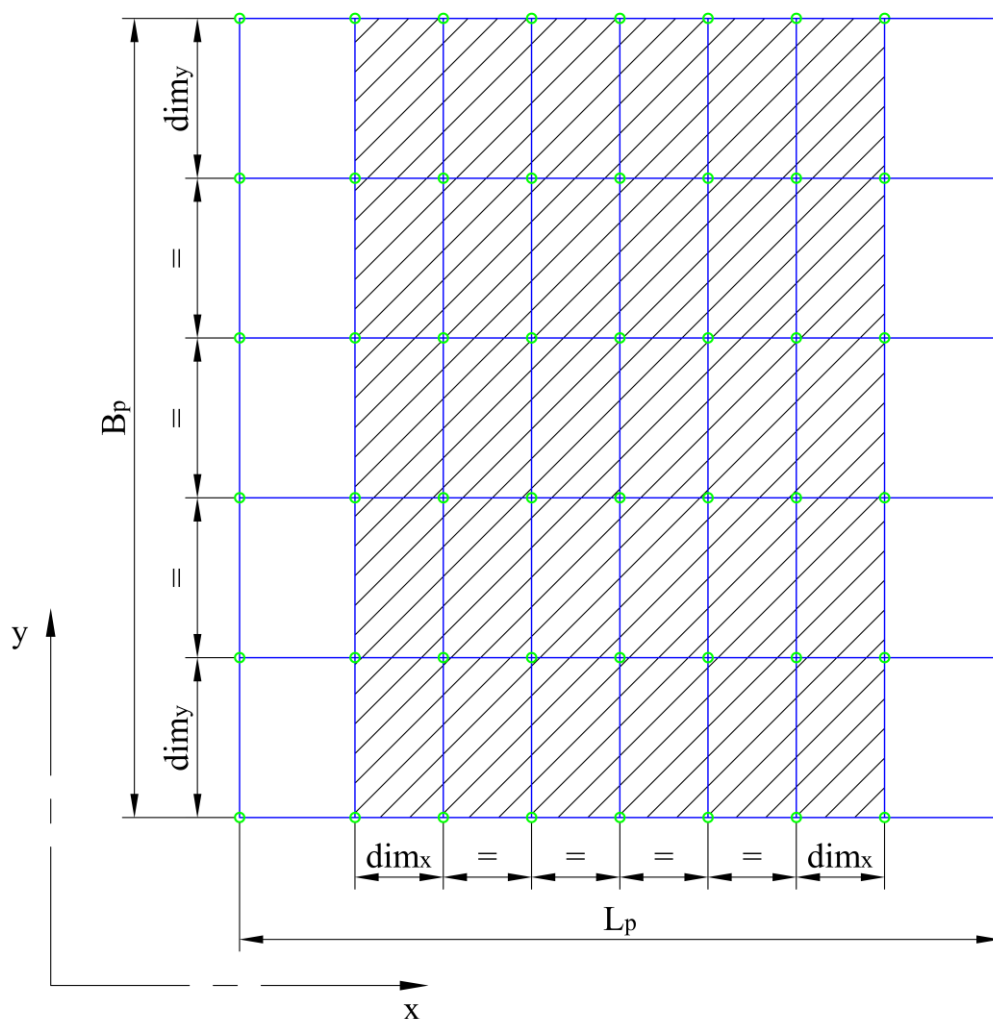
Za razliku od metode za određivanje dimenzije osnovne mreže okomito na ukrepe, ova metoda zahtjeva ulazni parametar `plate_dim`, dimenziju oplata paralelno s ukrepama koja se može razlikovati ovisno o razmatranoj varijanti mreže ili postojanju prirubnica na jakim nosačima. Na ovaj način se omogućuje korištenje metode kao zajedničke za više različitih varijanti mreža konačnih elemenata. Metoda također na ovaj način nastoji proširiti opseg osnovne mreže konačnih elemenata na što je moguće veće područje pojedine zone oplata. Time se za slučaj istog smjera ukrepa na cijelom opločenju eliminira potreba za prijelaznim elementima u smjeru paralelnom sa ukrepama.

Slika 6.11 prikazuje primjer varijante mreže VI na jednoj zoni oplate sa poprečnim ukrepama gdje su šrafurom istaknuti konačni elementi osnovne mreže. U ovom slučaju se metodom `element_size_plating_zone_para` određuje dimenzija dim_y , a za ulazni parametar `plate_dim` bi bila usvojena reducirana širina zone oplate dimenzije B_p . Usvajanjem ove reducirane dimenzije se opseg osnovne mreže po y osi proširuje sve do konačnih elemenata prirubnica dimenzija dim_{yf1} i dim_{yf2} .



Slika 6.11 Osnovna mreža konačnih elemenata na zoni oplate, varijanta mreže VI

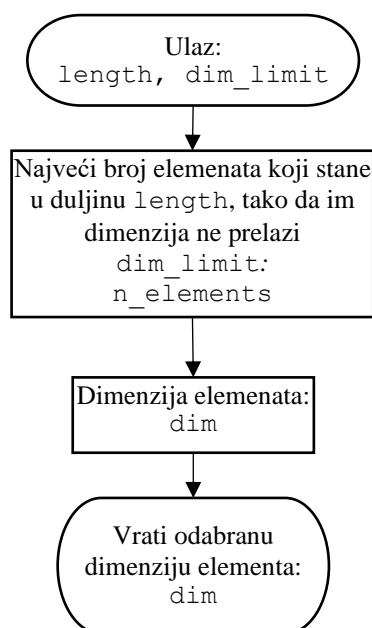
Slika 6.12 slično prikazuje primjer mreže na jednoj zoni oplate sa poprečnim ukrepama, ali za varijantu mreže V2 gdje su L_p i B_p pune dimenzije promatrane zone oplate. Na ovoj varijanti mreže ne postoji preslikavanje elemenata prirubnice na mrežu oploćenja, pa se opseg osnovne mreže konačnih elemenata u smjeru osi y proširuje sve do krajnjih rubova zone oplate.



Slika 6.12 Osnovna mreža konačnih elemenata na zoni oplata, varijanta mreže V2

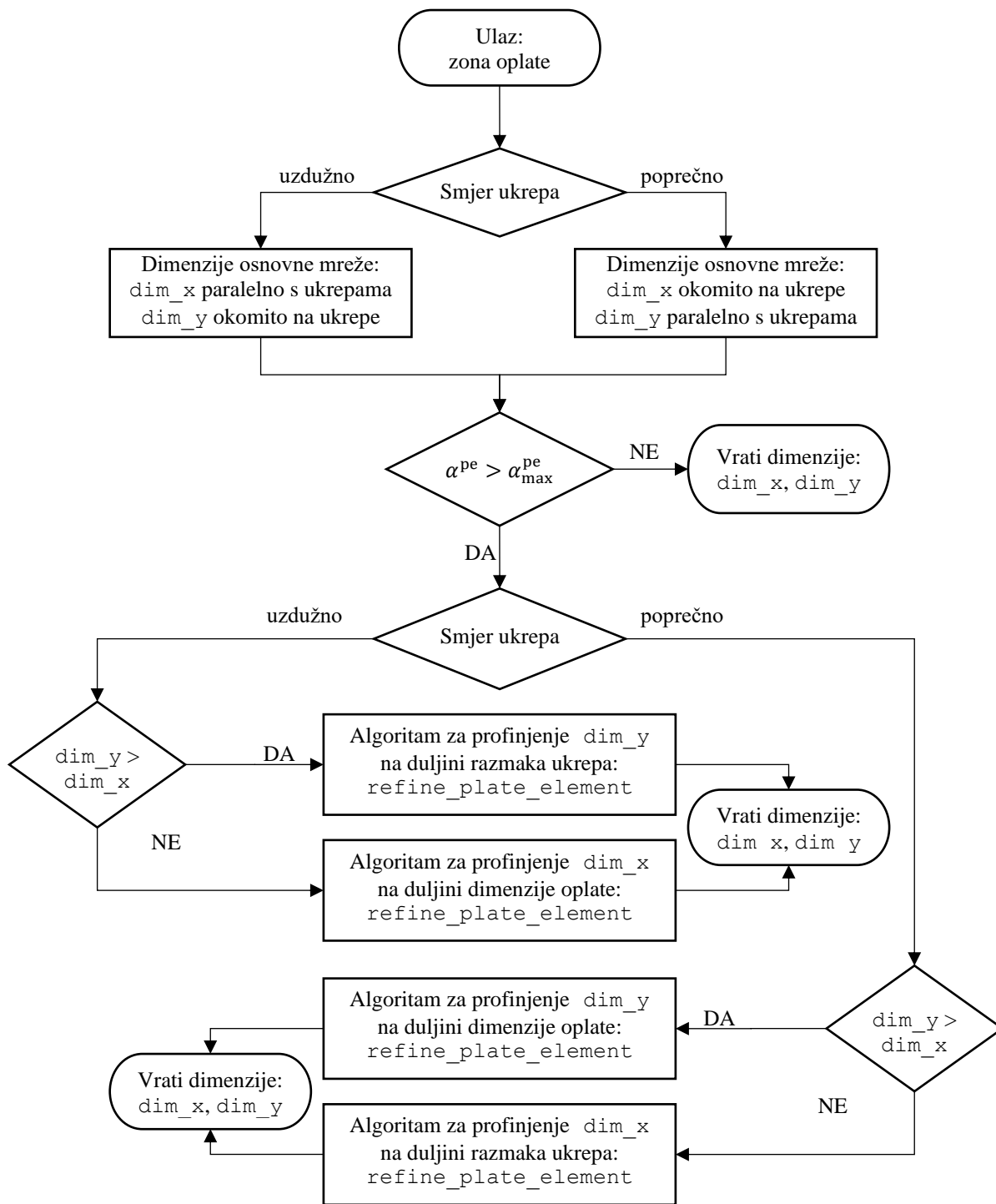
Na obje slike 6.11 i 6.12 su vidljivi konačni elementi na rubovima zone oplata čija se dimenzija u smjeru osi x razlikuje od ostalih, a na ovim slikama nisu kotirani. Riječ je o prijelaznim elementima koji mogu biti prisutni na svim varijantama mreža, a koji će biti opisani u zasebnom poglavlju 6.3.

Za profinjenje dimenzija konačnih elemenata oplata se koristi metoda `refine_plate_element`. Ova metoda nastoji odrediti najveći broj konačnih elemenata `n_elements` istih dimenzija koji se mogu smjestiti duž neke duljine `length` tako da im je dimenzija manja od postavljenog maksimuma `dim_limit`. Sa tim brojem elemenata se dijeli duljina `length` i vraća kao odabrana dimenzija konačnog elementa `dim`. Dijagram toka ove metode prikazan je slikom 6.13

Slika 6.13 Dijagram toka metode `refine_plate_element`

Završna metoda za lokalno razmatranje osnovnih dimenzija elemenata na pojedinoj zoni oplata je `element_size_plating_zone`, čiji je dijagram toka prikazan slikom 6.14. Ova metoda spaja metode za izračun dimenzija osnovne mreže okomito i paralelno s ukrepama, te ove vrijednosti dodjeljuje varijablama `dim_x` i `dim_y` sukladno orijentaciji ukrepa. Nakon određivanja ovih osnovnih dimenzija mreže slijedi provjera aspektnog odnosa konačnih elemenata oplata. Ako se odabranim osnovnim dimenzijama mreže ne prelazi maksimalni aspektni odnos elemenata oplata, ove dimenzije se usvajaju za tu zonu oplata. U suprotnom se profinjuje veća dimenzija korištenjem metode `refine_plate_element` prema odgovarajućoj duljini i maksimalnoj vrijednosti.

Za slučaj da se profinjuje dimenzija okomito na ukrepe, odgovarajuća duljina koja se dijeli na jednake dijelove metodom `refine_plate_element` je vrijednost razmaka ukrepa. Ako se profinjuje dimenzija paralelno s ukrepama, ova odgovarajuća duljina je jednaka punoj ili reduciranoj dimenziji zone oplata, ovisno o varijanti mreže.



Slika 6.14 Dijagram toka metode element_size_plating_zone

6.2.4 Globalno razmatranje i odabir osnovnih dimenzija mreže

Četvrti i zadnji korak određivanja osnovnih dimenzija elemenata je globalno razmatranje cijele konstrukcije. Susjedne zone oplata mogu imati različiti razmak ukrepa, orijentaciju ukrepa i različite širine prirubnica na segmentima jakih nosača koji definiraju te zone. Prema tome svaka zona oplata može zahtijevati različite osnovne dimenzije konačnih elemenata.

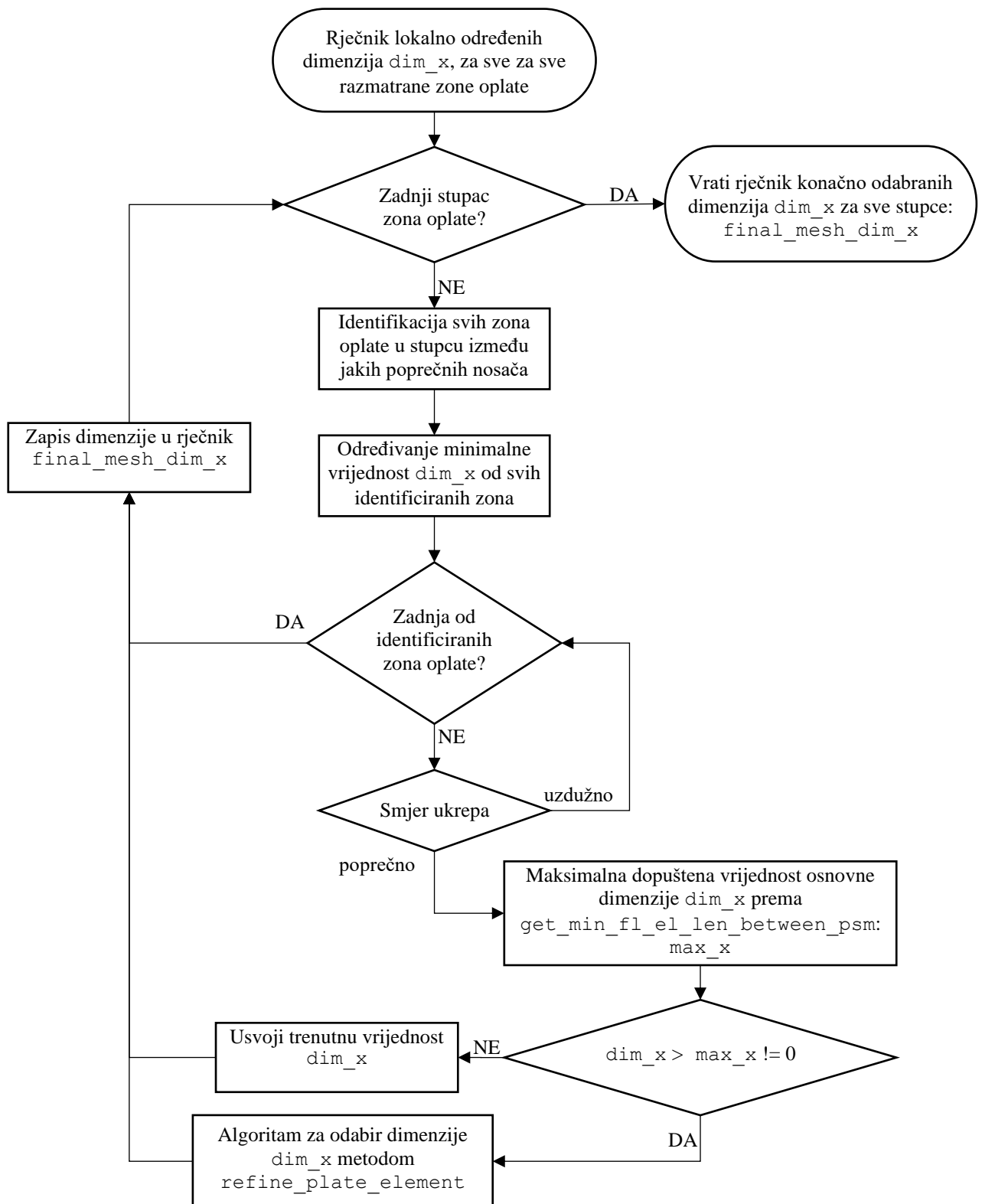
Usklađivanje i odabir osnovnih dimenzija konačnih elemenata opločenja i prirubnica jakih nosača se razmatra zasebno za cijeli redak zona oplata između para susjednih jakih uzdužnih nosača i za cijeli stupac zona oplata između para susjednih jakih poprečnih nosača. Ovakav pristup osigurava da je zadovoljen uvjet kompatibilnosti mreža svih zona oplata prema kojemu susjedne zone oplata duž zajedničkog ruba moraju imati čvorove na istim koordinatama. Dijagram toka algoritma `assign_base_dim_x` za odabir dimenzija osnovne mreže `dim_x` koje će biti usvojene za pojedini stupac zona oplata između parova susjednih jakih poprečnih nosača je prikazan je slikom 6.15. Ovaj algoritam se može podijeliti na dva zasebna slučaja:

1.) Između susjednih poprečnih nosača postoji zona oplata sa poprečnim ukrepama

Ako u cijelom stupcu zona oplata postoji barem jedna zona sa poprečnim ukrepama, odabir osnovne dimenzije `dim_x` je ograničen razmakom ukrepa i odabranim brojem konačnih elemenata između ukrepa, time što dimenzija elementa okomito na smjer ukrepa mora biti višekratnik razmaka ukrepa. Istovremeno vrijednost `dim_x` ne smije prelaziti maksimalnu dopuštenu vrijednost `max_x` koja je određena prema maksimalnom aspektnom odnosu elemenata prirubnica svih uzdužnih segmenata između susjednih jakih poprečnih nosača. Ukoliko se ne prelazi maksimalna dimenzija, usvaja se vrijednost `dim_x` identificirane zone oplata sa poprečnim ukrepama. Ukoliko se prelazi maksimalna dimenzija, metodom `refine_plate_element` se profinjuje `dim_x`, pri čemu je najveća vrijednost `max_x`. U trenutku kada se pronađe prva zona oplata sa poprečnim ukrepama, usvaja se ovako izračunata dimenzija i izlazi iz petlje naredbom `break`.

2.) Između susjednih uzdužnih nosača ne postoji zona oplata sa uzdužnim ukrepama.

Ako u stupcu zona oplata nema niti jedne zone sa poprečnim ukrepama, odabir osnovne dimenzije `dim_x` nije ograničen. U ovom slučaju se usvaja najmanja vrijednost `dim_x` od svih zona oplata u promatranom stupcu zbog mogućnosti da pojedine zone oplata zahtijevaju različitu dimenziju zbog različitih širina prirubnica uzdužnih nosača.



Slika 6.15 Dijagram toka metode assign_base_dim_x

Algoritam assign_base_dim_y za usklađivanje osnovne dimenzije dim_y analogno razmatra zone oplata između susjednih jakih uzdužnih nosača i koristi istu logiku.

6.3 Prijelazna mreža konačnih elemenata

Prijelazna mreža konačnih elemenata definira mrežu pločastih elemenata koji se nalaze na rubnim dijelovima oplata, strukova i prirubnica jakih nosača. Dimenzije elemenata ove prijelazne mreže ovise o orijentaciji i razmaku ukrepa od jakih nosača `stiff_offset`, maksimalnom aspektnom odnosu konačnih elemenata opločenja i prirubnica, dimenziji elemenata osnovne mreže, te o odabranoj varijanti mreže.

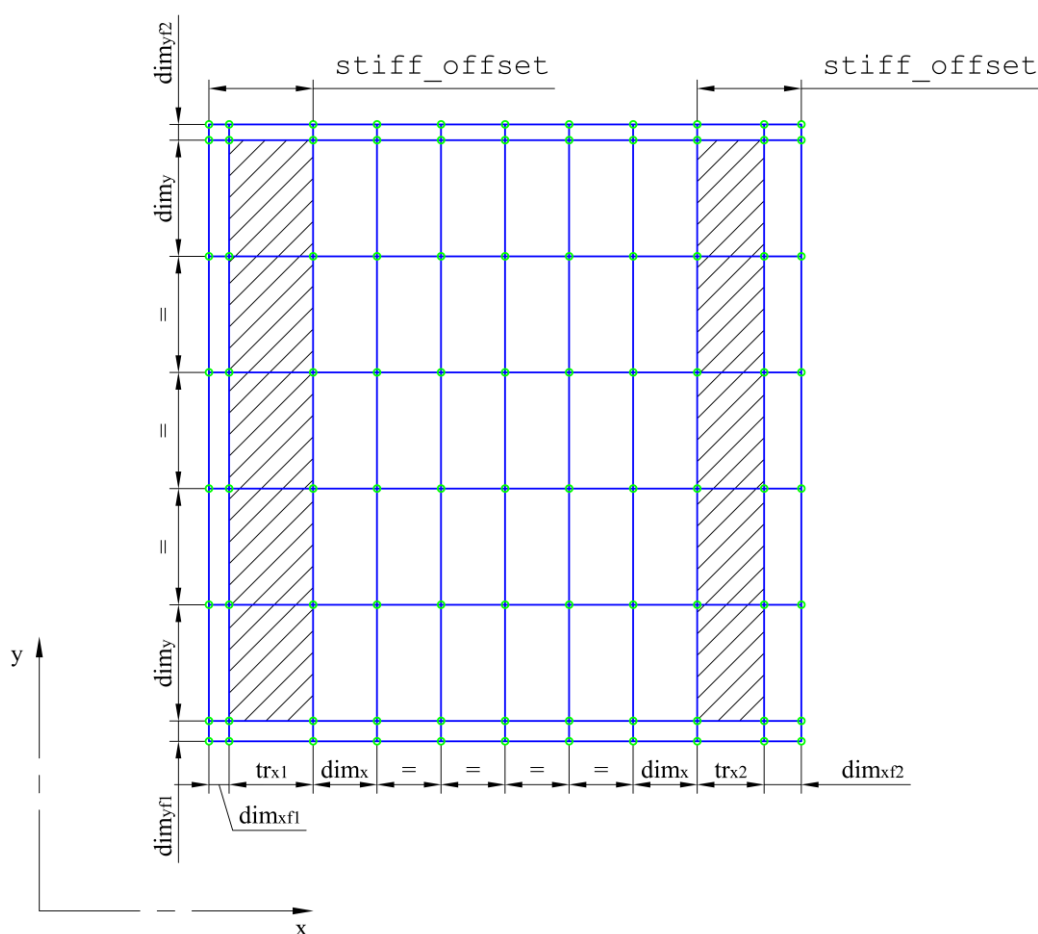
Ako je orebrenje na zoni oplata uzdužno, prijelazni elementi potencijalno postoje samo uz uzdužne segmente zone oplata, jer algoritam za određivanje osnovne dimenzije `dim_x` jednoliko dijeli punu ili reduciranu dimenziju zone oplata. Analogno vrijedi za poprečno orebrenje zone oplata, u kojem slučaju prijelazni elementi mogu postojati samo uz poprečne segmente.

Za razliku od osnovne mreže, svaka zona oplata može imati najviše 4, a najmanje 0 različitih dimenzija prijelaznih elemenata. Zbog bitnih razlika između varijanti mreža *V1* i *V2* su u nastavku za svaku zasebno prikazani primjeri prijelaznih elemenata.

6.3.1 Prijelazni elementi varijante mreže *V1*

Prijelazni konačni elementi oplata na varijanti mreže *V1* se nalaze između preslikanih elemenata prirubnica i elemenata osnovnih dimenzija. Slika 6.16 prikazuje dimenzije i opseg prijelazne mreže na primjeru varijante mreže *V1* na jednoj zoni oplata sa poprečnim ukrepama, gdje su šrafurom istaknuti prijelazni konačni elementi.

Budući da se na varijanti *V1* konačni elementi prirubnica preslikavanju na opločenje, jednom određene dimenzije prijelaznih elemenata opločenja istovremeno definiraju dimenzije prijelaznih elemenata prirubnica. Ove dimenzije se zasebno određuju u smjeru globalne osi *x* metodom `transition_dim_x` i u smjeru globalne osi *y* metodom `transition_dim_y` unutar podklase `ElementSizeV1`. Slika 6.17 prikazuje dijagram toka određivanja dimenzije prijelaznog elementa `dim_tr_x` unutar metode `transition_dim_x`. Lokalnim razmatranjem pojedine zone oplata varijante mreže *V1*, svaka zona oplata može imati najviše dvije različite vrijednosti prijelaznih elemenata različite od nule.

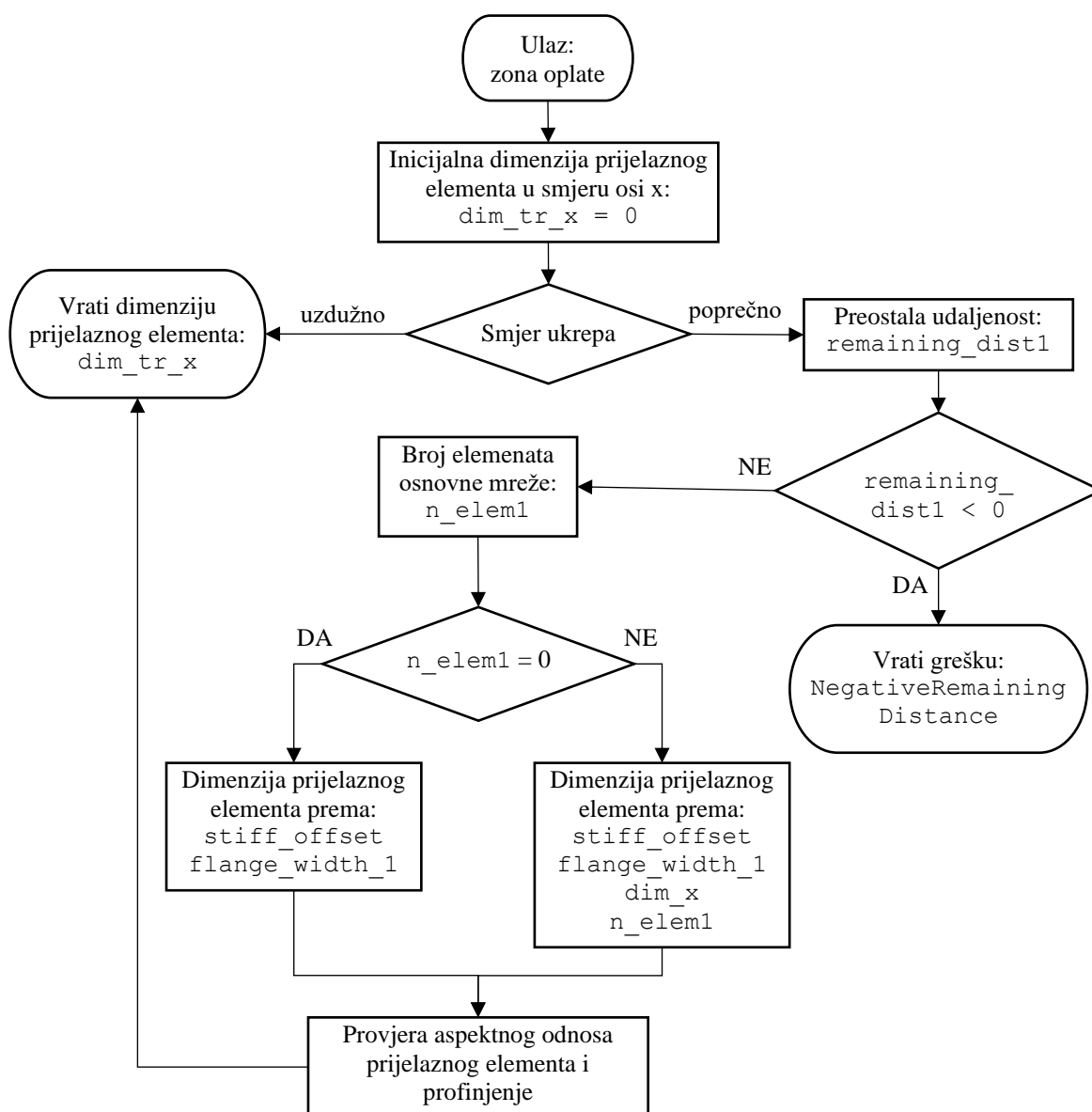


Slika 6.16 Opseg prijelazne mreže konačnih elemenata oplata na varijanti mreže VI

Na varijanti mreže VI preostala udaljenost `remaining_dist` predstavlja razliku između razmaka prve ukrepe od jakog nosača `stiff_offset` i širine elementa prirubnice paralelne sa ukrepama. Algoritam `transition_dim_x` određuje broj elemenata osnovne mreže dimenzije `dim_x` koji potpuno stanu u ovu preostalu udaljenost. Ako ne stane niti jedan element, dimenzija prijelaznog elementa se računa kao razlika razmaka `stiff_offset` i širine elementa prirubnice `flange_width`. Ako stane neki broj elemenata `n_elem`, u izračun dimenzije prijelaznog elementa ulazi i dimenzija osnovne mreže `dim_x` pomnožena sa tim brojem elemenata.

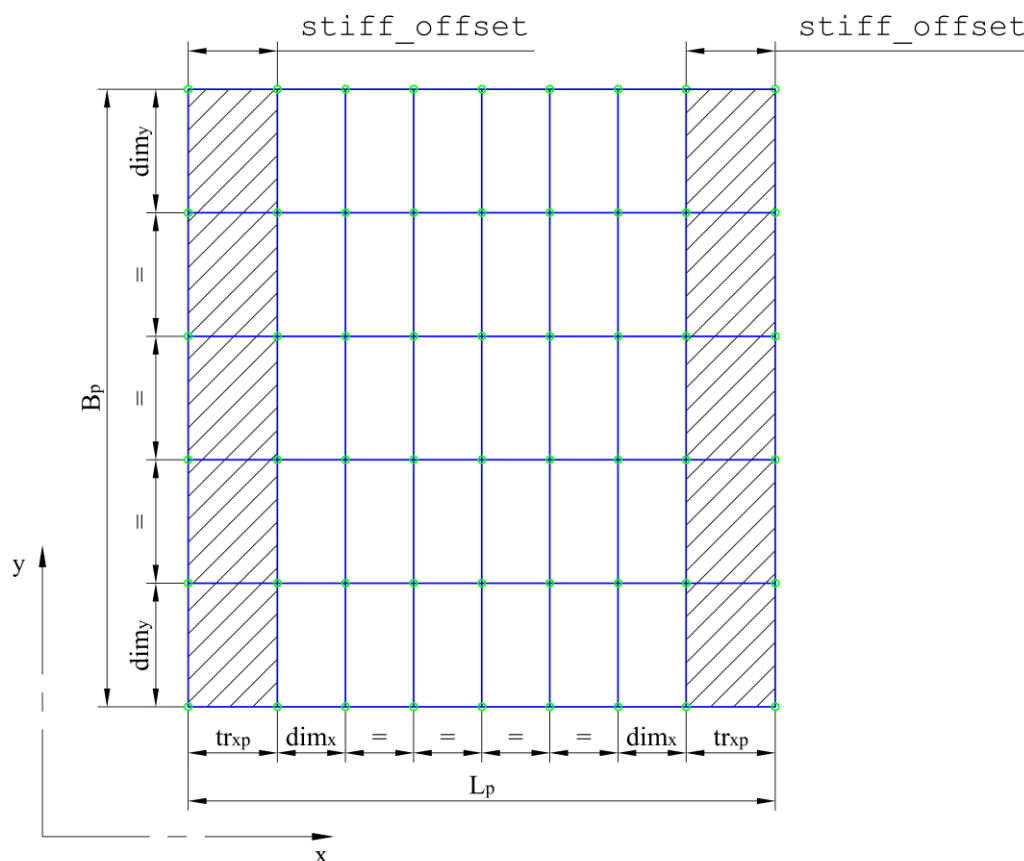
Pretpostavlja se da će razmak ukrepe do najbližeg jakog nosača `stiff_offset` biti veći od poluširine prirubnice T nosača, ili širine prirubnice L nosača, tj. da u tlocrtu prirubnica jakog nosača neće prekrivati ukrepu. U suprotnom algoritam vraća grešku sa porukom da je preostala udaljenost negativna jer dolazi do preklapanja.

Nakon izračuna dimenzije slijedi provjera aspektnog odnosa prijelaznog elementa prema maksimalnim dopuštenim aspektnim odnosom elemenata oplata $\alpha_{\max}^{\text{pe}}$. U slučaju da se prelazi ovaj aspektni odnos, susjedni konačni element osnovne mreže opločenja se spaja sa prijelaznim elementom, tj. prijelaznom elementu se pridodaje dimenzija dim_x osnovne mreže konačnih elemenata. Istovremeno mora biti ispunjen uvjet da je preostala udaljenost veća od osnovne dimenzije mreže, jer u suprotnom može doći do neželjenog spajanja sa susjednim elementom osnovne mreže. Ova provjera aspektnog odnosa pokriva slučaj kada kombinacija dimenzije preostale udaljenosti, broja elemenata n_{elem} i dimenzije osnovne mreže dim_x rezultira infinitezimalno malom vrijednosti.

Slika 6.17 Dijagram toka metode `transition_dim_x`

6.3.2 Prijelazni elementi varijante mreže V2

Prijelazni konačni elementi oplatae na varijanti mreže V2 se nalaze između elemenata osnovnih dimenzija i granica pojedine zone oplatae ili segmenta. Slika 6.18 prikazuje dimenzije i opseg prijelazne mreže na primjeru varijante mreže V2 na jednoj zoni oplatae sa poprečnim ukrepama, gdje su šrafurom istaknuti prijelazni konačni elementi.



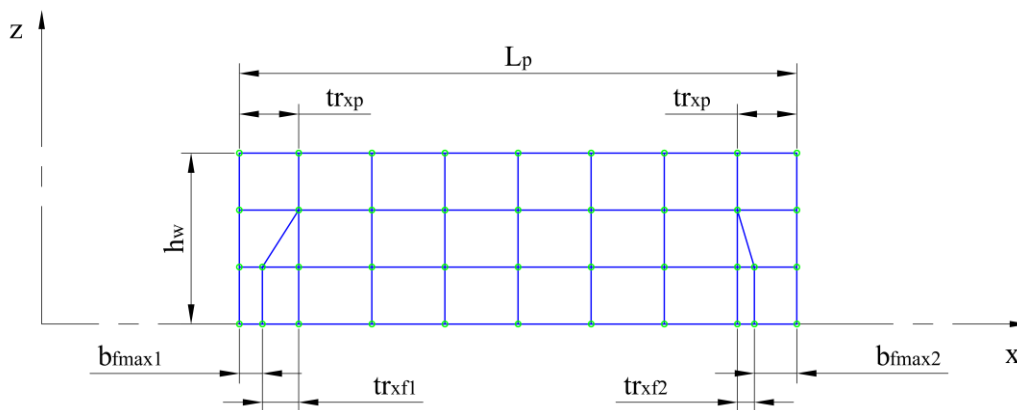
Slika 6.18 Opseg prijelazne mreže konačnih elemenata oplatae na varijanti mreže V2

Dimenzije prijelaznih elemenata oplatae na varijanti mreže V2 se određuju metodama `transition_dim_x` i `transition_dim_y` unutar bazne klase `MeshSize`. Princip algoritma je jednak kao i kod varijante mreže V1, a razlika u odnosu na metode unutar podklase `ElementSizeV1` je ta što u proračun ne ulaze širine prirubnica segmenata koji omeđuju zonu oplatae. Lokalnim razmatranjem pojedine zone oplatae varijante mreže V2, svaka zona oplatae može imati najviše jednu vrijednost dimenzije prijelaznog elemenata različitu od nule zbog simetričnog pozicioniranja ukrepa. Ove metode bi postale značajno složenije kada bi na modelu bilo omogućeno nesimetrično postavljanje ukrepa na zoni oplatae.

Dimenzije prijelaznih elemenata prirubnice na varijanti mreže V2 se određuju pomoćnom metodom `transition_dim` koja sadrži proračun za sve moguće slučajeve dopuštene varijantom mreže V2. Metoda `flange_transition_dim` zatim koristi ovu pomoćnu metodu i za odabrani segment vraća dimenziju prijelaznih elemenata na njegova oba kraja. Slika 6.19 prikazuje dimenzije prijelaznih konačnih elemenata varijante mreže V2 na primjeru struka jednog uzdužnog segmenta, u slučaju kada postoje prijelazni elementi oplata. Ovdje je vidljiva razlika između prijelaznih elemenata oplata dimenzija tr_{xp} i prijelaznih elemenata prirubnice na donjem rubu segmenta dimenzija tr_{xf1} , tr_{xf2} . Dimenzije prijelaznih elemenata prirubnice se računaju u odnosu na prijelazne elemente oplata, kada su oni različiti od nule.

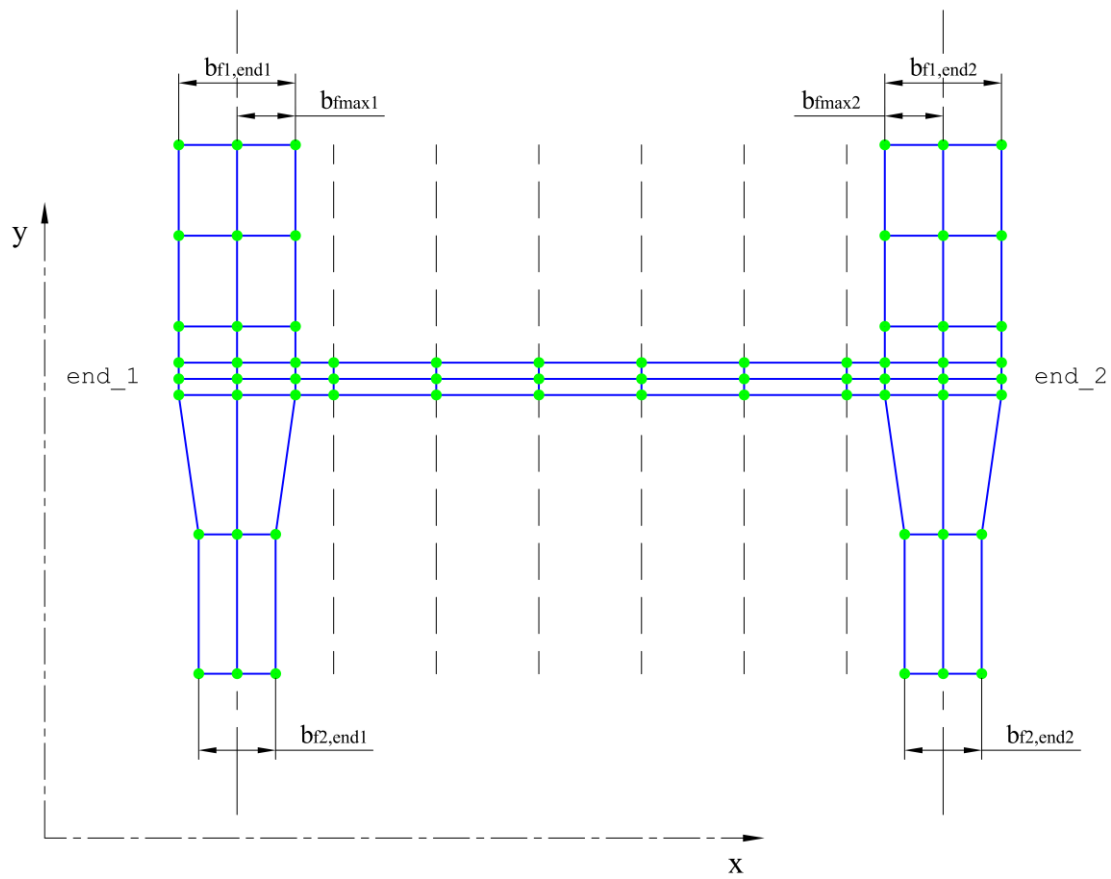
$$tr_{xf1} = tr_{xp} - b_{fmax1} \quad (6.1)$$

$$tr_{xf2} = tr_{xp} - b_{fmax2} \quad (6.2)$$



Slika 6.19 Prijelazni konačni elementi struka segmenta na varijanti mreže V2

Bitan podatak za određivanje dimenzija prijelaznih elemenata prirubnice i donjeg reda elemenata struka je širina, odnosno poluširina prirubnica segmenata jakih nosača u smjeru okomitom na promatrani segment. Ove širine prirubnica se određuju metodom `opposite_flange_width` koja vraća najveću širinu ili poluširinu prirubnica za oba kraja promatranog segmenta. Na slici 6.19 su poluširine prirubnica označene sa b_{fmax1} na prvom kraju (`end_1`) i b_{fmax2} na drugom kraju (`end_2`) segmenta. Na ovaj način se omogućuje izrada ispravnog prijelaza mreže za slučaj kada jaki nosači imaju segmente različitih širina prirubnica. Metoda također sadrži provjeru tipa nosača, te vraća poluširinu prirubnice u slučaju da je nosač T tipa, kao što je prikazano slikom 6.20. Ukoliko je nosač L tipa, postoje provjere kojima se određuje treba li dimenzija b_{fmax1} ili b_{fmax2} biti jednaka nuli. Zbog ograničenja varijante mreže V2 se unutar ove metode ne razmatra broj elemenata po širini prirubnice različit od 1.

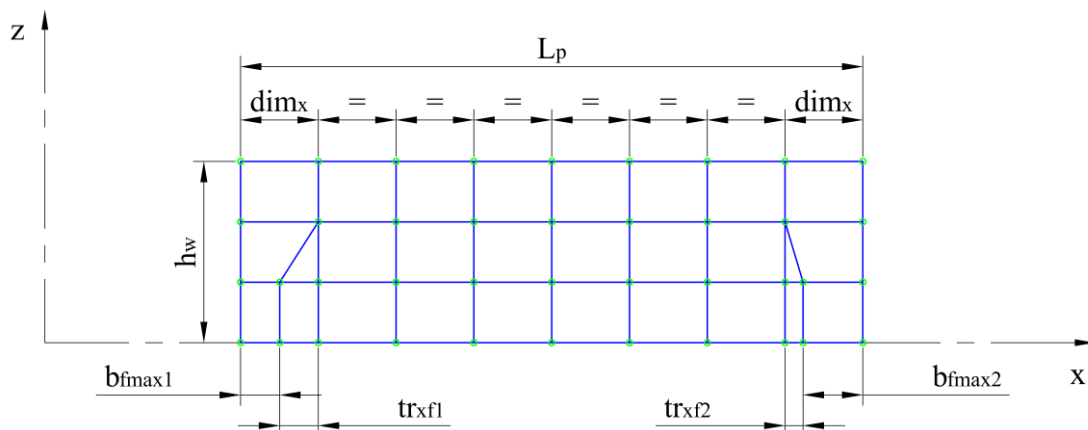


Slika 6.20 Širine prirubnica okomitih na promatrani segment

U slučaju da na pripadajućem retku ili stupcu zona oplata nema prijelaznih elemenata oplata kako je prikazano slikom 6.21, dimenzije prijelaznih elemenata na struku segmenta se računaju u odnosu na veličinu elementa osnovne mreže dim_x ili dim_y .

$$tr_{xf1} = dim_x - b_{fmax1} \quad (6.3)$$

$$tr_{xf2} = dim_x - b_{fmax2} \quad (6.4)$$

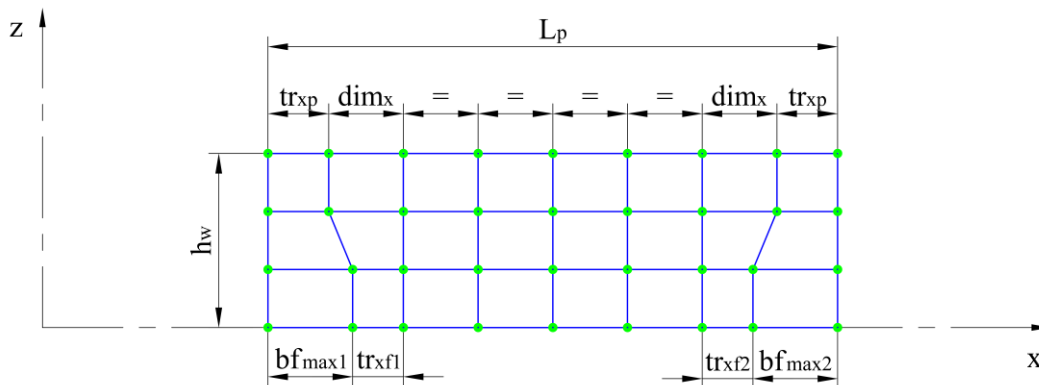


Slika 6.21 Prijelazni konačni elementi struka, bez prijelaznih elemenata oplata

Metodom `transition_dim` su obuhvaćeni i slučajevi kada na prijelaznom redu elemenata nema trokutastih konačnih elemenata zbog odnosa veličina širine prirubnice i dimenzija konačnih elemenata oplata. Slikom 6.22 je prikazan primjer mreže na struku segmenta gdje su širine prirubnica okomitih segmenata veće od prijelaznih elemenata oplata. U ovom slučaju se dimenzije prijelaznih elemenata prirubnice računaju u odnosu na veličinu elementa osnovne mreže i prijelazne mreže oplata:

$$tr_{xf1} = tr_{xp} + dim_x - b_{fmax1} \quad (6.5)$$

$$tr_{xf2} = tr_{xp} + dim_x - b_{fmax2} \quad (6.6)$$

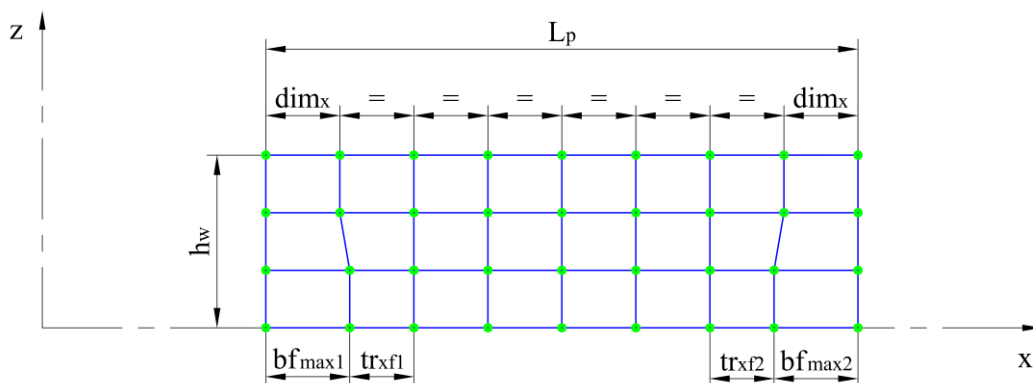


Slika 6.22 Prijelazni konačni elementi struka, bez trokuta

Slikom 6.23 je prikazan primjer mreže na struku segmenta gdje su širine prirubnica okomitih segmenata veće od prijelaznih elemenata oplata, a na oplati nema prijelaznih elemenata. U ovom slučaju se dimenzije prijelaznih elemenata prirubnice računaju u odnosu na veličinu elementa osnovne mreže.

$$tr_{xf1} = 2 \cdot dim_x - b_{fmax1} \quad (6.7)$$

$$tr_{xf2} = 2 \cdot dim_x - b_{fmax2} \quad (6.8)$$



Slika 6.23 Prijelazni konačni elementi struka, bez trokuta i prijelaznih elemenata oplata

Granični slučaj koji predstavlja ograničenje izvedivosti varijante mreže V2 je kada dimenzija prirubnice segmenta okomitog na promatrani prelazi sumu prve dvije dimenzije konačnih elemenata opločenja. Za slučaj kada postoje prijelazni elementi oplata su granice prikazane jednadžbama 6.9 i 6.10, a kada ne postoje jednadžbama 6.11 i 6.12.

$$b_{fmax1} > tr_{xp} + dim_x \quad (6.9)$$

$$b_{fmax2} > tr_{xp} + dim_x \quad (6.10)$$

$$b_{fmax1} > 2 \cdot dim_x \quad (6.11)$$

$$b_{fmax2} > 2 \cdot dim_x \quad (6.12)$$

Metoda `mesh_V2_tr_check` unutar klase `ModelCheck` sadrži kriterije za provjeru ovih graničnih slučajeva i poziva prilagođene greške iz modula `custom_exceptions.py`. Provjera ovih graničnih slučajeva je implementirana u okviru izrade prijelaznog reda elemenata, u koraku određivanja broja trokutastih elemenata unutar metode `identify_num_of_tris`. Kada se identificira granični slučaj, program zaustavlja izradu mreže i vraća odgovarajuću grešku.

6.3.3 Globalno razmatranje dimenzija prijelaznih elemenata oplata

Susjedne zone opločenja mogu imati različito usmjerenje ukrepa budući da se dozvoljava mješoviti sustav orebrenja konstrukcije. Prema tome svaka zona oplata može zahtijevati različite dimenzije prijelaznih elemenata, što je potrebno uskladiti usvajanjem iste dimenzije prijelaznih elemenata za cijeli redak zona oplata između para susjednih jakih uzdužnih nosača i za cijeli stupac između para susjednih jakih poprečnih nosača.

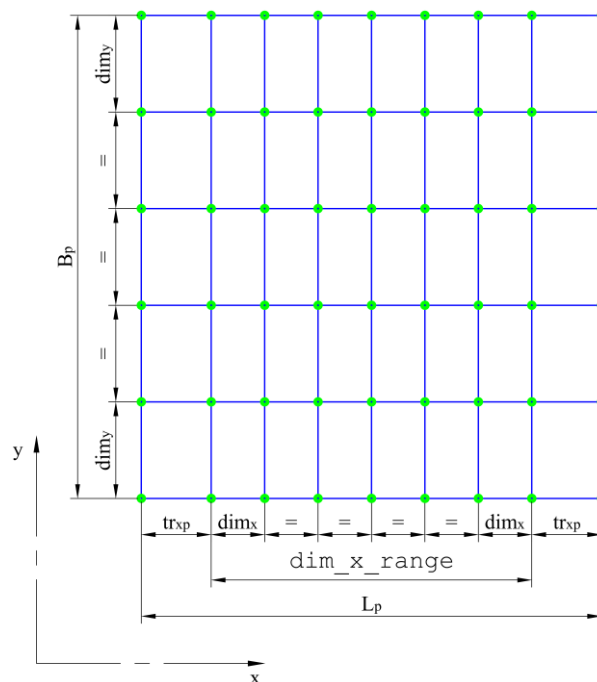
Metoda `assign_transition_dim_x` vraća polje sa svim dimenzijama prijelaznih elemenata u smjeru globalne x osi za sve stupce zona oplata obuhvaćene izradom mreže. Prvi redak sadrži dimenziju uz prvi poprečni segment, a drugi redak dimenziju uz drugi poprečni segment zone oplata. Analogno metoda `assign_transition_dim_x` vraća dimenzije u smjeru globalne osi y uz uzdužne segmente.

Budući da varijanta mreže V1 ne dozvoljava različite širine prirubnica duž pojedinog jakog nosača, a prijelazni elementi oplata varijante V2 ne ovise o širini prirubnica, globalno usklađivanje ovih dimenzija je isključivo na temelju orijentacije ukrepa. Ako se između dva susjedna jaka uzdužna nosača pronađe zona oplata sa uzdužnim orebrenjem, usvajaju se lokalno određene dimenzije tr_{yp} prijelaznih elemenata te zone oplata i izlazi iz petlje naredbom `break`.

U protivnom, ako su sve zone oplata između uzdužnih nosača orebrane poprečno, dimenzija tr_{yp} prijelaznih elemenata će biti 0. Analogno vrijedi i za određivanje dimenzije prijelaznih elemenata tr_{xp} u smjeru globalne osi x , između dva susjedna jaka poprečna nosača. U slučaju da prirubnica ne postoji, dimenzija prijelaznog elementa je isključivo određena prema osnovnim dimenzijama mreže i razmaku ukrepa od jakih nosača $stiff_offset$.

6.4 Broj konačnih elemenata

Broj elemenata na zoni oplata sa dimenzijama osnovne mreže konačnih elemenata se određuje prema rasponu na kojemu se ovi elementi nalaze, metodom `get_base_element_number`. Prilikom određivanja ovog raspona dimenzija se uzima u obzir vrsta mreže na zoni oplata, a prema tome se preuzima puna ili polovična dimenzija zone oplata metodama `get_long_plate_dim` i `get_tran_plate_dim`. Slikom 6.24 je na primjeru varijante mreže V2 prikazan raspon dim_x_range osnovnih dimenzija mreže dim_x u smjeru globalne osi x . Broj elemenata u ovom najjednostavnijem slučaju se određuje dijeljenjem raspona dim_x_range sa osnovnom dimenzijom mreže dim_x i zaokruživanjem na cjelobrojnu vrijednost.



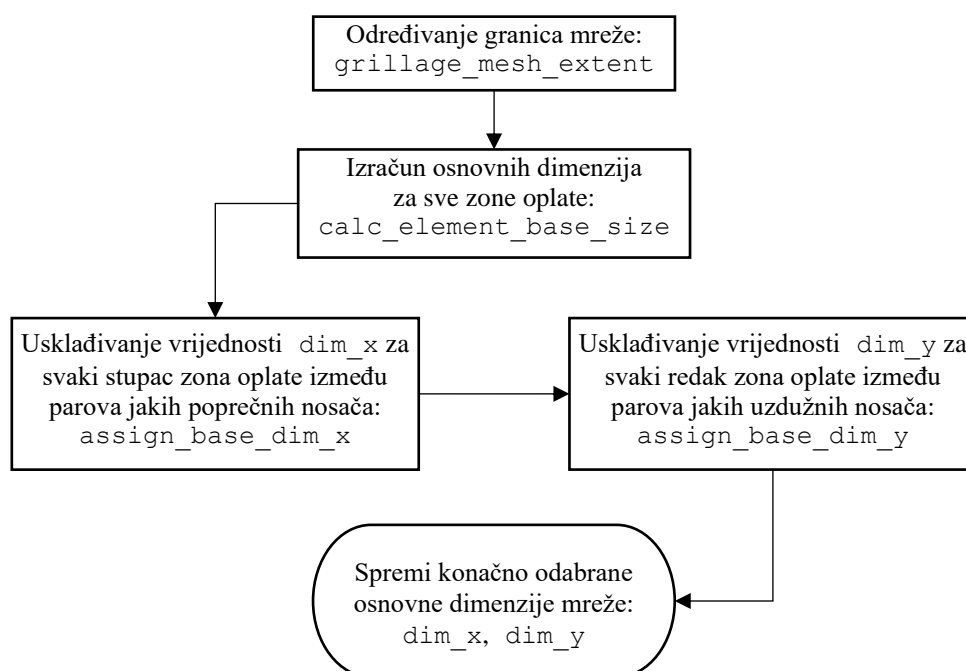
Slika 6.24 Broj konačnih elemenata osnovne mreže oplata

Ako između ukrepa prolazi os simetrije i ta os simetrije prepolavlja konačni element osnovne mreže, rezultat dijeljenja se ne smije odmah zaokružiti zbog ostatka dijeljenja od 0.5 i moguće numeričke greške. Broj prijelaznih elemenata i elemenata prirubnica se temelji na odgovarajućoj dimenziji istog. Ako je dimenzija jednaka nuli, konačni element ne postoji.

6.5 Razmaci između rubnih čvorova

Na temelju izračunatih dimenzija i broja konačnih elemenata osnovne i prijelazne mreže, za svaki element konstrukcije se generira niz razmaka između rubnih čvorova. Za svaku zonu oplata su to dimenzije u smjeru globalnih x i y osi, a za svaki segment dimenzije u pozitivnom smjeru orijentacije jakog nosača kojemu segment pripada.

Prije određivanja razmaka čvorova je potrebno provesti proračun dimenzija osnovne mreže konačnih elemenata metodom `calculate_mesh_dimensions`. Ova metoda poziva metodu za određivanje granica mreže, na temelju kojih se lokalno određuju dimenzije osnovne mreže metodom `calc_element_base_size`. Te dimenzije su usklađene globalnim razmatranjem konstrukcije metodama `assign_base_dim_x` i `assign_base_dim_y`, nakon čega se spremaju u rječnike `mesh_dim_x` i `mesh_dim_y`. Na ovaj način se u idućim koracima izbjegava ponovni izračun osnovnih dimenzija i višestruko izvršavanje brojnih petlji. Dijagram toka metode `calculate_mesh_dimensions` prikazan je slikom 6.25.



Slika 6.25 Dijagram toka metode `calculate_mesh_dimensions`

Metode `plate_edge_node_spacing_x` i `plate_edge_node_spacing_y` služe za izradu niza razmaka rubnih čvorova svake zone oplata. Za pojednostavljenje programskog koda se koristi pomoćna metoda `save_node_spacing`, koja vrijednost razmaka sprema odabrani broj puta u rječnik. Ukoliko npr. elementi prirubnice ili prijelazni elementi ne postoje, njihov broj je jednak nuli, a time je i odabrani broj unosa u rječnik jednak nuli. U ovom slučaju će početna i krajnja vrijednost raspona biti jednaka, a tada funkcija `range` rezultira praznom listom [11] i metoda `save_node_spacing` preskače unos u rječnik.

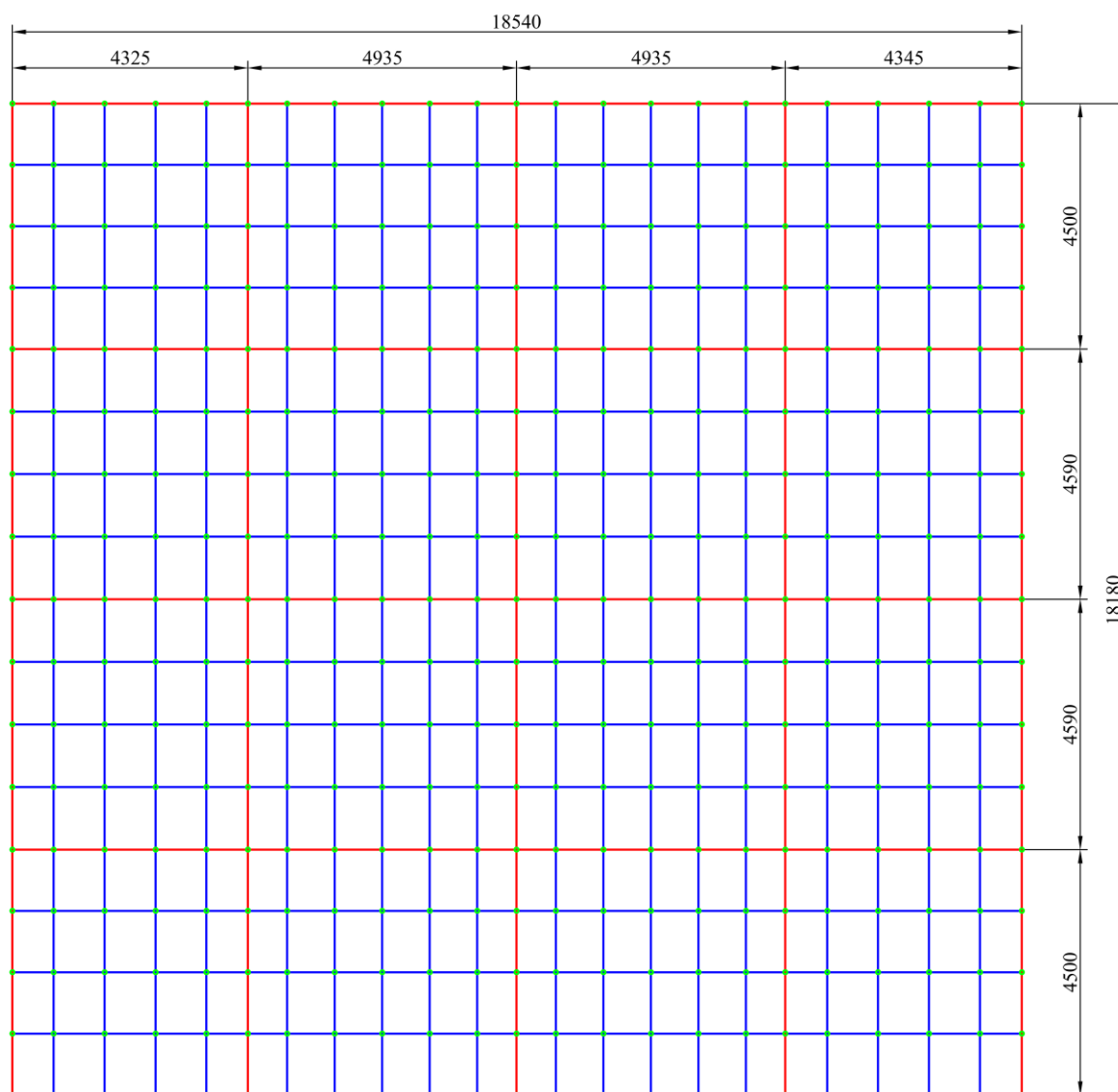
Razmaci između rubnih čvorova oplata se spremaju sljedećim redoslijedom:

1. Elementi prirubnice na prvom kraju
2. Prijelazni elementi na prvom kraju
3. Elementi osnovne mreže
4. Polovični elementi osnovne mreže
5. Prijelazni elementi na drugom kraju
6. Elementi prirubnice na drugom kraju

Za varijante mreže bez preslikavanja elemenata prirubnica na mrežu oplata kao što je *V2*, koriste se metode `plate_edge_node_spacing_x` i `plate_edge_node_spacing_y` u baznoj klasi `MeshSize`. Razlika u odnosu na metode za varijantu mreže *V1* je ta što nema upisa dimenzija elemenata prirubnica u niz dimenzija razmaka čvorova oplata. Za razmake između čvorova prirubnica varijante mreže *V2* služi posebna metoda `flange_edge_node_spacing` unutar podklase `ElementSizeV2`.

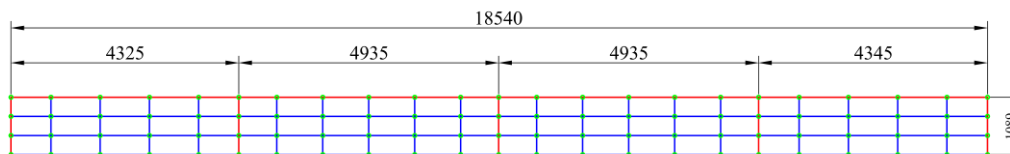
7. IZRADA MREŽE KONAČNIH ELEMENATA

Mreža konačnih elemenata se zasebno izrađuje za svaki element konstrukcije koji je obuhvaćen opsegom izrade mreže, sukladno odabranoj ili automatski prepoznatoj osi simetrije. Duž rubova svake zone oplata i krajeva segmenta dolazi do preklapanja inicijalno generiranih čvorova zbog odabranog pristupa nezavisne izrade mreže. Ovi rubovi sa preklapanjem čvorova opločenja su prikazani crvenom bojom na slici 7.1 za punu varijantu mreže V2 ispitne varijante konstrukcije hc_var_1. Odabrani aspektni odnosi za izradu ove mreže su $\alpha_{\max}^{\text{fe}} = 9$, $\alpha_{\max}^{\text{pe}} = 4$, $\alpha_{\text{p}}^{\text{pe}} = 3$.



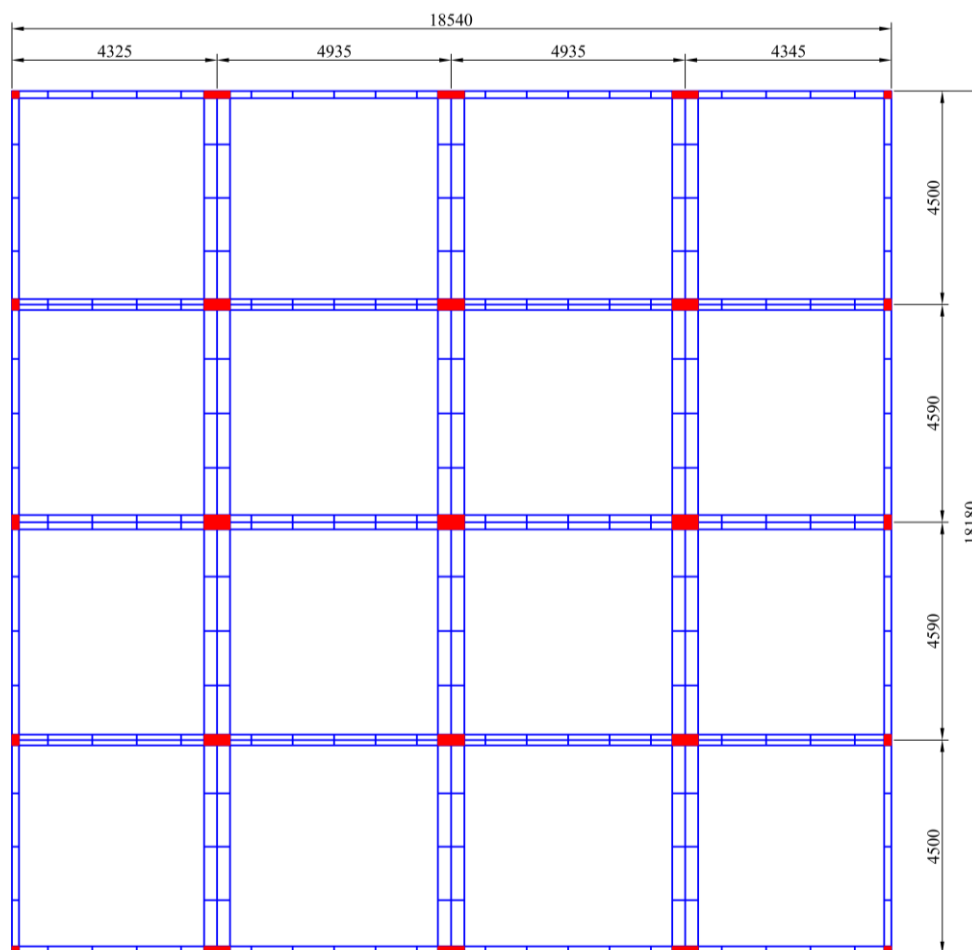
Slika 7.1 Rubovi sa preklapanjem čvorova oplata, ispitna varijanta hc_var_1

Na slici 7.2 je prikazana ista varijanta mreže na `hc_var_1`, gdje su crvenom bojom označeni rubovi strukova segmenata duž kojih dolazi do preklapanja čvorova. Prilikom izrade mreže se ovi čvorovi spremaju u zaseban rječnik kako bi se ubrzao rad algoritma za identifikaciju preklapanja.



Slika 7.2 Rubovi sa preklapanjem čvorova struka, ispitna varijanta `hc_var_1`

Na mreži prirubnica dolazi do preklapanja elemenata na mjestima križanja jakih nosača, te se iz istih razloga ovi elementi spremaju u zaseban rječnik zbog algoritma za identifikaciju preklapljenih elemenata. Na slici 7.3 su na primjeru iste ispitne varijante `hc_var_1` za mrežu punog modela crvenom bojom označeni konačni elementi prirubnica na mjestima preklapanja elemenata.



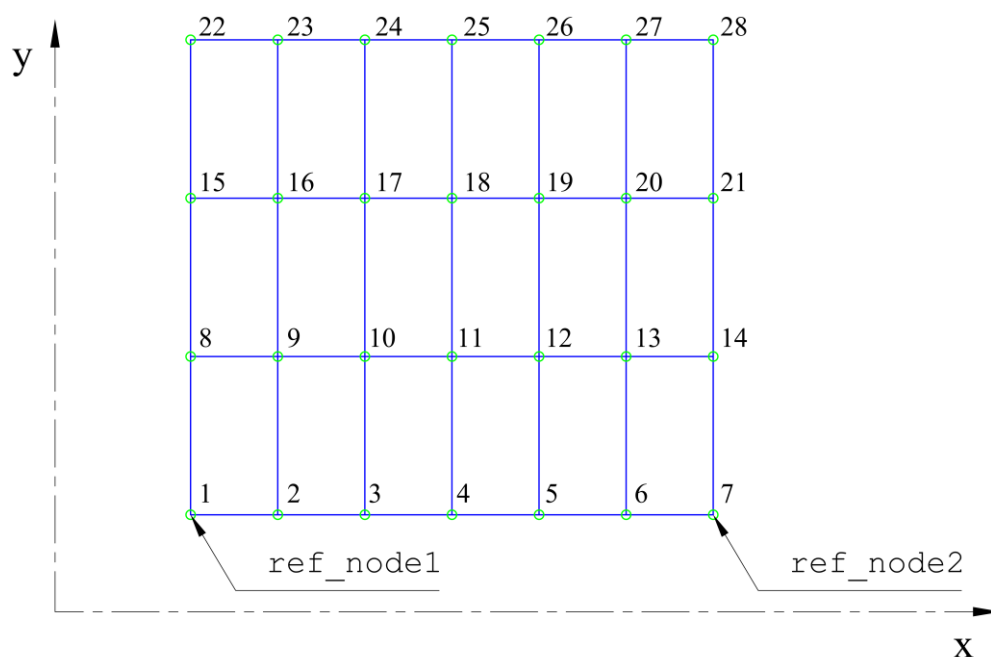
Slika 7.3 Preklapanje elemenata prirubnica, ispitna varijanta konstrukcije `hc_var_1`

7.1 Izrada mreže oplata

Mreža konačnih elemenata opločenja se izrađuje zasebno za svaku zonu oplata koja je uključena u opseg izrade mreže. Mreža opločenja nema više različitih varijanti, prema tome u programskom kodu postoji samo jedna klasa `PlateMesh` koja sadrži algoritme za izradu mreže konačnih elemenata na jednoj zoni oplata.

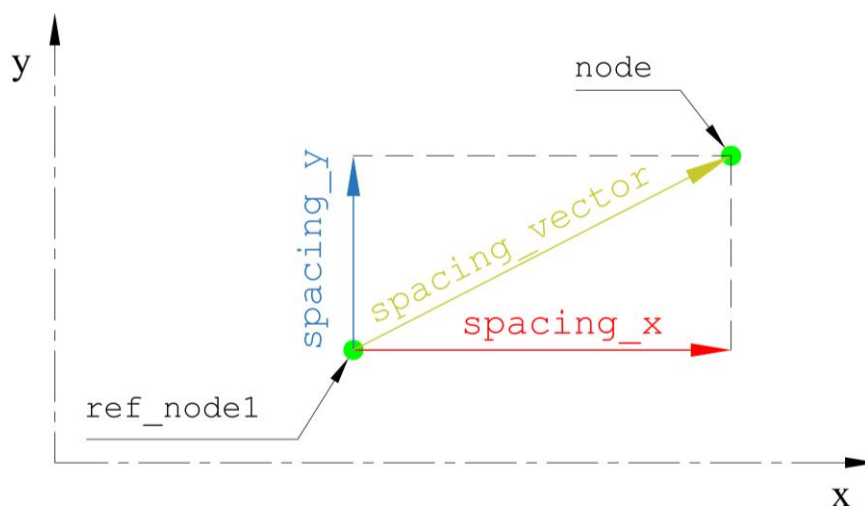
7.1.1 Čvorovi zone oplata

Čvorovi mreže pojedine zone oplata se generiraju na temelju niza dimenzija razmaka između rubnih čvorova i podataka sadržanih u objektu `Plate`. Slika 7.4 prikazuje primjer numeracije čvorova na jednoj zoni oplata sa ukupno 28 čvorova i 18 konačnih elemenata. Referentni čvorovi `ref_node1` i `ref_node2` se nalaze na krajevima prvog uzdužnog segmenta `long_seg1` koji definira tu zonu oplata, a služe za određivanje jediničnog vektora smjera `unit_ref_vector`.



Slika 7.4 Referentne točke i numeracija čvorova na zoni oplata

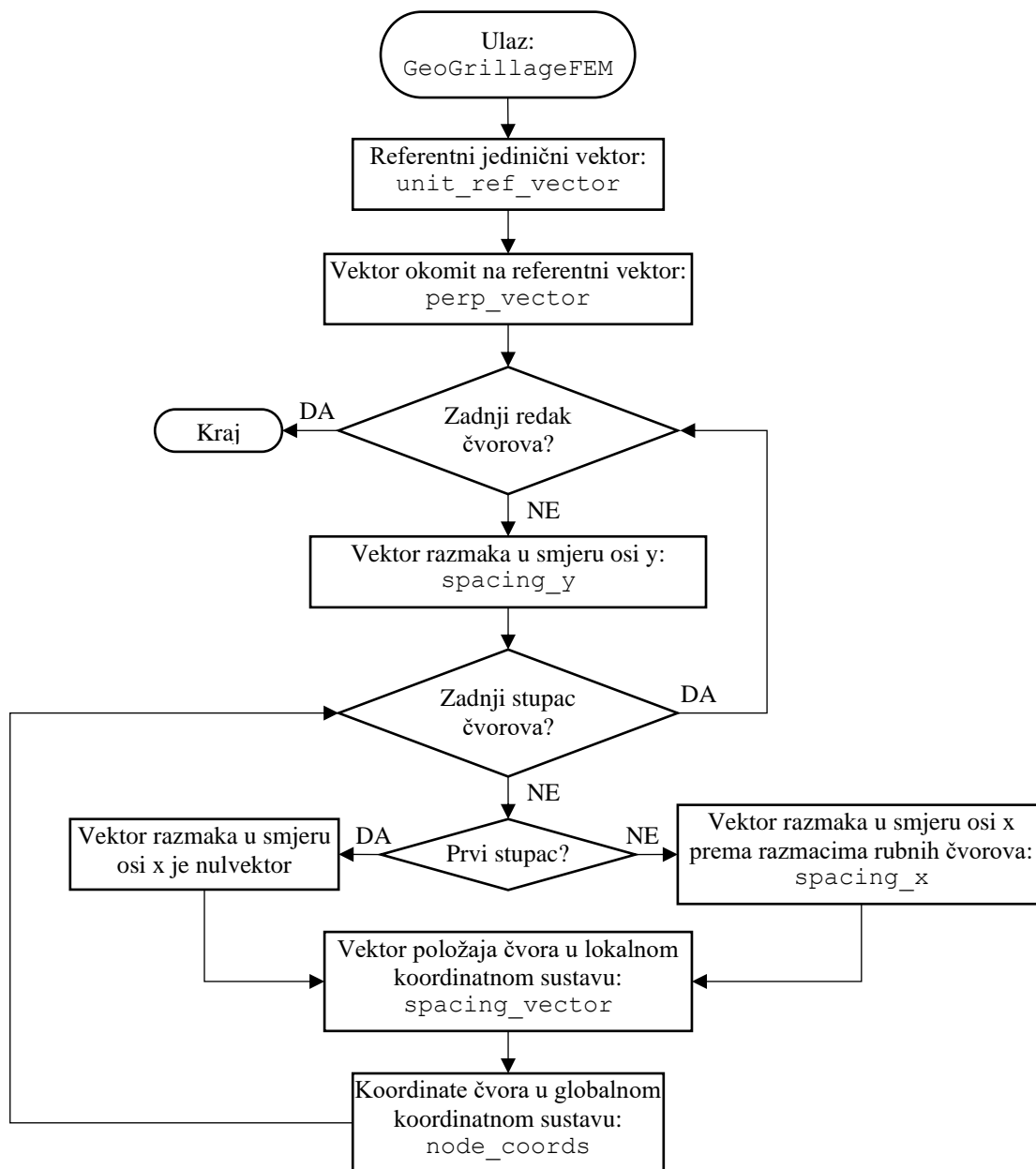
Metodom `generate_plate_nodes` unutar klase `PlateMesh` se generiraju svi čvorovi na jednoj zoni oplata. Lokalne koordinate ovih čvorova se određuju vektorski u odnosu na prvi referentni čvor, vektorskim zbrojem `spacing_x` i `spacing_y` prema slici 7.5. Koordinate čvora `node` u globalnom koordinatnom sustavu se zatim određuju zbrojem vektora položaja `spacing_vector` i koordinata prvog referentnog čvora `ref_node1`.



Slika 7.5 Vektorsko određivanje koordinata čvorova oplata

Numeracija i izrada čvorova kreće od prvog referentnog čvora `ref_node1` i nastavlja u smjeru jediničnog vektora smjera za svaki redak čvorova. Prvi čvor prve zone oplata uvijek kreće sa početnim identifikacijskim brojem 1, a numeracija čvorova na idućim zonama oplata i segmentima se nastavlja prema identifikacijskom broju zadnjeg upisanog čvora uvećanog za 1. Dijagram toka metode `generate_plate_nodes` je prikazan slikom 7.6.

Ukupan broj redaka i stupaca čvorova pojedine zone oplata se određuje metodom `get_mesh_limits`, koja broj čvorova određuje na temelju broja upisanih dimenzija razmaka rubnih čvorova. Za broj stupaca čvorova se razmatra broj dimenzija u smjeru globalne osi x , a za broj redaka se razmatra broj dimenzija u smjeru osi y .



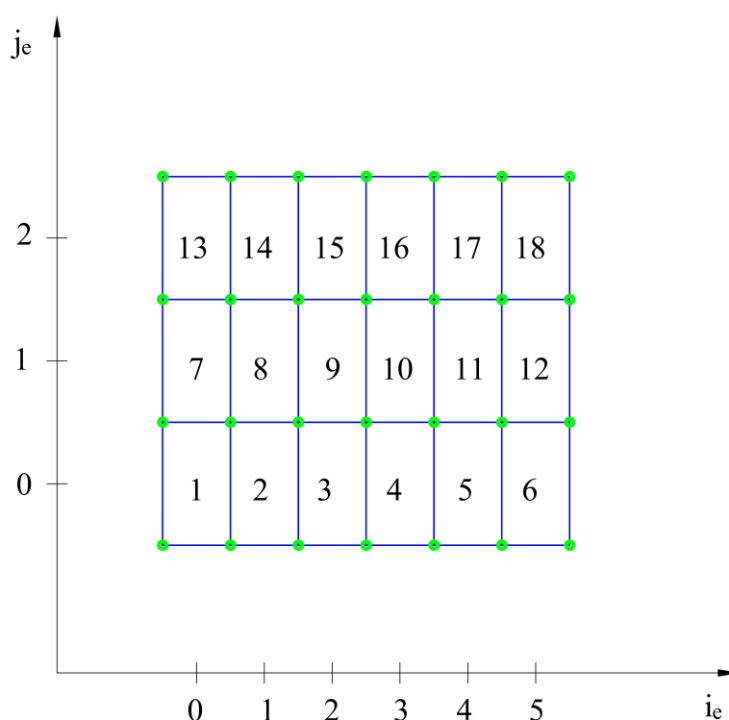
Slika 7.6 Dijagram toka metode generate_plate_nodes

7.1.2 Konačni elementi opločenja

Metodom `generate_plate_elements` unutar klase `PlateMesh` se generiraju svi elementi na pojedinoj zoni oplata. Za svaku zonu oplata se izrađuje referentno dvodimenzijsko polje identifikacijskih brojeva svih čvorova koji se nalaze na toj zoni oplata. Ovo referentno polje raspoređuje identifikacijske brojeve čvorova prema njihovom relativnom položaju i služi za izradu svih konačnih elemenata na odabranoj zoni oplata. Za zonu oplata prikazanu na slici 7.4 referentno polje čvorova ima sljedeći oblik:

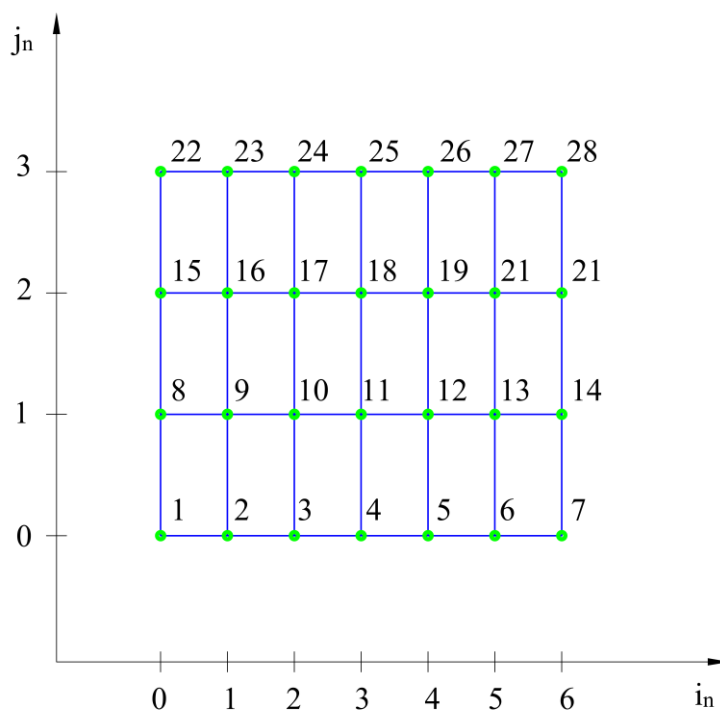
$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Numeracija i izrada konačnih elemenata, jednako kao i za čvorove, kreće od prvog referentnog čvora `ref_node1` i nastavlja u smjeru jediničnog vektora smjera za svaki redak elemenata. Slika 7.7 prikazuje numeraciju elemenata na primjeru zone oplata prikazane slikom 7.4.



Slika 7.7 Numeracija i indeksi pločastih konačnih elemenata na zoni oplata

Čvorovi koji pripadaju promatranom konačnom elementu se određuju petljom kroz sve retke j_e i stupce i_e elemenata, unutar granica određenih metodom `get_mesh_limits`. Indeksi redaka j_n i stupaca i_n čvorova istog primjera zone oplata, koji odgovaraju indeksima referentnog polja čvorova prikazani su slikom 7.8. Unutar tijela petlje se preko indeksa redaka j_e i stupaca i_e za svaki element određuju indeksi položaja pripadajućih identifikacijskih brojeva čvora u referentnom polju čvorova. Jednadžbama 7.2 – 7.5 su prikazani izrazi kojima se povezuju indeksi elemenata i indeksi identifikacijskih brojeva pripadajućih čvorova u referentnom polju.



Slika 7.8 Numeracija i indeksi čvorova na zoni oplata

$$node_1 = j_e, i_e \quad (7.2)$$

$$node_2 = j_e, i_e + 1 \quad (7.3)$$

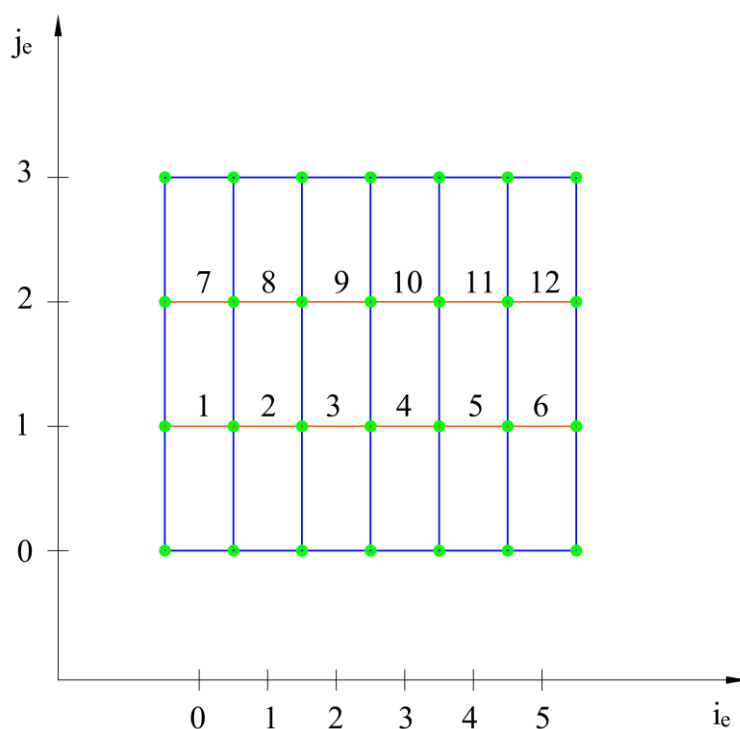
$$node_3 = j_e + 1, i_e + 1 \quad (7.4)$$

$$node_4 = j_e + 1, i_e \quad (7.5)$$

7.1.3 Konačni elementi ukrepa

Metodom `identify_beam_nodes` unutar klase `PlateMesh` se identificiraju položaji ukrepa na pojedinoj zoni oplate neovisno o dimenzijama konačnih elemenata. Identifikacija se temelji na poznatom razmaku između ukrepa i nizu dimenzija rubnih čvorova `edge_nodes` u odgovarajućem smjeru. Ova metoda vraća listu indeksa redaka ili stupaca referentnog polja čvorova na kojima se nalaze ukrepe, ovisno o orijentaciji.

Na temelju ove liste indeksa se metodom `generate_beam_elements` izrađuju gredni konačni elementi između odgovarajućih čvorova oplate. Slično metodi za izradu pločastih konačnih elemenata oplate, za svaku zonu oplate se izrađuje referentno dvodimenzijsko polje identifikacijskih brojeva čvorova `node_id_array`. Slikom 7.9 je prikazana numeracija grednih konačnih elemenata uzdužnih ukrepa na zoni oplate prikazane slikom 7.8. Na ovom primjeru će metoda `identify_beam_nodes` vratiti listu sa indeksima redaka 1 i 2 na kojima se nalaze ukrepe. Petljom kroz sve stupce elemenata na ovim redcima se preko indeksa redaka j_e i stupaca i_e za svaki gredni element određuju pripadni identifikacijski brojevi čvorova u referentnom polju čvorova. Metoda također sadrži provjeru nalazi li se ukrepa na osi simetrije i u tom slučaju dodjeljuje svojstvo grede sa pola originalnih karakteristika krutosti pomoću metode `get_half_stiffener_beam_property`.



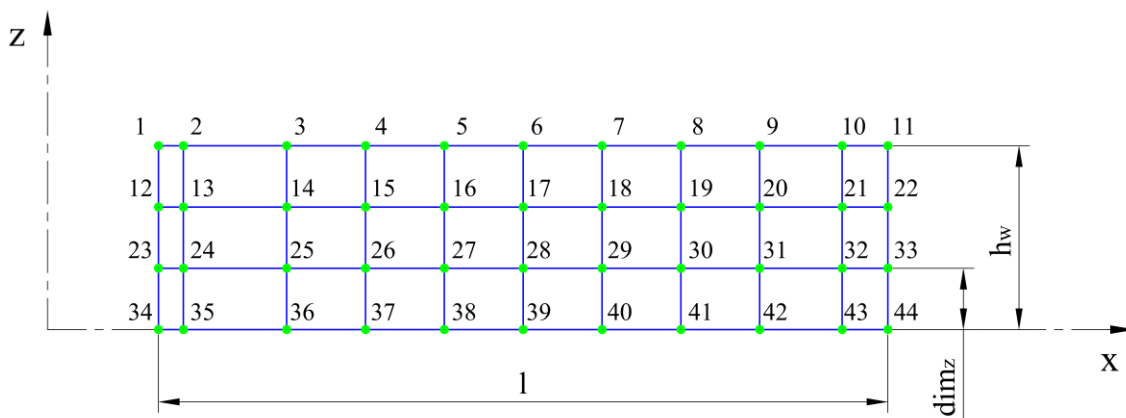
Slika 7.9 Numeracija i indeksi grednih konačnih elemenata na zoni oplate

7.2 Izrada konačnih elemenata jakih nosača

Mreža konačnih elemenata jakih nosača se izrađuje zasebno za svaki segment koji pripada pojedinom jakom nosaču, a koji je uključen u opseg izrade mreže. Mreža strukova segmenata ima više različitih varijanti, prema tome u programskom kodu za dvije varijante mreže *V1* i *V2* osim bazne klase `SegmentMesh` postoje podklase `SegmentMeshV1` i `SegmentMeshV2`.

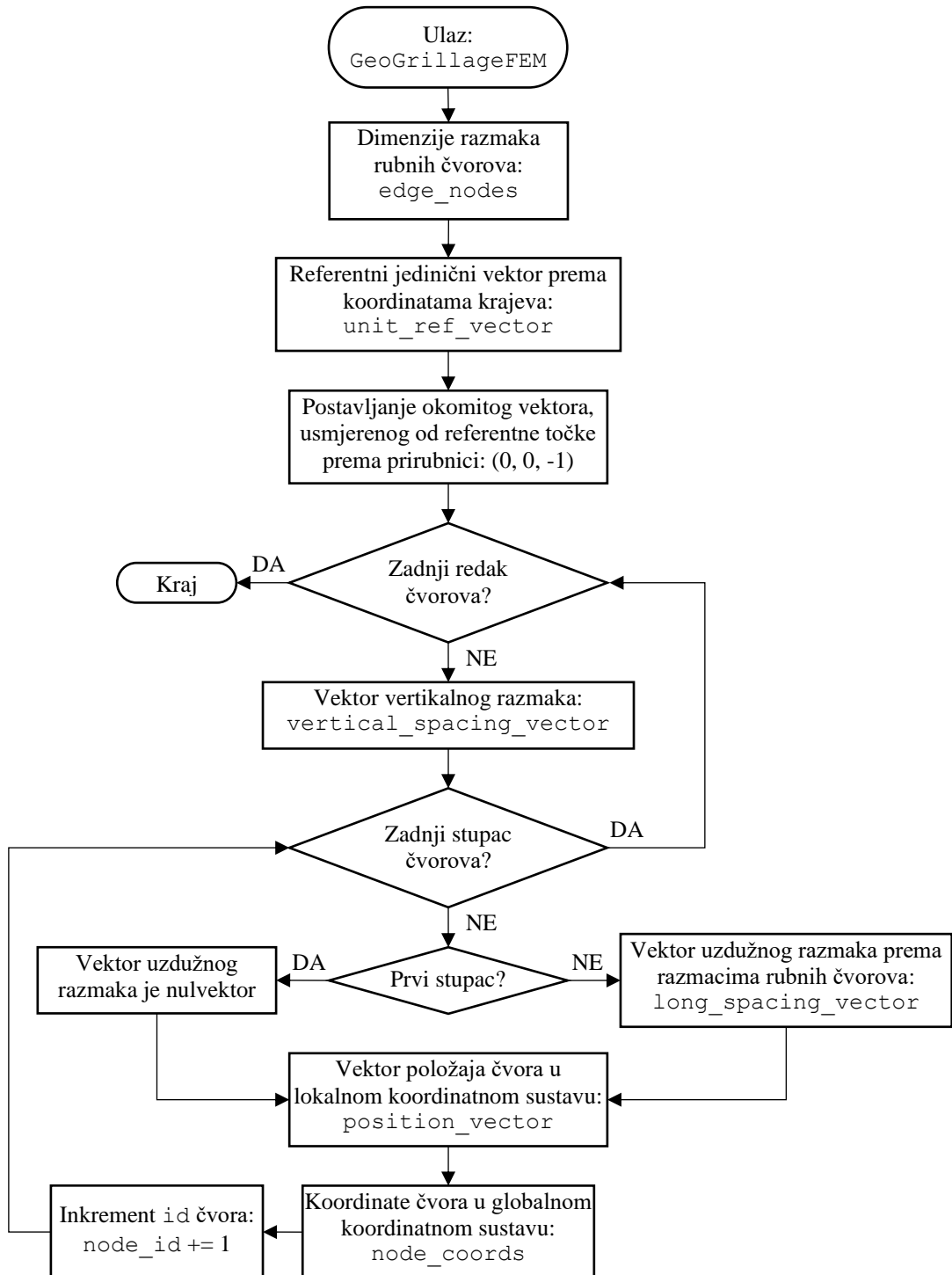
7.2.1 Čvorovi struka segmenta za varijantu mreže *V1*

Čvorovi mreže struka pojedinog segmenta za varijantu mreže *V1* se generiraju na temelju podataka sadržanih u objektu `Segment` i niza dimenzija razmaka između rubnih čvorova, preuzetih od pripadajuće zone oplata. Metoda `get_plate_edge_nodes` unutar bazne klase `SegmentMesh` služi za identifikaciju prve zone oplata koja je definirana promatranim segmentom. Ovisno o smjeru jakog nosača `direction` kojemu pripada promatrani segment, sa te zone oplata se preuzimaju dimenzije razmaka rubnih čvorova oplata u smjeru globalne osi x ili y . Ove dimenzije se zatim zapisuju u rječnik `edge_plate_nodes` unutar bazne klase `SegmentMesh`, kako se proces identifikacije pripadajuće zone oplata ne bi više puta ponavljao za isti segment. Slikom 7.10 je prikazan primjer numeracije čvorova na struku jednog uzdužnog segmenta sa ukupno 44 čvora i 30 konačnih elemenata za varijantu mreže *V1*.



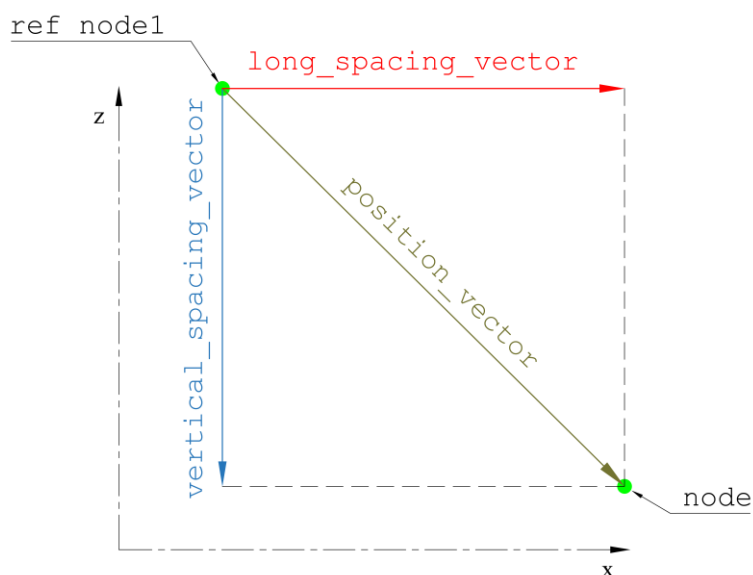
Slika 7.10 Numeracija čvorova struka segmenta, varijanta mreže *V1*

Metodom `generate_web_nodes` unutar podklase `SegmentMeshV1` se generiraju svi čvorovi na struku pojedinog segmenta za varijantu mreže *V1*. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.11. Algoritmom unutar ove metode se lokalne koordinate čvorova struka određuju vektorski u odnosu na prvi referentni čvor segmenta `ref_node1`, koji je definiran metodom `get_segment_node1`. Na slici 7.10 se ovaj čvor nalazi u razini spoja segmenta sa opločnjem, na visini $z = h_w$ i označen je identifikacijskim brojem čvora 1.



Slika 7.11 Dijagram toka metode generate_web_nodes

Slika 7.12 prikazuje vektor položaja pojedinog čvora `position_vector`, određen zbrojem vektora razmaka u aksijalnom smjeru segmenta `long_spacing_vector` i vektora u smjeru visine struka `vertical_spacing_vector`. Koordinate čvora `node` u globalnom koordinatnom sustavu se određuju zbrojem vektora položaja `position_vector` i koordinata referentnog čvora `ref_node1`.



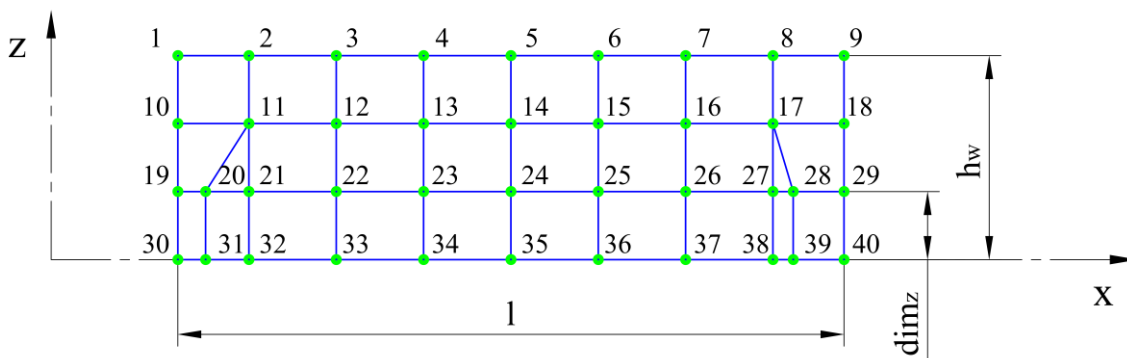
Slika 7.12 Vektorsko određivanje koordinata čvorova segmenta

Ukupan broj stupaca čvorova pojedinog segmenta se ne može odrediti jednako kao i za zonu oplata metodom `get_mesh_limits`, zbog potrebe za identifikacijom smjera jakog nosača. Broj stupaca čvorova se tada određuje na temelju broja upisanih dimenzija razmaka rubnih čvorova sadržanih u rječniku `edge_plate_nodes`. Broj redaka čvorova je određen prema ulaznom parametru broja elemenata po visini struka `min_num_eweb`.

7.2.2 Čvorovi struka segmenta za varijantu mreže V2

Čvorovi mreže struka pojedinog segmenta za varijantu mreže V2 se generiraju na temelju podataka sadržanih u objektu `Segment`, te niza dimenzija razmaka između rubnih čvorova prirubnice i pripadajuće zone oplata. Razmaci između rubnih čvorova opločenja se preuzimaju od pripadajuće zone oplata, jednako kao i za varijantu mreže VI. Razmaci između rubnih čvorova prirubnica se određuju metodom `flange_edge_node_spacing` unutar podklase `ElementSizeV2`, a prilikom izrade mreže svakog segmenta se zapisuju u rječnik `edge_flange_nodes`.

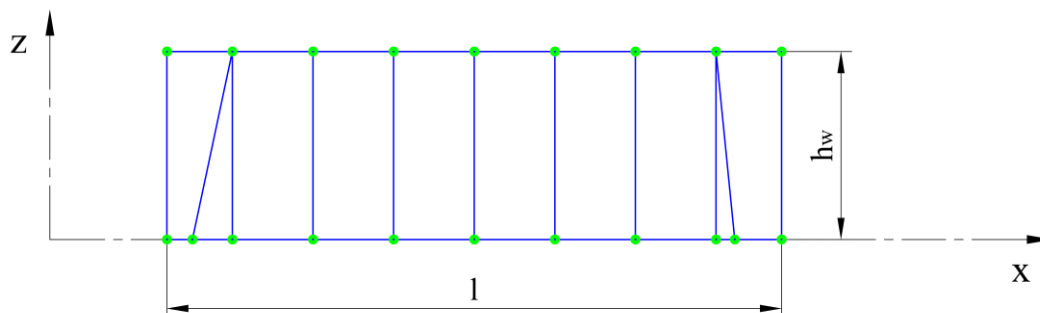
Zbog zasebnog određivanja niza dimenzija rubnih čvorova oplata i prirubnica na varijanti V2, broj čvorova ne mora biti jednak na gornjem i donjem rubu struka segmenta. Slikom 7.13 je prikazan primjer numeracije čvorova na struku jednog uzdužnog segmenta duljine l sa ukupno 40 čvorova, 26 četverokutnih i 2 trokutasta konačna elementa za varijantu mreže V2. Na ovom primjeru sa 3 elementa po visini struka h_w je vidljiv prijelazni red konačnih elemenata na sredini, koji se sastoji od dva trokutasta, dva deformirana četverokutna i 6 pravokutnih konačnih elemenata.



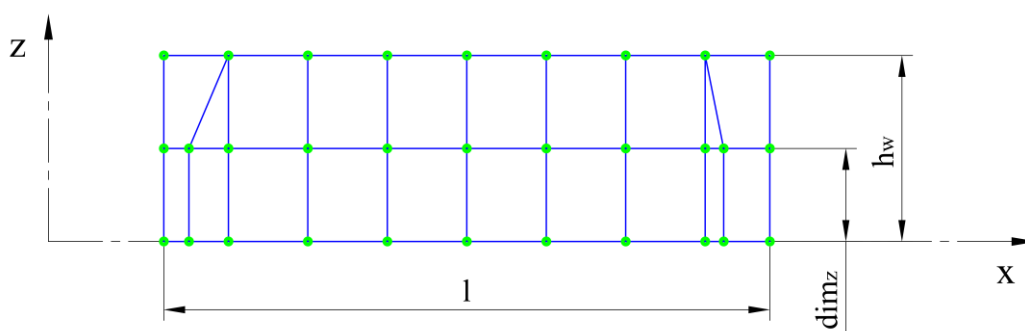
Slika 7.13 Numeracija čvorova struka segmenta, varijanta mreže V2

Metodom `generate_web_nodes` unutar podklase `SegmentMeshV2` se generiraju svi čvorovi na struku pojedinog segmenta za varijantu mreže V2. Dijagram toka ove metode je iznimno sličan metodi za varijantu mreže VI prikazan slikom 8.10, ali se sastoji od dvije petlje kroz retke i stupce čvorova zbog različitog broja stupaca u pojedinom retku. Različiti broj stupaca čvorova zahtijeva korištenje posebnih metoda za određivanje granica tj. broja redaka u ovisnosti o broju elemenata po visini struka `min_num_eweb`. Metodom `plate_node_row_number` se određuje broj redaka čvorova struka koji imaju dimenziju razmaka između rubnih čvorova preuzetih od pripadajuće zone oplata, a metodom `flange_node_row_number` broj redaka čvorova koji imaju dimenzije razmaka čvorova prirubnice. Ovim metodama se također u obzir uzimaju različite kombinacije broja elemenata po visini struka, tako da se prijelazni red elemenata nastoji smjestiti u drugi red elemenata od spoja sa prirubnicom.

U posebnim slučajevima kada to nije moguće, npr. ako je broj elemenata po visini struka jednak 1 ili 2, prijelazni red elemenata se smješta neposredno uz opločenje kako je prikazano slikama 7.14. i 7.15.

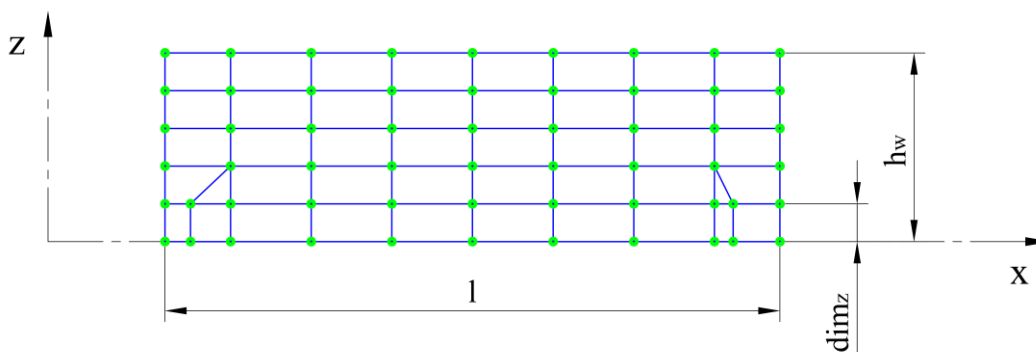


Slika 7.14 Jedan element po visini struka, varijanta mreže V2



Slika 7.15 Prijelazni red elemenata sa 2 elemenata po visini struka, varijanta mreže V2

Slikom 7.16 je prikazan primjer mreže na struku segmenta iste duljine l i visine struka h_w sa 5 elemenata po visini struka, gdje je vidljivo postavljanje prijelaznog reda u drugi red elemenata.



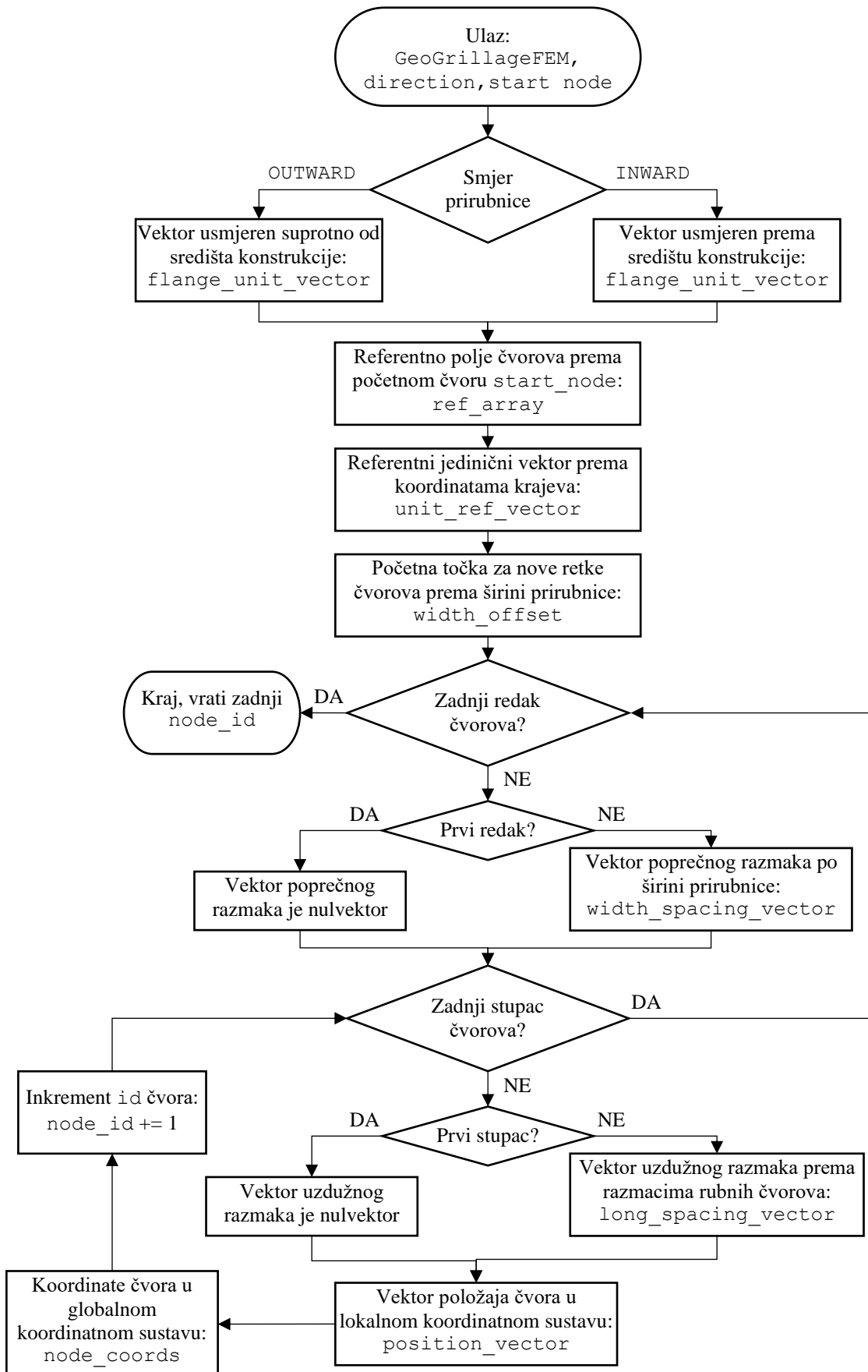
Slika 7.16 Prijelazni red elemenata sa 5 elemenata po visini struka, varijanta mreže V2

Broj stupaca čvorova se određuje na temelju broja upisanih dimenzija razmaka rubnih čvorova. Za retke čvorova koji preuzimaju dimenzije razmaka čvorova opločenja je to broj upisanih dimenzija u rječniku `plate_edge_nodes`, a za redak čvorova uz prirubnicu `flange_edge_nodes`.

7.2.3 Čvorovi prirubnice segmenta za varijantu mreže VI

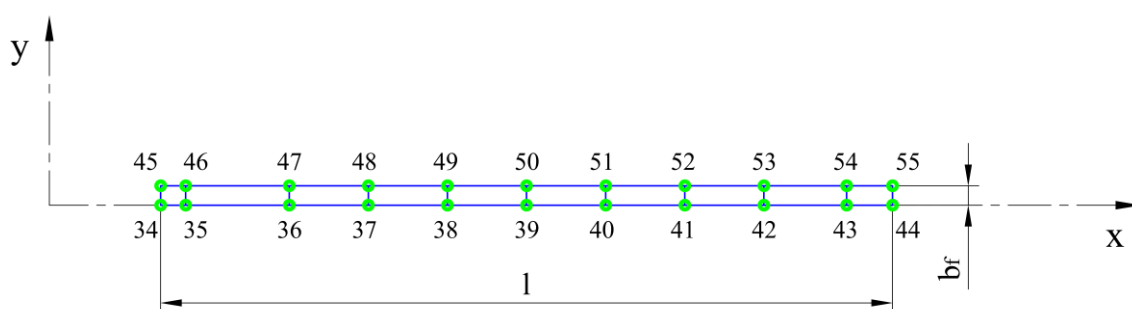
Čvorovi mreže prirubnice pojedinog segmenta se generiraju na temelju podataka sadržanih u objektu `Segment`, niza dimenzija razmaka između rubnih čvorova i identifikacijskih brojeva čvorova zadnjeg reda čvorova struka. Budući da varijanta mreže VI preslikava elemente prirubnice na opločenje, razmaci između rubnih čvorova se preuzimaju od pripadajuće zone oplata.

Metodom `generate_flange_nodes` unutar podklase `SegmentMeshV1` se generiraju svi novi čvorovi na prirubnici pojedinog segmenta za varijantu mreže VI. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.17. Ulaznim parametrom `direction` tipa `FlangeDirection` se odabire usmjerenje prirubnice L profila, a za T profile omogućuje izradu mreže prirubnice na samo jednoj strani profila, ovisno o osima simetrije za koje se izrađuje mreža konačnih elemenata.



Slika 7.17 Dijagram toka metode generate_flange_nodes

Kako bi se izbjeglo preklapanje čvorova, algoritam neće izraditi nove čvorove na mjestu spoja struka i prirubnice jakih nosača u obliku T i L profila, već nastavlja numeraciju čvorova od zadnjeg čvora struka. Metodom `ref_flange_node_ID_array` unutar podklase `SegmentMeshV1` se izrađuje referentno dvodimenzijско polje identifikacijskih brojeva svih čvorova koji se nalaze na prirubnici. Ovo referentno polje raspoređuje identifikacijske brojeve čvorova prema njihovom relativnom položaju, a služi za izradu čvorova i konačnih elemenata na odabranom segmentu. Prilikom izrade referentnog polja čvorova se preuzima zadnji redak referentnog polja čvorova struka. Slika 7.18 prikazuje primjer preuzimanja zadnjeg retka čvorova struka sa mreže struka segmenta prikazanog slikom 7.10 i nastavak numeracije čvorova na prirubnici L profila.

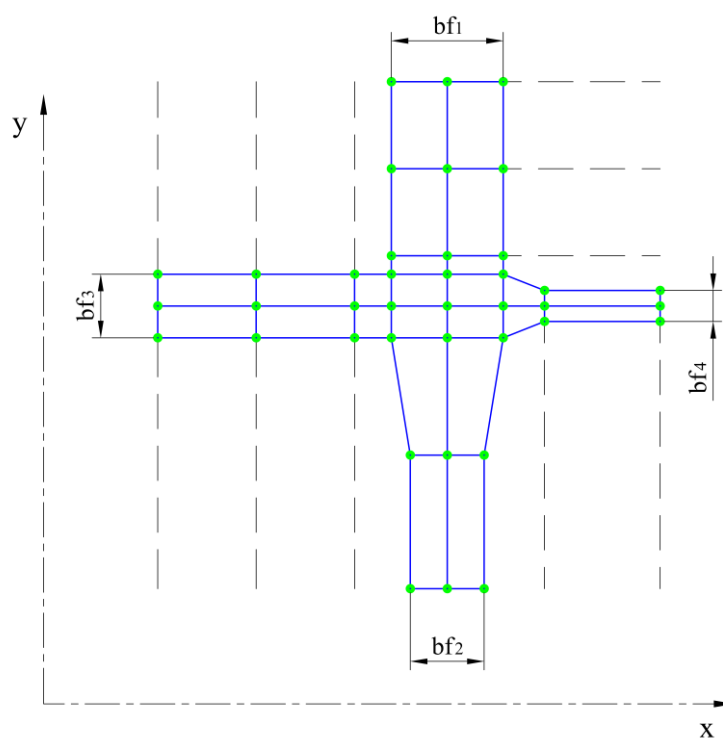


Slika 7.18 Numeracija čvorova prirubnice segmenta, varijanta mreže *V1*

Izrada novih redova čvorova prirubnice započinje u početnoj točki na udaljenosti širine prirubnice L profila ili poluširine prirubnice T profila od struka segmenta. Početna točka na primjeru čvorova prirubnice prikazanih slikom 7.18 je označena brojem čvora 45.

7.2.4 Čvorovi prirubnice segmenta za varijantu mreže *V2*

Čvorovi mreže prirubnice varijante mreže *V2* se izrađuju slično kao i za mrežu *V1*, uz nekoliko razlika. Za varijantu *V2* se dimenzije razmaka rubnih čvorova prirubnice preuzimaju za promatrani segment iz rječnika `edge_flange_nodes`. Zbog različitog broja stupaca čvorova u pojedinom retku, umjesto referentnog dvodimenzijскоg polja čvorova se koristi referentna lista `reference_web_node_ID_list`. Specifičnost varijante mreže *V2*, zbog prijelaznog retka elemenata struka, je izrada mreže konačnih elemenata na jakim nosačima sa segmentima različite širine prirubnica. Slikom 7.19 je prikazan primjer spoja prirubnica jakih nosača na jednom mjestu križanja, gdje dolazi do promjene širine prirubnice poprečnog nosača sa širine b_{f1} na b_{f2} i uzdužnog nosača sa širine b_{f3} na b_{f4} . Položaji čvorova na ovom primjeru su dijelom uvjetovani ukrepama koje su prikazane isprekidanim linijama.



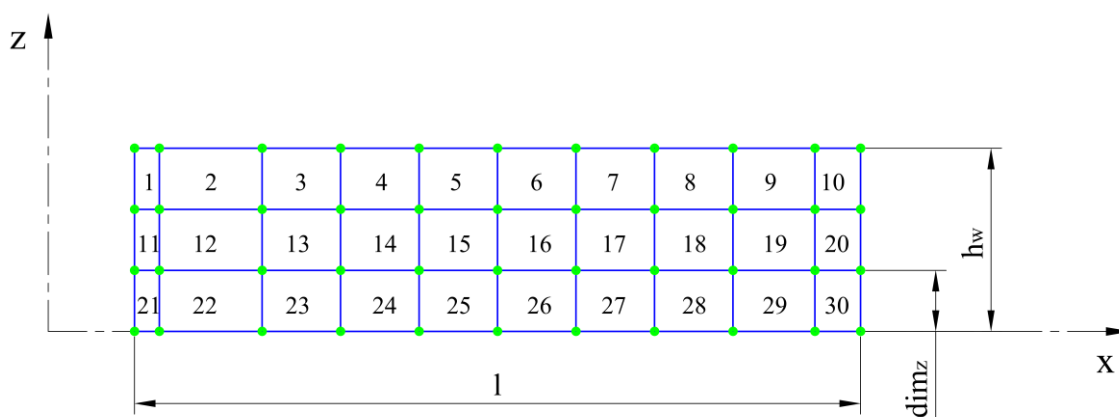
Slika 7.19 Promjena širine prirubnica na spoju jakih nosača

Koordinate čvorova na području preklopa se određuju principom zadržavanja veće širine prirubnice. Za svaki segment na kojemu se izrađuje mreža konačnih elemenata se identificira maksimalna širina prirubnice na oba kraja, na mjestima spoja sa paralelnim segmentima, metodama `get_end1_max_flange_width` i `get_end2_max_flange_width`. Za identifikaciju susjednih segmenata unutar ovih metoda, koji se nalaze na istom jakom nosaču, se koristi metoda `get_parallel_segments`. Principom zadržavanja veće širine prirubnice se na ovom primjeru kroz područje preklopa za uzdužne segmente zadržava širina b_{f3} , a za poprečne segmente širina b_{f1} .

Metodom `generate_flange_nodes` unutar podklase `SegmentMeshV2` se zadržavanje veće širine prirubnice izvodi tako da prva i zadnja dva čvora preuzimaju najveću širinu prirubnice na odgovarajućem kraju. Prijelaz na manju širinu prirubnice je zatim izveden na razmaku jednog konačnog elementa.

7.2.5 Elementi struka segmenta za varijantu mreže V1

Metodom `generate_web_elements` unutar podklase `SegmentMeshV1` se generiraju svi pločasti konačni elementi na struku segmenta za varijantu mreže V1. Numeracija i izrada konačnih elemenata, jednako kao i za čvorove, kreće od prvog referentnog čvora segmenta `ref_node1`. Slika 7.20 prikazuje numeraciju elemenata na primjeru struka segmenta prikazanog slikom 7.10.



Slika 7.20 Numeracija elemenata struka segmenta, varijanta mreže V1

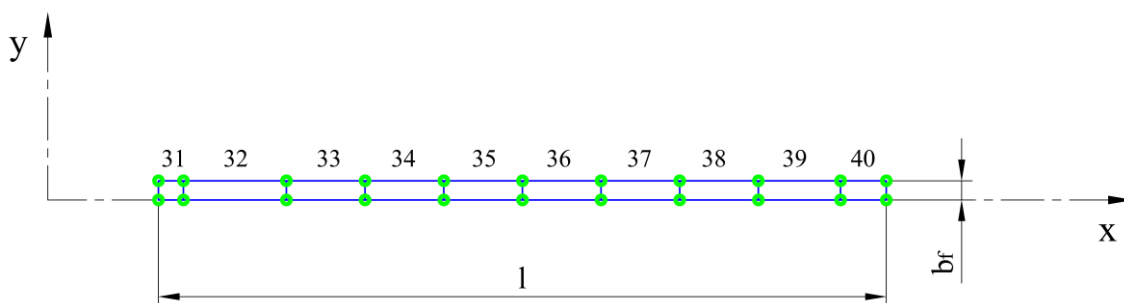
Analogno izradi konačnih elemenata opločenja, za svaki segment se izrađuje referentno dvodimenzijско polje identifikacijskih brojeva svih čvorova koji se nalaze na struku. Petljom kroz sve retke i stupce konačnih elemenata se određuju indeksi položaja pripadajućih čvorova u referentnom polju čvorova `reference_web_node_ID_array`.

7.2.6 Elementi struka segmenta za varijantu mreže V2

Metoda `generate_web_elements` unutar podklase `SegmentMeshV2` za izradu konačnih elemenata na struku segmenta varijante mreže V2 se značajno razlikuje od metode u podklasi `SegmentMeshV1`. Zbog postojanja prijelaznog reda elemenata, mreža struka se izrađuje po redcima, zasebno za retke iznad i ispod prijelaznog reda elemenata. Metodom `top_web_element_row` se izrađuju redovi elemenata iznad prijelaznog reda, a metodom `bot_web_element_row` red elemenata ispod prijelaznog reda elemenata. Sami prijelazni red elemenata se izrađuje metodom `tr_web_element_row` uz pomoć više pomoćnih metoda koje izrađuju pojedini element u nizu. Pomoćne metode se pozivaju odabranim redoslijedom i generiraju element po element prijelaznog reda, u ovisnosti o broju trokutastih konačnih elemenata koji se određuje metodom `identify_num_of_tris`.

7.2.7 Elementi prirubnice segmenta

Za izradu pločastih konačnih elemenata prirubnica nema razlike između varijanti mreža, te se koristi zajednička metoda `generate_flange_elements` unutar klase `SegmentMesh`. Numeracija i izrada konačnih elemenata, jednako kao i za čvorove, započinje u početnoj točki na udaljenosti širine ili poluširine prirubnice od struka segmenta, te nastavlja u smjeru pozitivne globalne koordinatne osi. Slika 7.21 prikazuje primjer nastavka numeracije elemenata prirubnice L profila sa mreže struka segmenta prikazanog slikom 7.20.



Slika 7.21 Numeracija elemenata prirubnice L profila

Analogno izradi konačnih elemenata struka, za svaki segment se izrađuje referentno dvodimenzijско polje identifikacijskih brojeva svih čvorova koji se nalaze na prirubnici. Petljom kroz sve retke i stupce konačnih elemenata se određuju indeksi položaja pripadajućih čvorova u referentnom polju čvorova `ref_flange_node_ID_array`. Prilikom izrade ovog referentnog polja čvorova se preuzima zadnji redak čvorova struka. Za varijantu mreže *VI* se ovaj redak preuzima iz dvodimenzijскоg polja `reference_web_node_ID_array`, a za varijantu mreže *V2* iz referentne liste `reference_web_node_ID_list`.

Prilikom izrade konačnih elemenata prirubnice se svaki element dodaje u poseban rječnik metodom `add_element_to_element_overlaps`. Za elemente unutar ovog rječnika nakon izrade mreže slijedi provjera preklapanja čvorova.

7.3 Spajanje mreže konačnih elemenata

Nakon nezavisne izrade mreže na svim elementima konstrukcije obuhvaćenim izradom mreže slijedi ispravak preklapanja čvorova i konačnih elemenata, metodama unutar modula `grillage_fem.py`. Postupak se sastoji od sljedećih koraka:

1. Identifikacija preklapanja čvorova
2. Sortiranje i odabir koji čvor ostaje na koordinatama, a koji se briše
3. Zamjena čvorova koji će se obrisati u definiciji konačnih elemenata
4. Brisanje preklopljenih čvorova
5. Brisanje preklopljenih elemenata prirubnica

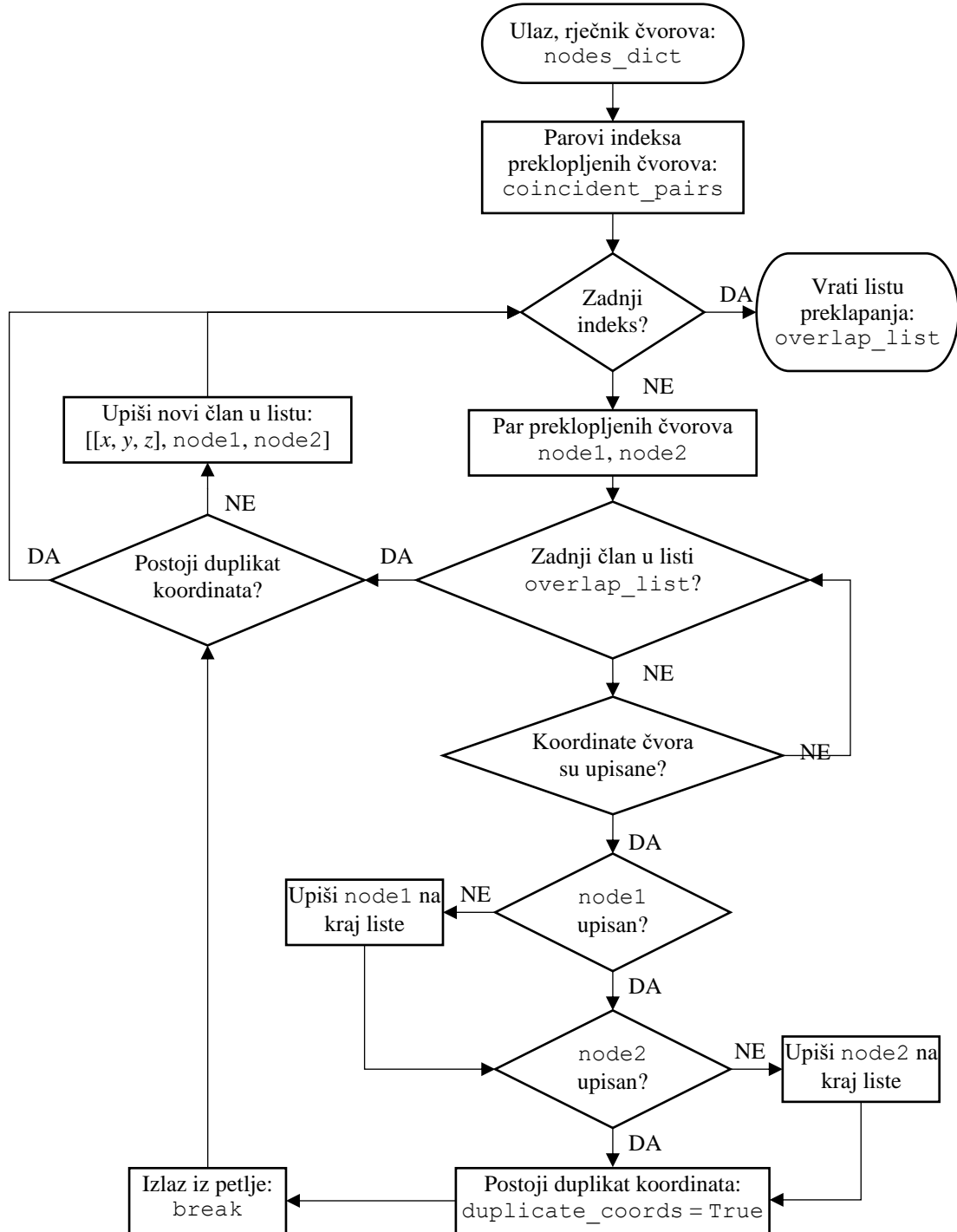
7.3.1 Algoritam za ispravak preklapanja čvorova

Metoda `check_node_overlap` služi za identifikaciju svih preklopljenih čvorova koji se nalaze na jedinstvenim koordinatama. Metoda `check_node_overlap_np` je optimizirana verzija originalne metode, korištenjem *NumPy* operacija [12] za identifikaciju parova preklopljenih čvorova. Prilikom testiranja optimizirane verzije je zabilježena 60 puta brža identifikacija preklapanja od originalne metode. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.22.

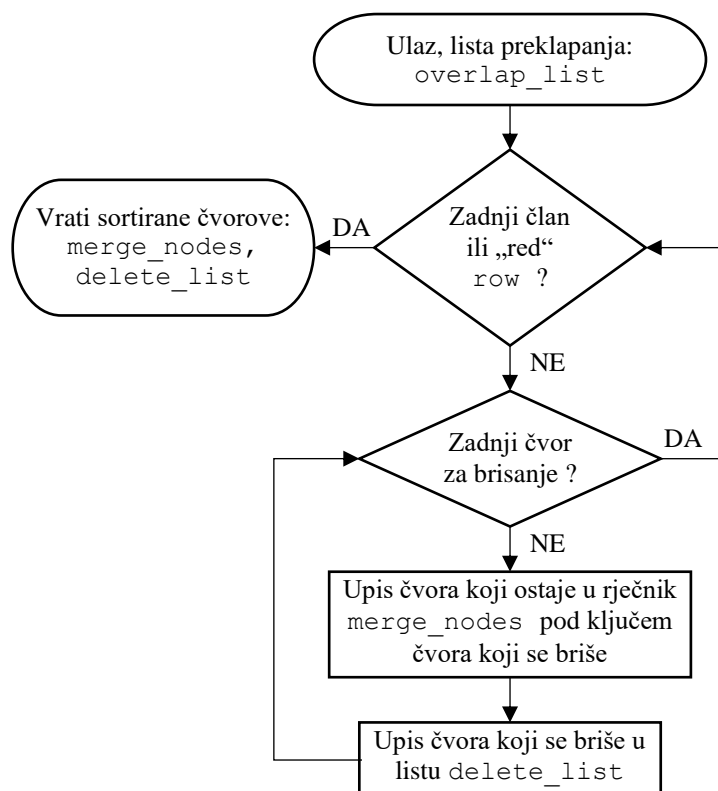
Za svaki čvor upisan u ulaznom rječniku čvorova `nodes_dict` se provjerava jesu li koordinate tih čvorova već upisane u listu preklapanja `overlap_list`. Vizualizacija zapisa ove liste preklapanja je jednostavnija ako se lista promatra kao dvodimenzijско polje sa jednim stupcem. Prvih nekoliko redaka ovakvog polja, za primjer ispitne varijante `hc_var_5` je prikazano jednadžbom 7.5.

$$\begin{bmatrix} [[0, 6060, 1089], & node71, & node61, & node278, & node352, & node521], \\ [[681, 6060, 1089], & node72, & node62, & node279], \\ [[1405, 6060, 1089], & node73, & node63, & node280], \\ [[2129, 6060, 1089], & node74, & node64, & node281], \\ [[2853, 6060, 1089], & node75, & node65, & node282], \\ [[3577, 6060, 1089], & node76, & node66, & node283] \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

U svakom retku ovakvog polja je lista, gdje je prvi član lista jedinstvenih koordinata $[x, y, z]$ na kojima dolazi do preklapanja čvorova, a preostali članovi su objekti čvorova `node` koji se nalaze na tim koordinatama. Ako su koordinate identificiranog čvora već upisane u polje, preklopljeni čvorovi se upisuju uz pripadajuće koordinate na kraj liste. Ako koordinate nisu upisane, izrađuje se novi redak oblika $[[x, y, z], node1, node2]$.

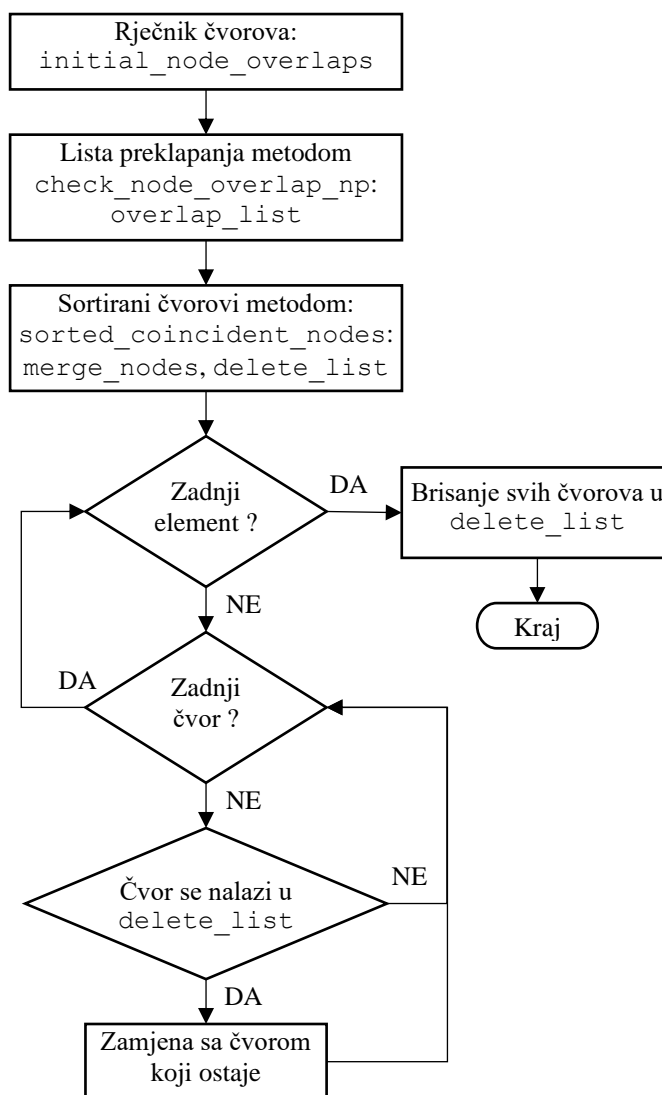
Slika 7.22 Dijagram toka metode `check_node_overlap_np`

Metodom `sorted_coincident_nodes` se petljom kroz prikazanu listu preklapanja `overlap_list` određuju preklopljeni čvorovi koji će biti obrisani. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.23. Odabrano je da prvi upisani čvor na jedinstvenim koordinatama ostaje i upisuje se kao vrijednost u rječniku `merge_nodes`, gdje su ključevi preostali čvorovi koji će biti obrisani. Metoda zajedno sa rječnikom `merge_nodes` vraća sve čvorove koji će biti obrisani, zapisani unutar liste `delete_list`.

Slika 7.23 Dijagram toka metode `sorted_coincident_nodes`

Završna metoda za ispravak preklapanja čvorova `merge_coincident_nodes` preuzima rječnik `initial_node_overlaps` u kojemu su sadržani svi čvorovi na rubovima zona oplata i strukova segmenata duž kojih se očekuje preklapanja čvorova. Za ove čvorove se određuju preklapanja metodom `check_node_overlap_np`, a identificirani čvorovi se sortiraju metodom `sorted_coincident_nodes`. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.24.

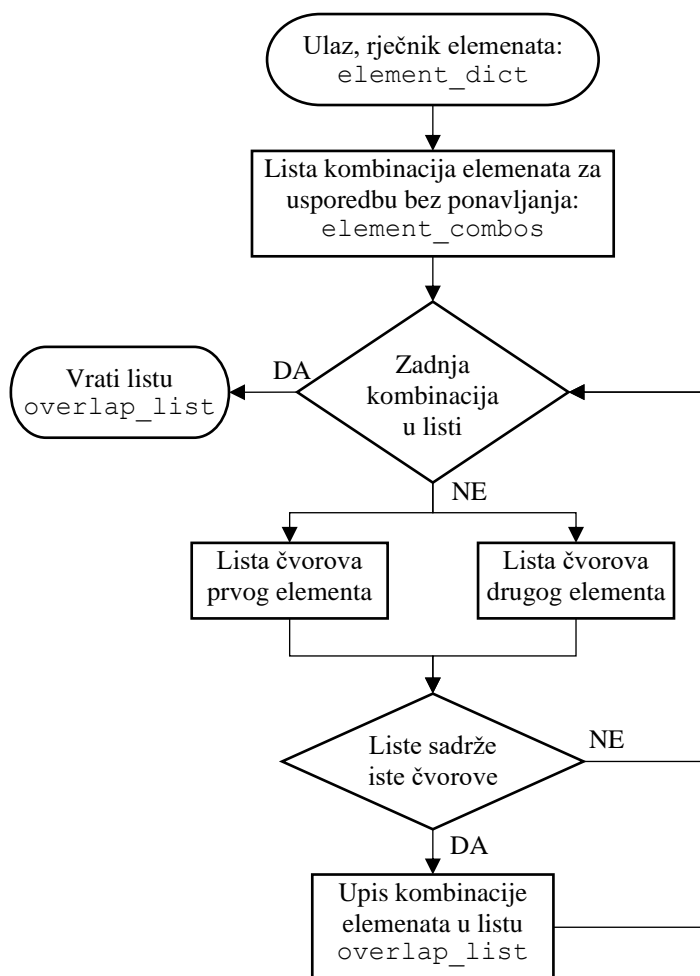
Petljom kroz sve upisane elemente u rječniku `elements` se traže preklopljeni čvorovi koji će biti obrisani tj. koji se nalaze u listi `delete_list`. Kada se pronađe konačni element koji je definiran čvorom koji će biti obrisani, izvršava se zamjena sa čvorom koji preostaje tj. koji je upisan kao vrijednost u rječniku `merge_nodes`. Nakon zamjene čvorova je moguće obrisati sve čvorove koji se nalaze u listi `delete_list`.

Slika 7.24 Dijagram toka metode `merge_coincident_nodes`

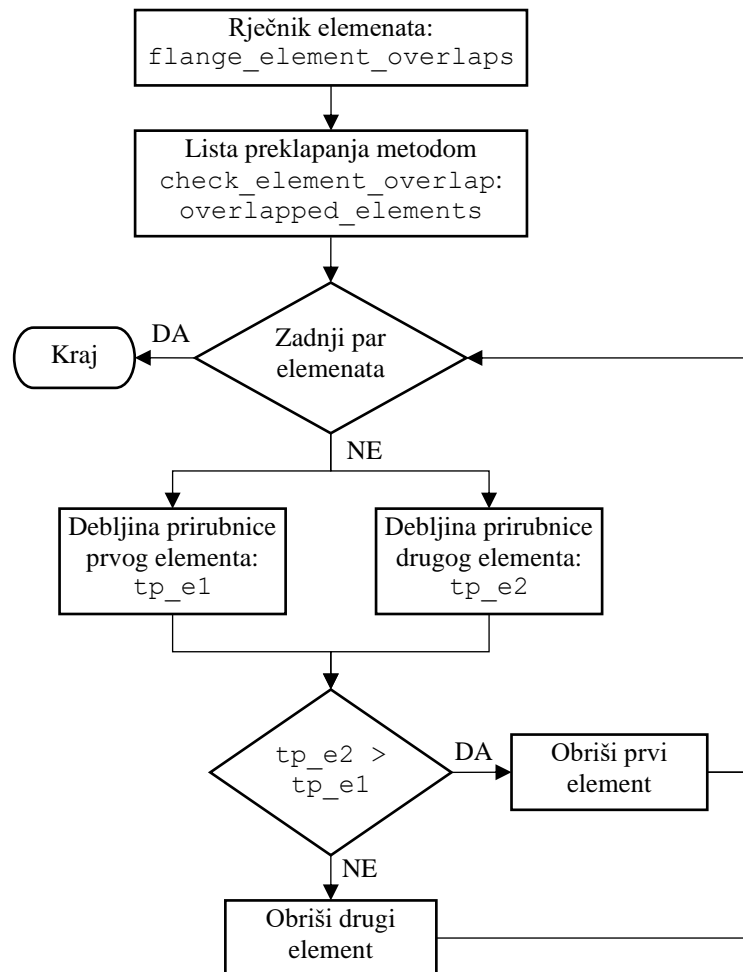
7.3.2 Algoritam za ispravak preklapanja elemenata

Nakon što je izvršena zamjena preklapljenih čvorova, preklapljeni konačni elementi će biti definirani sa istim čvorovima. Na temelju te činjenice slijedi relativno jednostavna pretraga rječnika elemenata, metodom `check_element_overlap` koja vraća listu parova preklapljenih elemenata `overlap_list`. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.25.

Kako bi se izbjegle višestruke usporedbe, funkcijom `itertools.combinations` se izrađuje lista kombinacija elemenata koja omogućuje usporedbu elemenata svakog sa svakim bez ponavljanja. Za svaku kombinaciju se za oba elementa izrađuje lista identifikacijskih brojeva čvorova koji ih definiraju. Usporedba sadrže li ove liste iste brojeve, neovisno o redoslijedu u kojemu su upisani, se izvodi pretvorbom liste u set.

Slika 7.25 Dijagram toka metode `check_element_overlap`

Metoda za ispravak preklapanja elemenata `merge_coincident_elements` preuzima rječnik `flange_element_overlaps` u kojemu su sadržani svi konačni elementi prirubnica jakih nosača na kojima se očekuje preklapanje elemenata. Za ove elemente se određuje lista parova preklapljenih elemenata metodom `check_element_overlap`, nakon čega za svaki par elemenata slijedi odabir koji element će ostati, a koji će biti obrisani. Princip odabira u ovom koraku se temelji na debljini lima prirubnice, slijedeći logiku tehnološke izvedbe kojom će prirubnica veće debljine biti neprekinuta, a prirubnica manje debljine se prekida i vari. Stoga se konačni element manje debljine materijala odmah briše iz rječnika svih elemenata `elements`. Dijagram toka ove metode je prikazan slikom 7.26.

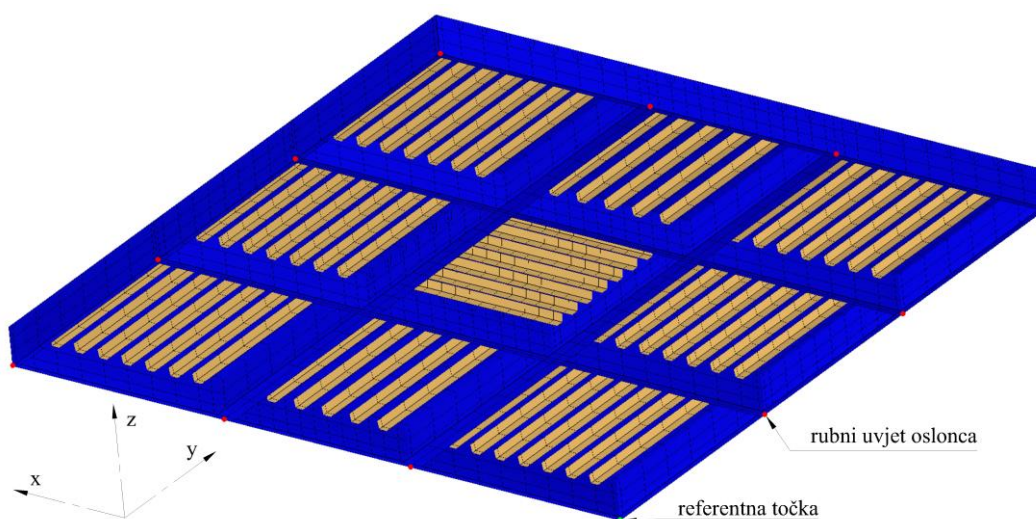


Slika 7.26 Dijagram toka metode merge_coincident_elements

8. RUBNI UVJETI I OPTEREĆENJA

8.1 Rubni uvjeti na krajevima jakih nosača

Rubni uvjeti na mjestima oslonaca su zadani prema preporukama *Lloyd's Register, Assessment of Steel Hatch Covers Using Finite Element Analysis, Chapter 2, Section 2: Boundary conditions*, 2.2. Na čvorovima koji se nalaze na krajevima jakih nosača se sprječava translacija u smjeru vertikalne osi [9]. Slikom 8.1 su prikazani postavljeni rubni uvjeti na primjeru pune mreže konačnih elemenata ispitne varijante konstrukcije `hc_var_5`. Crvenim točkama su označeni rubni uvjeti oslonca na kojima su spriječene translacije u smjeru vertikalne osi z . Zelenom točkom je označena referentna točka u ishodištu koordinatnog sustava, gdje su postavljeni rubni uvjeti koji sprječavaju pomake modela kao krutog tijela. U ovom čvoru su osim rubnog uvjeta oslonca postavljeni i rubni uvjeti koji sprječavaju translacije u smjeru globalnih x i y osi.



Slika 8.1 Rubni uvjeti, puna mreža ispitne varijante `hc_var_5`

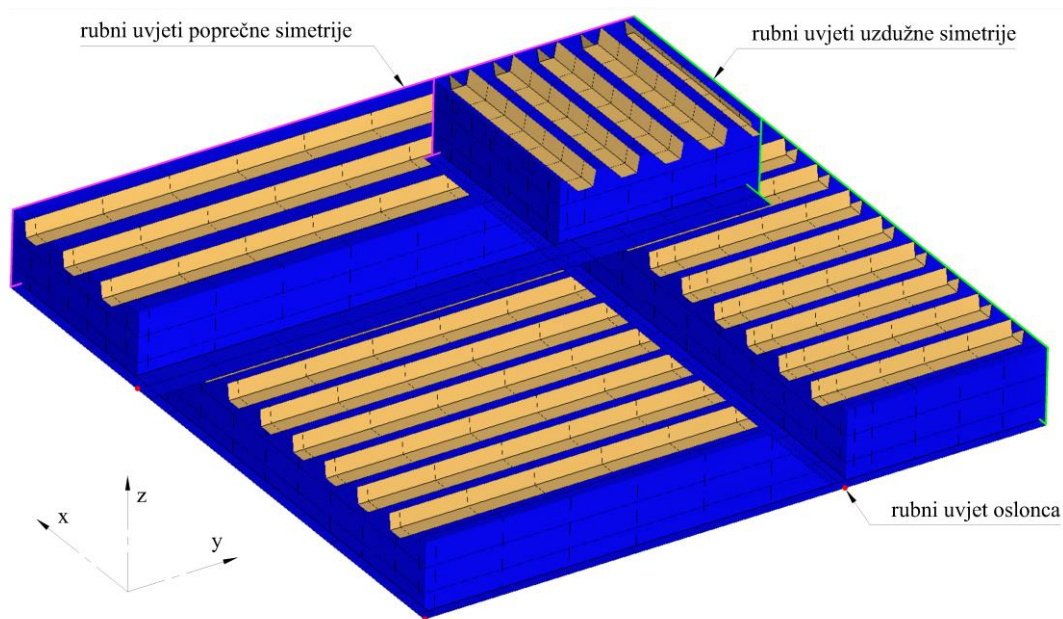
Metodom `identify_both_psm_ends` unutar klase `MeshExtent` se identificiraju koordinate krajeva svih jakih nosača koji su uključeni u opseg izrade mreže, s obzirom na os simetrije za koju je izrađena mreža. Metodom `vertical_bc_node_group` unutar klase `GrillageMesh` se zatim pretražuje koji čvorovi se nalaze na tim koordinatama. Svi pronađeni čvorovi se dodaju u grupu čvorova 1, te se za tu grupu čvorova postavljaju rubni uvjeti metodom `generate_pinned_bc`. Čvor u referentnoj točki se određuje metodom `origin_bc_node` i dodaje u grupu broj 2.

8.2 Rubni uvjeti simetrije

Rubni uvjeti simetrije su zadani prema preporukama *Lloyd's Register, Assessment of Steel Hatch Covers Using Finite Element Analysis, Chapter 2, Section 2: Boundary conditions, 2.5*. Na čvorovima koji se nalaze na osima simetrije se primjenjuju sljedeći rubni uvjeti [9]:

- Za simetriju oko uzdužne osi x , spriječene su translacije u smjeru y i rotacije oko x i z osi
- Za simetriju oko poprečne osi y , spriječene su translacije u smjeru x i rotacije oko y i z osi

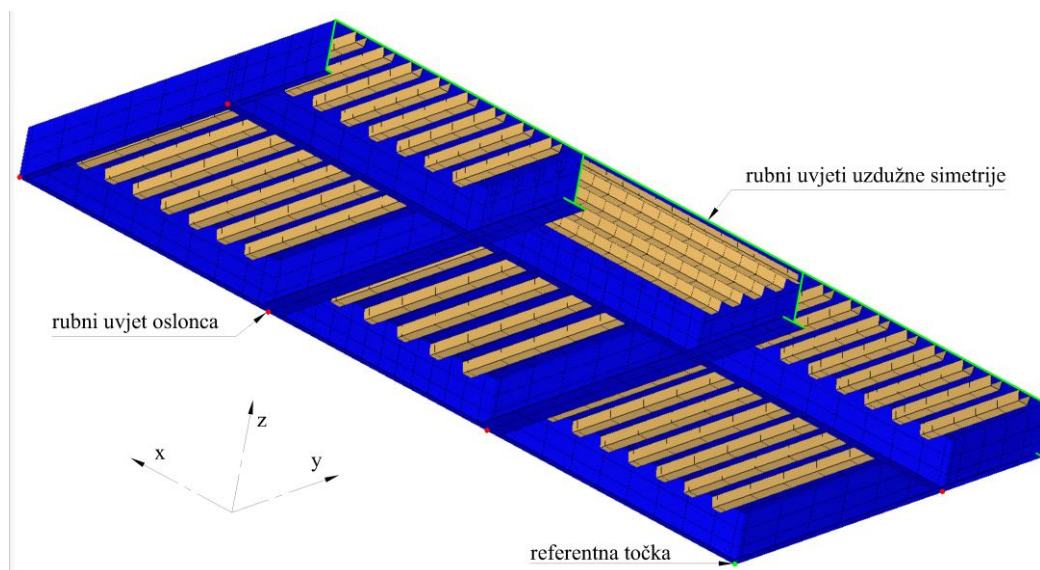
Slika 8.2 prikazuje primjer zadanih rubnih uvjeta na četvrtinskoj mreži konačnih elemenata ispitne varijante konstrukcije `hc_var_5`. Ružičastom linijom su označeni rubovi modela duž kojih su na čvorovima postavljeni rubni uvjeti poprečne simetrije, a zelenom linijom rubni uvjeti uzdužne simetrije. Crvenim točkama su označeni rubni uvjeti oslonaca, gdje su spriječene translacije u smjeru osi z . Na četvrtinskoj mreži konačnih elemenata ne postoji referentna točka u ishodištu tj. poseban čvor u kojemu se sprječavaju pomaci modela kao krutog tijela.



Slika 8.2 Rubni uvjeti, četvrtinska mreža ispitne varijante `hc_var_5`

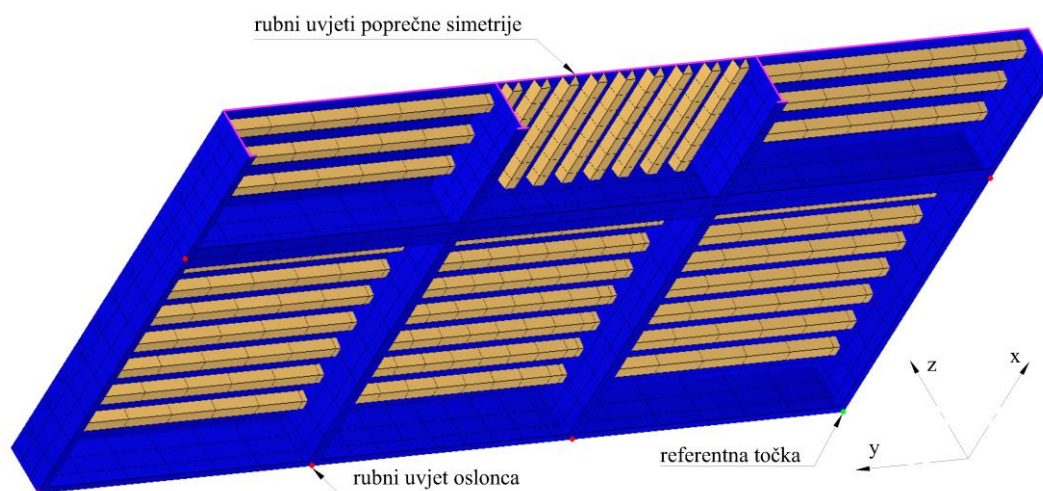
Metodom `long_symm_bc_node_group` se pretražuju svi čvorovi koji se nalaze na ravnini uzdužne simetrije i dodaju u grupu čvorova broj 4. Metodom `tran_symm_bc_node_group` se pretražuju svi čvorovi koji se nalaze na ravnini poprečne simetrije i dodaju u grupu čvorova broj 5. Rubni uvjeti simetrije se za ove grupe čvorova postavljaju metodom `generate_symm_bc` u ovisnosti o osi simetrije za koju je izrađena mreža konačnih elemenata.

Slika 8.3 prikazuje primjer zadanih rubnih uvjeta na uzdužnoj polovičnoj mreži ispitne varijante konstrukcije *hc_var_5*. Zelenom linijom su označeni rubovi modela duž kojih su na čvorovima postavljeni rubni uvjeti uzdužne simetrije. Crvenim točkama su označeni rubni uvjeti oslonaca, gdje su spriječene translacije u smjeru osi z . Zelenom točkom je označena referentna točka u ishodištu koordinatnog sustava, postavljen rubni uvjet koji sprječava pomak modela kao krutog tijela. Na uzdužnim polovičnim mrežama se u tom čvoru, osim translacije u smjeru z osi, dodatno sprječava translacija u smjeru globalne x osi.



Slika 8.3 Rubni uvjeti, uzdužna polovična mreža ispitne varijante *hc_var_5*

Slikom 8.4 je prikazana poprečna polovična mreža iste ispitne varijante *hc_var_5*. Za ovaj tip mreže je u čvoru koji se nalazi na referentnoj točki dodatno spriječena translacija u smjeru globalne y osi.



Slika 8.4 Rubni uvjeti, poprečna polovična mreža ispitne varijante *hc_var_5*

8.3 Opterećenje tlakom

Opterećenje grotlenog poklopca se određuje kao vanjski tlak prema *IACS CSR, Chapter 4, Section 5, 5. External pressures on hatch covers* [7]. Prilikom izrade pločastih konačnih elemenata opločenja se svaki element oplata sprema u poseban rječnik pomoćnom metodom `add_to_plate_elements`. Ovaj rječnik se nalazi u pripadnom objektu mreže konačnih elemenata `GeoGrillageFEM`, koji je definiran unutar Python modula `grillage_fem.py`.

Metodom `generate_pressure_load` u klasi `GrillageMesh` se svaki element oplata unutar ovog rječnika dodaje u grupu broj 6, na koju se zatim zadaje tlak metodom `add_pressure_load`. Nakon izrade mreže konačnih elemenata je metodom `generate_loadcase` moguće odabrati vrijednost projektnog tlaka koji će biti zadan na sve elemente opločenja konstrukcije.

8.4 Opterećenje vlastitom težinom

Prema pravilima *IACS CSR, Chapter 7, Section 1, 1.5. Applied loads* za direktni proračun jakih nosača brodova $> 150\text{m}$ metodom konačnih elemenata, konstrukcija mora biti opterećena vlastitom težinom. Za standardnu gustoću čelika se pri tome uzima vrijednost 7.85t/m^3 [7].

Prema preporukama *Lloyd's Register, Chapter 2, Section 3: General load application*, težina strukture grotlenog poklopca mora biti uključena u analizi metodom konačnih elemenata [9]. Metodom `add_self_weight` unutar klase `GeoGrillageFEM` je omogućeno zadavanje opterećenja vlastitom težinom za odabranu vrijednost gravitacije. Opterećenja vlastitom težinom se dodaje postojećem slučaju opterećenja metodom `generate_self_weight` unutar klase `GrillageMesh`.

9. PRIMJENA MODULA ZA AUTOMATIZIRANU PRIPREMU MKE MODELA GROTLENOG POKLOPCA

9.1 Ispitne varijante konstrukcija

Ispitivanje automatizirane izrade mreže konačnih elemenata je provedeno na ukupno 8 ispitnih varijanti različitih karakteristika navedenih u tablici 9.1. Prva ispitna varijanta *hc_var_1* je bazirana na izvedenoj konstrukciji grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta prema dobivenom predlošku. Većina ostalih ispitnih varijanti su modifikacije te izvedene konstrukcije, na kojima su testirani algoritmi za izradu mreže u različitim graničnim slučajevima. Zadnja ispitna varijanta konstrukcije *hc_var_8* je projektirana u okviru završnog rada: Projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta [13], a odabrana je zbog postojećih rezultata analize metodom konačnih elemenata u programu Maestro.

Tablica 9.1 Topološke karakteristike ispitnih varijanti konstrukcija

Ispitna varijanta	Simetrija	Broj uzdužnih nosača	Broj poprečnih nosača	Broj ukrepa između nosača	Sustav orebrenja
<i>hc_var_1</i>	Uzdužna	5	5	4, 5	Poprečni
<i>hc_var_2</i>	Uzdužna	5	5	4, 5, 6	Mješoviti
<i>hc_var_3</i>	Uzdužna	5	5	2, 5	Mješoviti
<i>hc_var_4</i>	Obostrana	4	4	8	Mješoviti
<i>hc_var_5</i>	Obostrana	4	4	6, 8, 9	Mješoviti
<i>hc_var_6</i>	Obostrana	5	5	4, 5, 6	Mješoviti
<i>hc_var_7</i>	Obostrana	5	4	5, 8	Mješoviti
<i>hc_var_8</i>	Obostrana	4	10	14	Uzdužni

Tablicom 9.2 su prikazane specifičnosti pojedine ispitne varijante zbog kojih su odabrane. Varijante sa parnim brojem jakih nosača su služile za ispitivanje algoritama za identifikaciju i izradu mreže na polovičnim i četvrtinskim zonama oplata. Na varijantama sa neparnim brojem jakih nosača su testirani algoritmi za prepoznavanje nosača na osi simetrije i dodjelu polovičnih svojstava krutosti. Ispitnim varijantama su također obuhvaćeni slučajevi položaja osi simetrije na i između ukrepa.

Tablica 9.2 Specifičnosti ispitnih varijanti konstrukcija

Ispitna varijanta	Napomena
hc_var_1	Izvedena konstrukcija grotlenog poklopca
hc_var_2	Mješoviti sustav orebrenja sa različitim brojem ukrepa
hc_var_3	Mješoviti sustav orebrenja sa značajnim razlikama razmaka između ukrepa
hc_var_4	Paran broj jakih uzdužnih i poprečnih nosača, obostrano simetrična konstrukcija, uzdužna os simetrije prolazi između uzdužnih ukrepa
hc_var_5	Modifikacija varijante hc_var_4, različite širine prirubnica jakih nosača, uzdužna ukrepa se nalazi na uzdužnoj osi simetrije
hc_var_6	Modifikacija varijante hc_var_2, obostrano simetrična konstrukcija, izmjena razmaka između jakih nosača, razmaka i tipa ukrepa
hc_var_7	Kombinacija neparnog broja jakih uzdužnih i parnog broja jakih poprečnih nosača sa mješovitim sustavom orebrenja
hc_var_8	Odabrana konstrukcija grotlenog poklopca projektirana u okviru završnog rada, topologija 4x10x14L [13]

U prilogu II se nalaze slike modela konstrukcije u programu d3v-sgd i izrađene ispitne mreže konačnih elemenata, a u prilogu III se nalaze nacrti izrađenih ispitnih varijanti. Za svaku ispitnu varijantu su prikazane dostupne varijante mreže sa inicijalno postavljenim parametrima za kontrolu mreže i automatski prepoznatom osi simetrije. Uz slike generiranih ispitnih mreža je naveden broj čvorova, ukupan broj elemenata i broj pojedinih vrsta konačnih elemenata.

Obje varijante mreža V1 i V2 uspješno generiraju mrežu konačnih elemenata za sve prikladne ispitne varijante konstrukcija. Budući da je model ispitne varijante hc_var_5 prilagođen za ispitivanje izrade mreže na različitim širinama prirubnica duž jakih nosača, izrada varijante mreže V1 nije moguća na tom modelu zbog već opisanih ograničenja. Varijanta mreže V2 u prosjeku generira mrežu konačnih elemenata sa 18% manje čvorova i konačnih elemenata, čime je vrijeme potrebno za izradu mreže i prikaz primjetno kraće.

9.2 Proračun odziva konstrukcije primjenom generiranih MKE modela

Proračun odziva metodom konačnih elemenata proveden je varijantom programa OOFEM [14] koja je prilagođena za linearnu analizu tankostjenih brodskih konstrukcija [15], [16]. Navedena varijanta programa OOFEM prethodno je integrirana u d3v-sgd primjenom Python sučelja. Proračun odziva proveden je za ispitnu varijantu `hc_var_8`. Ulazni podaci modela su postavljeni u sljedećem sustavu mjernih jedinica:

- Duljina: [mm]
- Masa: [t]
- Sila: [N]
- Brzina: [s]

Materijal izrade ove varijante konstrukcije je čelik povišene čvrstoće AH36 sljedećih karakteristika:

Modul elastičnosti:

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Poissonov koeficijent:

$$\nu = 0,3$$

Gustoća:

$$\rho = 7,85 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^2$$

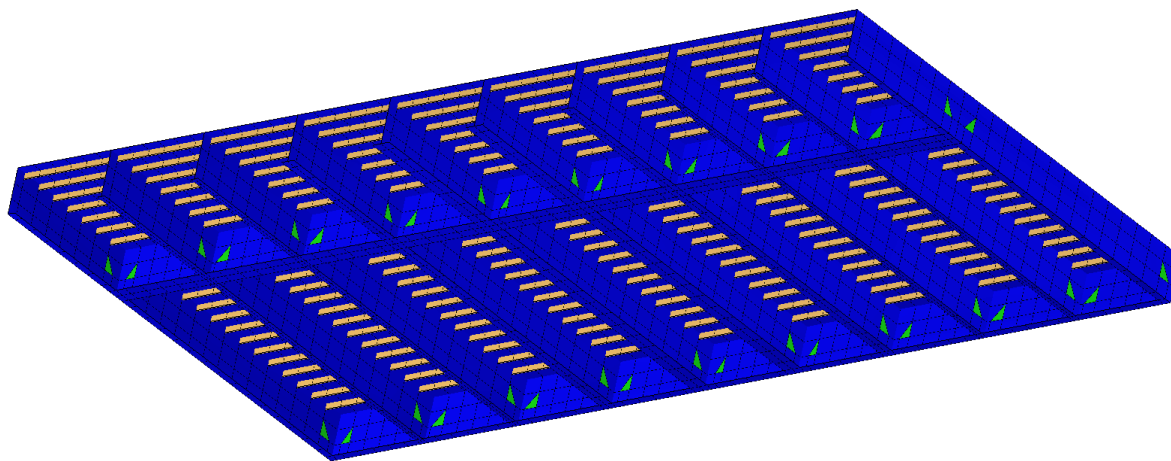
Prilikom definicije opterećenja vlastitom težinom je prema odabranom sustavu mjernih jedinica postavljen iznos ubrzanja sile teže:

$$g = 9810 \text{ mm/s}^2$$

Projekttni tlak kojim je opterećena konstrukcija:

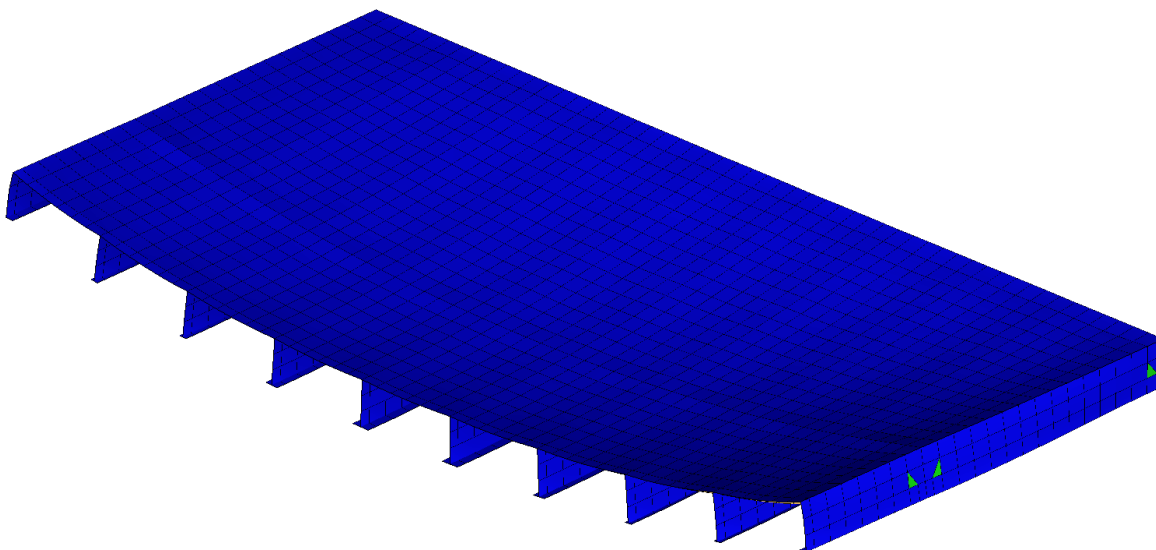
$$p = 0,0343 \text{ N/mm}^2$$

Za izradu mreže konačnih elemenata je odabrana varijanta mreže V2, prikazana slikom 9.1. Prilikom izrade mreže su zadržani svi inicijalni kontrolni parametri osim poželjnog aspektnog odnosa oplata, za koji je odabrana vrijednost 1.0. Umjesto automatskog prepoznavanja osi simetrije je odabrana izrada uzdužne polovične mreže konačnih elemenata.



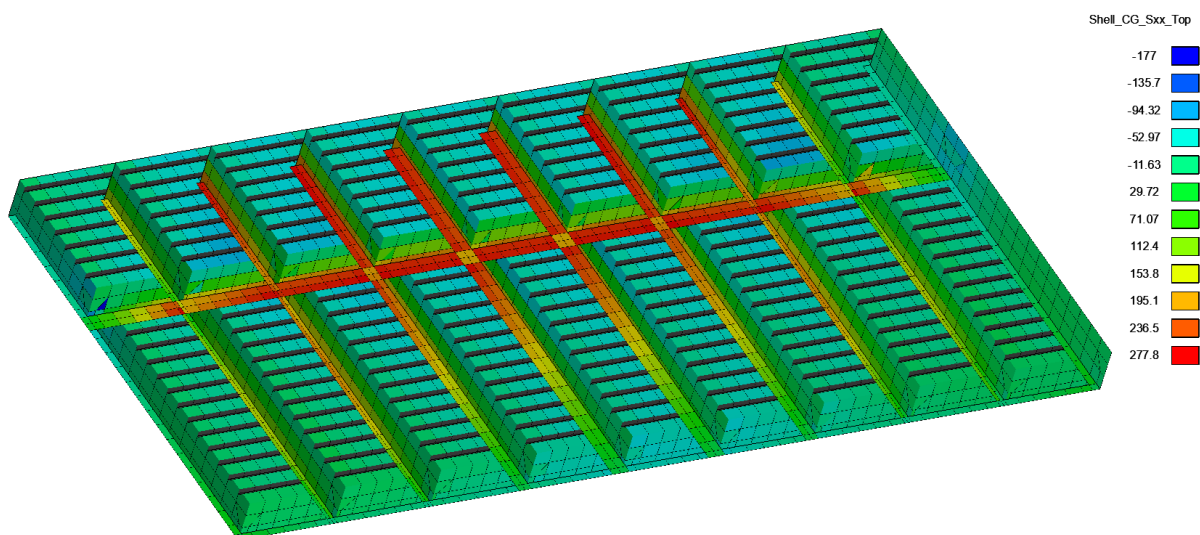
Slika 9.1 Uzdužna polovična mreža konačnih elemenata, ispitna varijanta hc_var_8

Slikom 9.2 je prikazan deformirani model konstrukcije uz odabrani faktor povećanja deformacije 15 (eng. *Deformation scale factor*). Maksimalni progib konstrukcije iznosi 79,37mm.



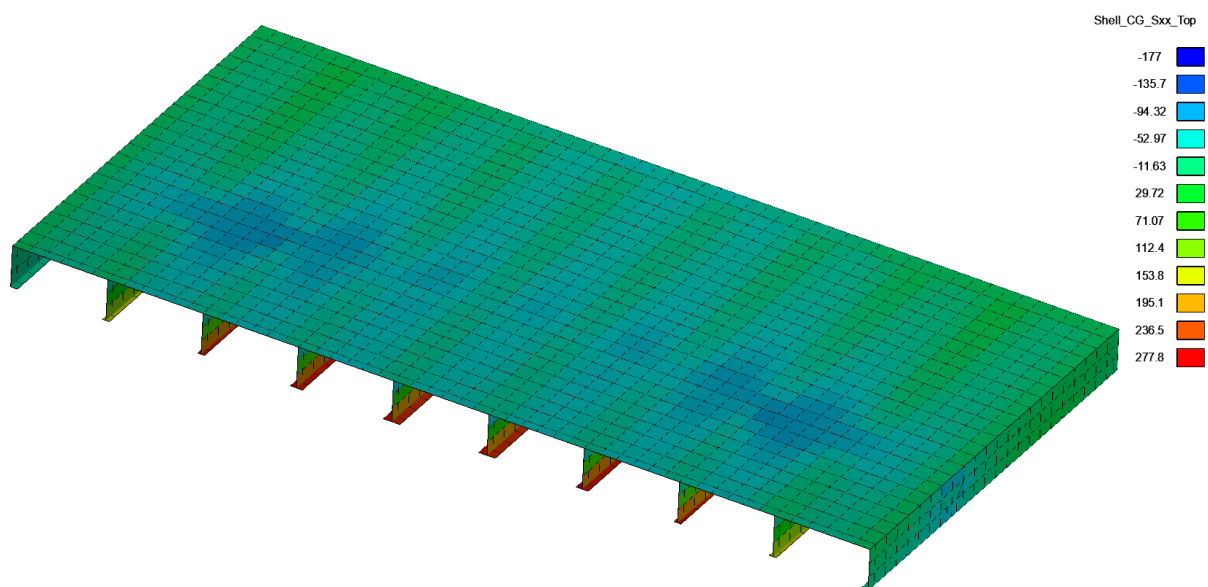
Slika 9.2 Progib ispitne varijante hc_var_8 uz faktor povećanja deformacije 15

Slika 9.3 prikazuje naprezanja u prirubnicama jakih nosača, pri čemu su naprezanja prikazana u aksijalnom smjeru pojedinog jakog nosača. Drugim riječima, slika prikazuje naprezanja u smjeru globalne x osi za uzdužno usmjerene nosače i naprezanja u smjeru y osi za poprečno usmjerene nosače. Najveće naprezanje u prirubnicama iznosi $277,8 \text{ N/mm}^2$.



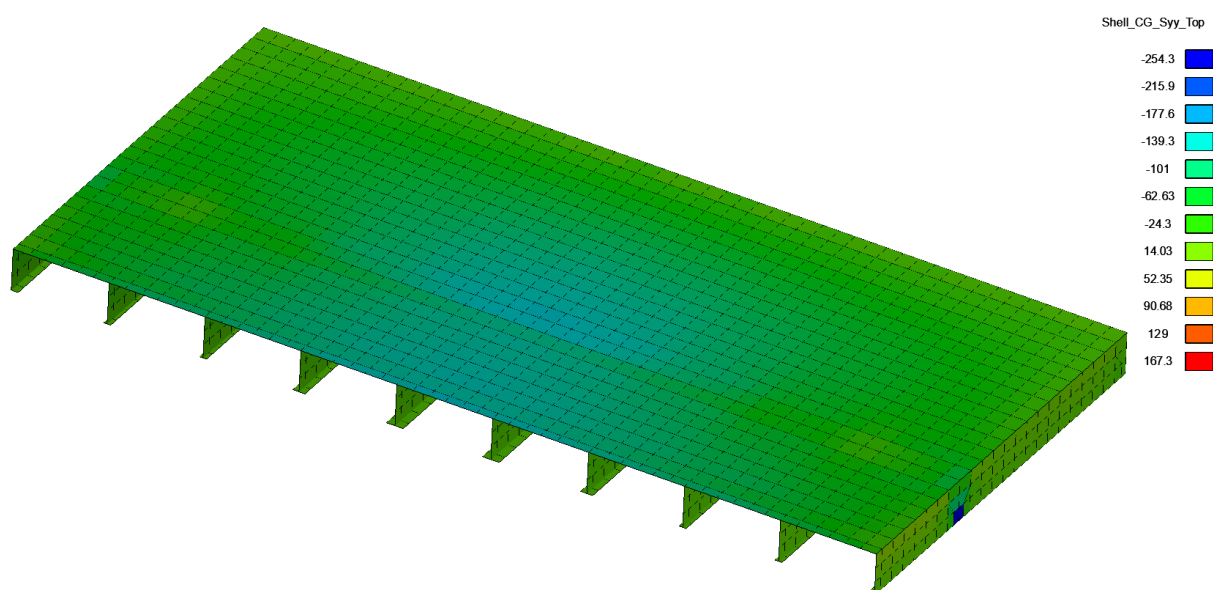
Slika 9.3 Naprezanja u prirubnicama ispitne varijante hc_var_8

Slika 9.4 prikazuje naprezanja u oplati u smjeru globalne osi x .



Slika 9.4 Naprezanja u oplati, x smjer, ispitna varijanta hc_var_8

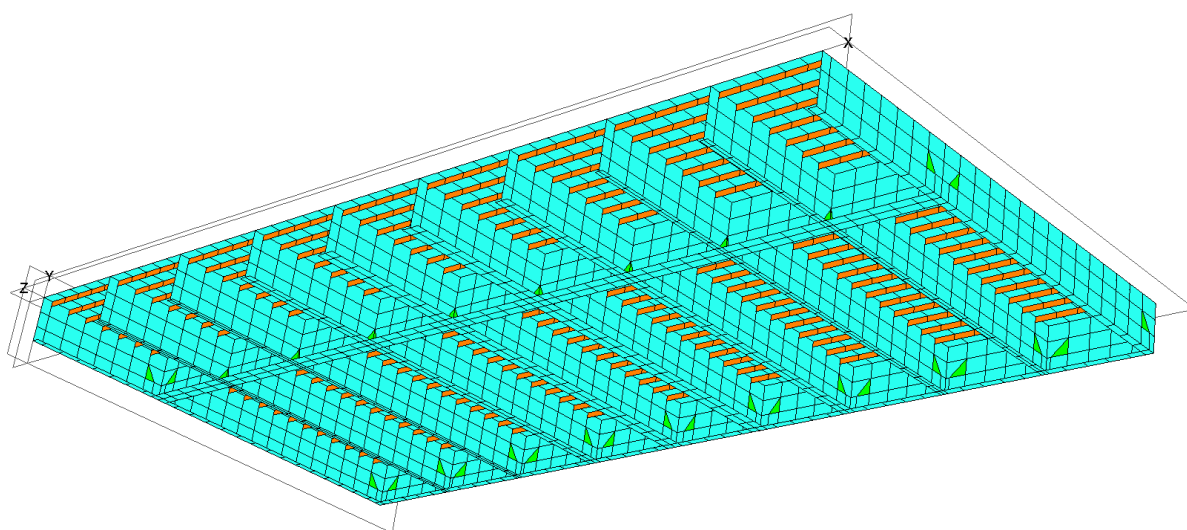
Slika 9.5 prikazuje naprezanja u oplati u smjeru globalne osi y.



Slika 9.5 Naprezanja u oplati, y smjer, ispitna varijanta hc_var_8

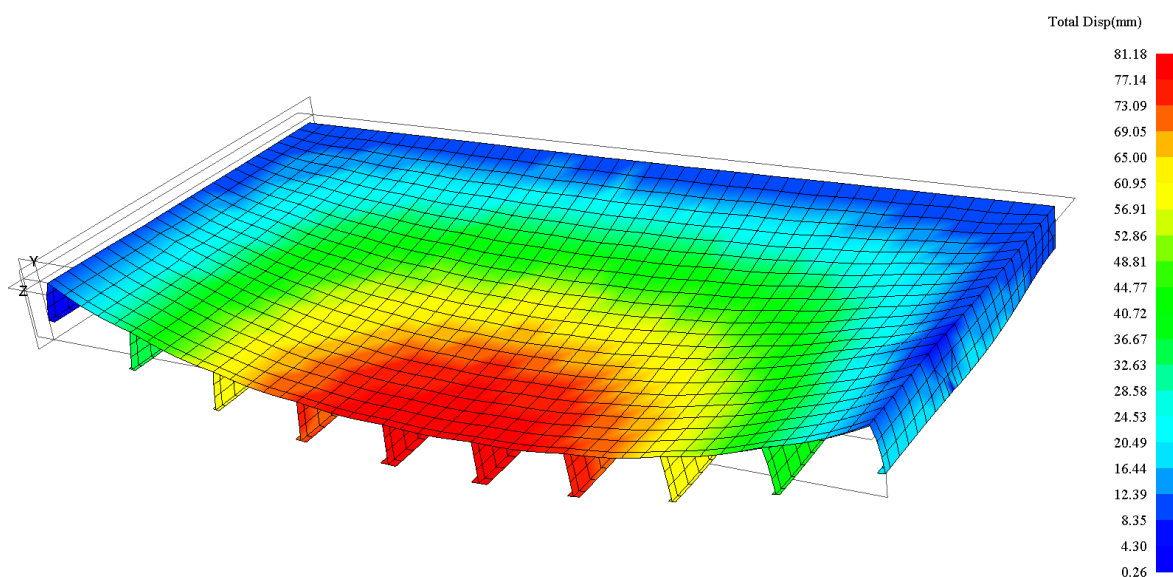
9.3 Validacija rezultata

Rezultati analize odziva metodom konačnih elemenata u programu d3v-sgd su uspoređeni sa rezultatima analize topologije 4x10x14L dobivenim u okviru završnog rada: Projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta [13]. Slika 9.6 prikazuje mrežu konačnih elemenata odabrane topologije 4x10x14L koja je izrađena u programu Maestro. Ova mreža konačnih elemenata je ekvivalentna uzdužnoj polovičnoj mreži ispitne varijante hc_var_8 koja je prikazana u poglavlju 9.2.



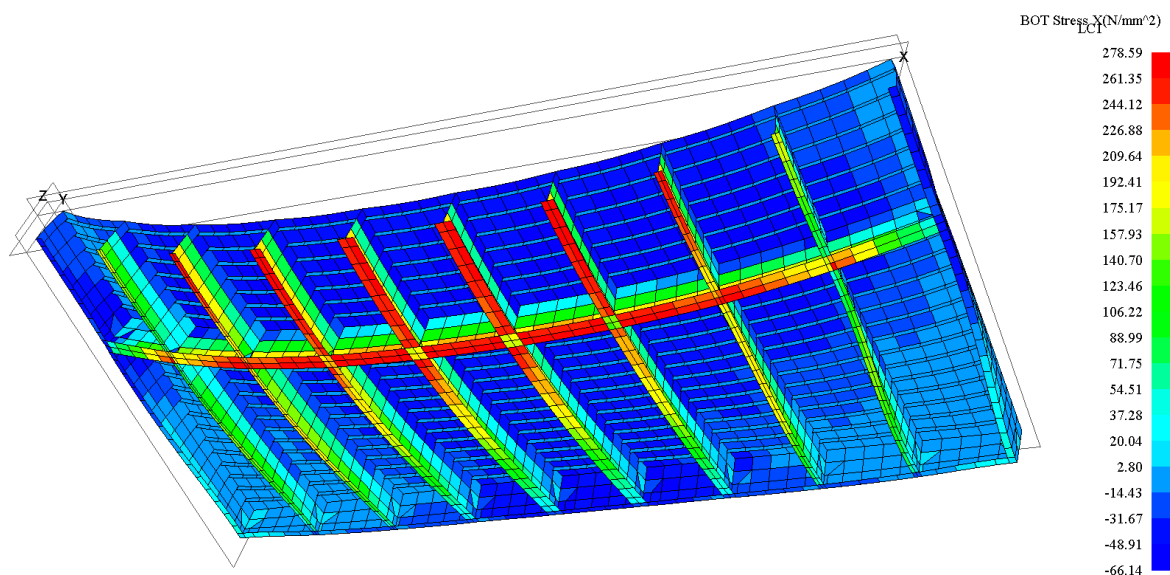
Slika 9.6 Polovični model topologije 4x10x14L [13]

Slika 9.7 prikazuje progib konstrukcije u programu Maestro. Maksimalni progib iznosi 81,18mm, prema čemu relativno odstupanje rezultata dobiveno u programu d3v-sgd iznosi -2,23%.



Slika 9.7 Progib konstrukcije, topologija 4x10x14L [13]

Slika 9.8 prikazuje naprezanja u prirubnicama u programu Maestro. Najveće vlačno naprezanje iznosi 278,59 N/mm², prema čemu relativno odstupanje rezultata dobiveno u programu d3v-sgd iznosi -0,39%.



Slika 9.8 Naprezanja u prirubnicama, topologija 4x10x14L [13]

10. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad je izrađen modul koji omogućuje automatsku generaciju mreže konačnih elemenata učitano modela konstrukcije u programu d3v-sgd za modeliranje i vizualizaciju roštilja brodskih konstrukcija. Algoritmi za diskretizaciju konstrukcije omogućuju izradu mreže na dva načina kroz dvije različite implementacije varijanti mreža. Varijanta V1 generira mrežu korištenjem isključivo pravokutnih quad elemenata tehnikom preslikavanja elemenata prirubnice na opločenje. Varijanta V2 generira pravilniju mrežu opločenja sa prijelazom na mrežu prirubnica i kombinacijom četverokutnih i trokutastih konačnih elemenata. Sadržane u algoritmima su metode za definiciju slučaja opterećenja i automatsko postavljanje rubnih uvjeta, koje omogućuju izradu OOFEM ulazne datoteke i analizu učitano modela konstrukcije metodom konačnih elemenata.

Izrađeno je grafičko sučelje u okviru programa d3v-sgd za izradu mreže konačnih elemenata na učitano modelu konstrukcije, koje korisniku omogućuje odabir varijante mreže i svih kontrolnih parametara za izradu mreže konačnih elemenata. Proširen je prethodno izrađeni programski kod za definiciju modela roštiljne konstrukcije, implementacijom raznih metoda koje omogućuju jednostavniju identifikaciju položaja strukturnih elemenata, vraćaju potrebne podatke za vizualizaciju modela, analizu podobnosti i ostalo.

U okviru rada je proširen već postojeći modul za automatiziranu pripremu ulaznih podataka za analizu metodom konačnih elemenata programom OOFEM, implementacijom izvedenih izraza za momente inercije i omogućivanjem prikaza poprečnog presjeka grednih konačnih elemenata svih korištenih tipova profila. Proširen je i postojeći kod za vizualizaciju mreže konačnih elemenata, omogućivanjem prikaza deformacija pravokutnih, trokutastih i grednih konačnih elemenata sadržanih na modelu prema rezultatima analize metodom konačnih elemenata.

Testiranje implementiranih algoritama za izradu mreže konačnih elemenata je provedeno na ukupno 8 različitih ispitnih varijanti. Ove ispitne varijante se razlikuju po simetriji, broju, razmaku i dimenzijama strukturnih elemenata, te obuhvaćaju predviđene permutacije specifičnih slučajeva koje automatska izrada mreže konačnih elemenata uspješno savladava. Rezultati analize metodom konačnih elemenata u d3v-sgd su uspoređeni sa postojećim rezultatima analize u programu Maestro za istu konstrukciju grotlenog poklopca i ekvivalentnu mrežu konačnih elemenata.

U okviru diplomskog rada utvrđeni su neki mogući daljnji koraci na razvoju programa d3v-sgd:

Modul za modeliranje konstrukcije:

1. Izrada više različitih klasa `Grillage` koje će služiti za opis različitih vrsta modela konstrukcije npr. sa dvostrukom oplatom (pontonski poklopci), sa prelukom, varijabilnim poprečnim presjecima jakih nosača i sl.
2. Opis topoloških varijanti roštiljnih konstrukcija koje nisu pravokutnog oblika, npr. zakrivljeni brid palube broda.
3. Modifikacija programskog koda koja će omogućiti izradu modela konstrukcije bez jakih rubnih nosača za npr. neke konstrukcijske izvedbe podiznih palubica RO-RO brodova.
4. Proširenje objekta `StiffenerLayout` koje će omogućiti fleksibilnije zadavanje ukrepa i dodavanje različitih ukrepa na jednoj zoni oplata.
5. Proširenje definicije segmenta koja će omogućiti podjelu segmenta na više dijelova, a svakom dijelu dodjelu vlastitog svojstva za npr. ojačavanje struka jakog nosača na krajevima.
6. Implementacija novog tipa svojstva grede `VariableSection` koji će omogućiti opis varijabilnog poprečnog presjeka jakog nosača.
7. Implementacija novog tipa svojstva grede u obliku kutijastog nosača (eng. *box girder*).
8. Modifikacija objekta `Plate` koja će omogućiti zadavanja zone opločenja bez ukrepa.
9. Proširenje definicije objekta `Plate` dodatnim parametrom koji bi služio za jednoznačno pozicioniranje zone oplata na modelima konstrukcije sa dvostrukom oplatom.
10. Dodjela svojstva oplata `PlateProperty` objektu elementarnog panela opločenja `ElementaryPlatePanel` umjesto objektu zone oplata `Plate`, čime bi se omogućilo zadavanje različite debljine lima na jednoj zoni oplata.

Modul za izradu mreže konačnih elemenata:

1. Izrada algoritma za automatski odabir i globalno usklađivanje broja elemenata po visini struka, prema dimenzijama elemenata na temelju aspektnog odnosa elemenata struka.
2. Proširenje koda za izradu mreže struka koji će omogućiti različite visine jakih nosača, implementacijom algoritma za usklađivanje dimenzija elemenata po visini struka.
3. Izrada algoritma za automatsko povećanje broja elemenata po širini prirubnice za fine mreže konačnih elemenata.
4. Modifikacija varijante mreže V2 koja će omogućiti izradu vrlo finih mreža konačnih elemenata, implementacijom metode za automatsko povećanje broja elemenata po širini prirubnice.
5. Mogućnost odabira različitih tipova rubnih uvjeta i slučajeva opterećenja, za analizu konstrukcija palubica, jednostrukog ili dvostrukog dna, rampi i sl.
6. Izrada univerzalnog algoritma za izradu pravilne mreže konačnih elemenata na temelju niza objekata rubnih čvorova koji omeđuju promatrani element konstrukcije.
7. Izrada novih varijanti mreža korištenjem različitih tipova konačnih elemenata i različitih tehnika prijelaza sa grublje na finu mrežu konačnih elemenata.
8. Izrada metoda za identifikaciju koji elementi pripadaju kojem dijelu konstrukcije za automatiziranu analizu podobnosti prema preskriptivnim pravilima.

LITERATURA

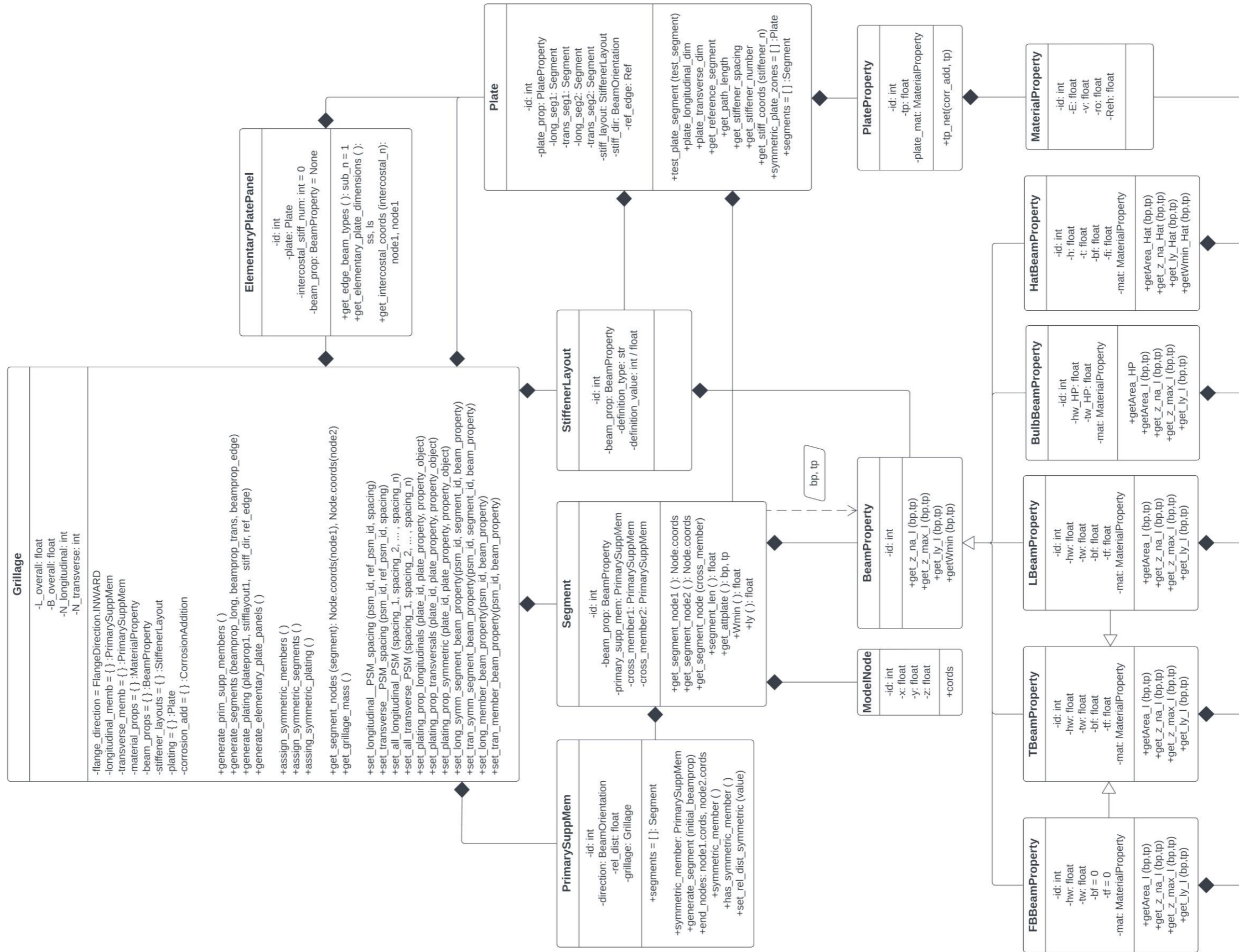
- [1] Sorić, J., Metoda konačnih elemenata, Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [2] Python, <https://www.python.org>
- [3] Javni repozitorij programa d3v-sgd, <https://github.com/pprebeg/d3v-sgd>
- [4] Javni repozitorij verzije programa d3v-sgd koja je korištena u ovom diplomskom radu, https://github.com/pprebeg/d3v-sgd/tree/gordan_kos_final_thesis
- [5] MacGregor, Cargo Handling Book, MacGregor, 2016.
- [6] Gamma. E., Design Patterns, 1995.
- [7] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers, July, 2012.
- [8] Matejiček, F., Semenski, D., Vnućec, Z., Uvod u statiku, Slavonski Brod, 2012.
- [9] Lloyd's Register, Assesment of Steel Hatch Covers Using Finite Element Analysis, July 2007.
- [10] Jović, A., Frid, N., Ivošević, D., Procesi programskog inženjerstva, E-skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, rujan 2019.
- [11] Hruška, M., Osnove programiranja (Python), Sveučilišni računski centar, 2008.
- [12] NumPy API Reference, <https://numpy.org/doc/stable/reference/index.html>
- [13] Kos, G., Projektiranje konstrukcije grotlenog poklopca broda za prijevoz rasutog tereta, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [14] Javni repozitorij programa OOFEM, <https://github.com/oofem/oofem>
- [15] Javni repozitorij verzije programa OOFEM koja je modificirana za primjenu u analizi tankostjenih brodskih konstrukcija, <https://github.com/unizg-fsb-nav/oofem>
- [16] Pero Prebeg, Marin Palaversa, Jerolim Andric & Matea Tomicic (2022) Adaptation of FEM-based open-source software for ship structural analysis, Ships and Offshore Structures, DOI: 10.1080/17445302.2022.2035568.

PRILOZI

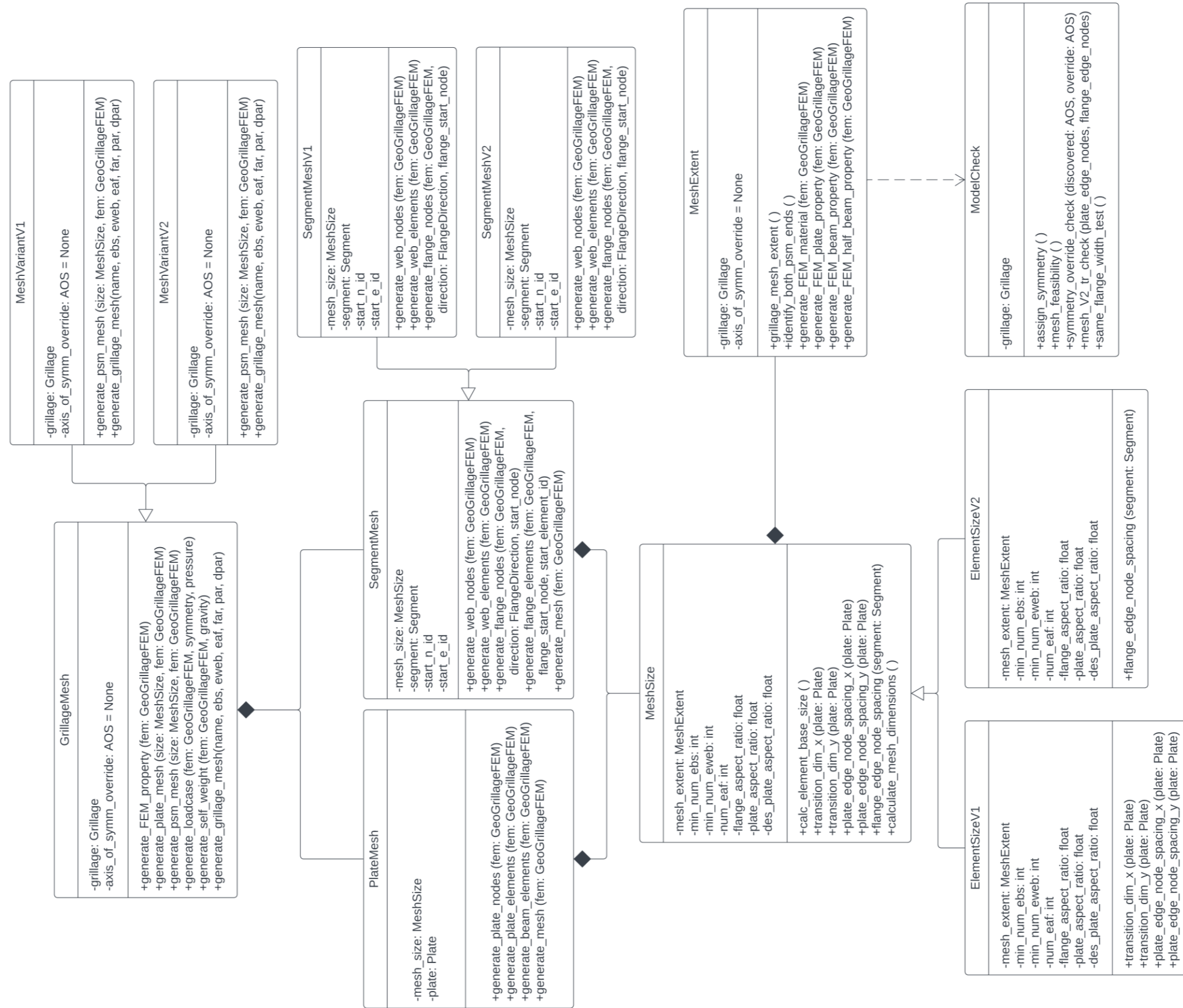
- I. UML dijagrami klasa
- II. Slike modela i mreža konačnih elemenata ispitnih varijanti konstrukcija
- III. Nacrti ispitnih varijanti konstrukcija grotlenih poklopaca
- IV. Programski kod modula `grillage_mesher.py`
- V. Programski kod modula `grillage_fem.py`

PRILOG I

UML dijagrami klasa



Slika 1-1 UML dijagram klasa programskog koda grillage_model.py

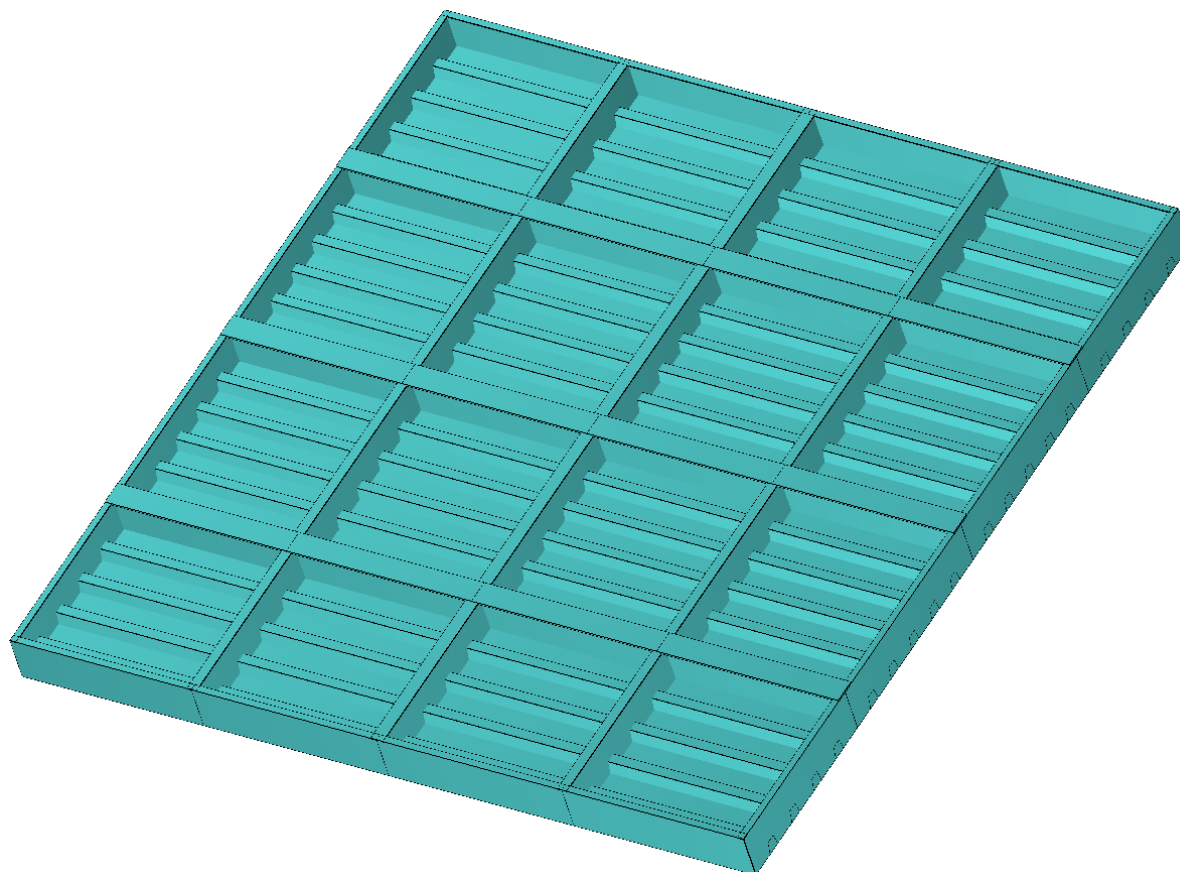


Slika 1-2 UML dijagram klasa programskog koda grillage_mesher.py

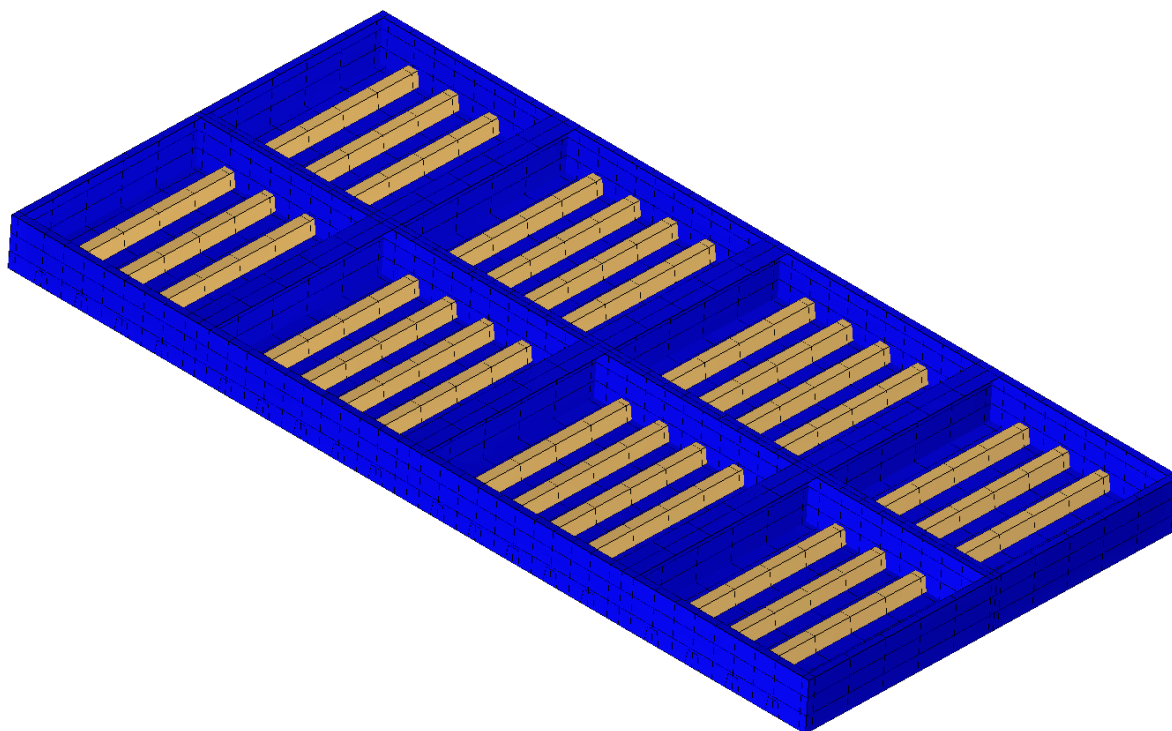
PRILOG II

**Slike modela i mreža konačnih
elemenata ispitnih varijanti konstrukcija**

1.) Ispitna varijanta hc_var_1



Slika 2-1 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_1



Slika 2-2 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1

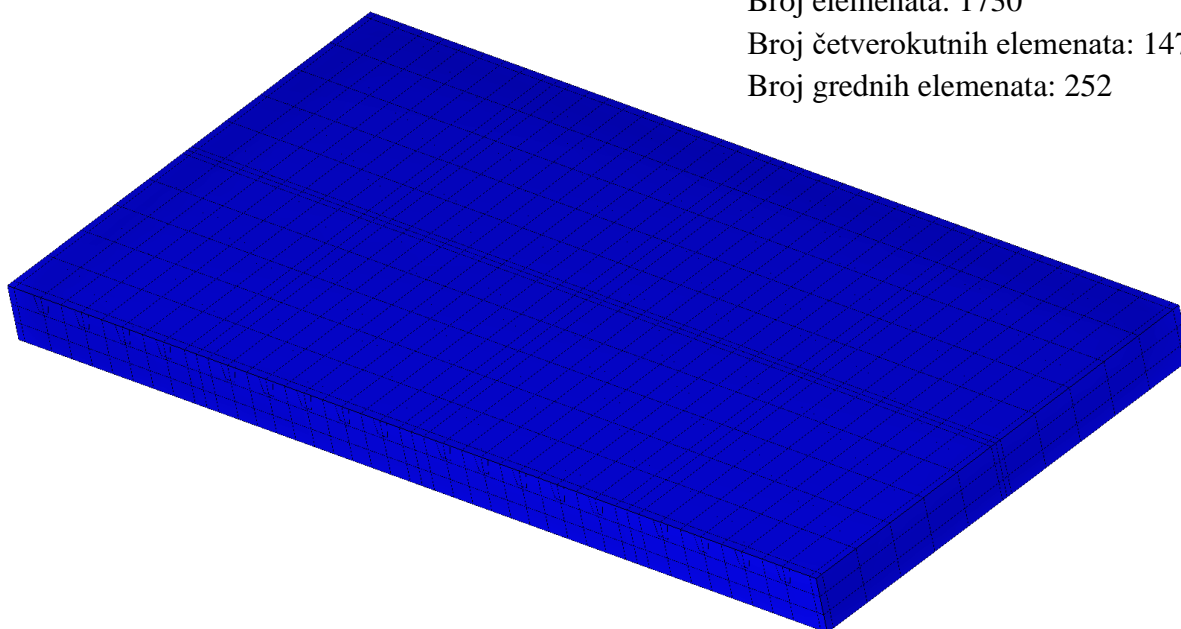
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 1484

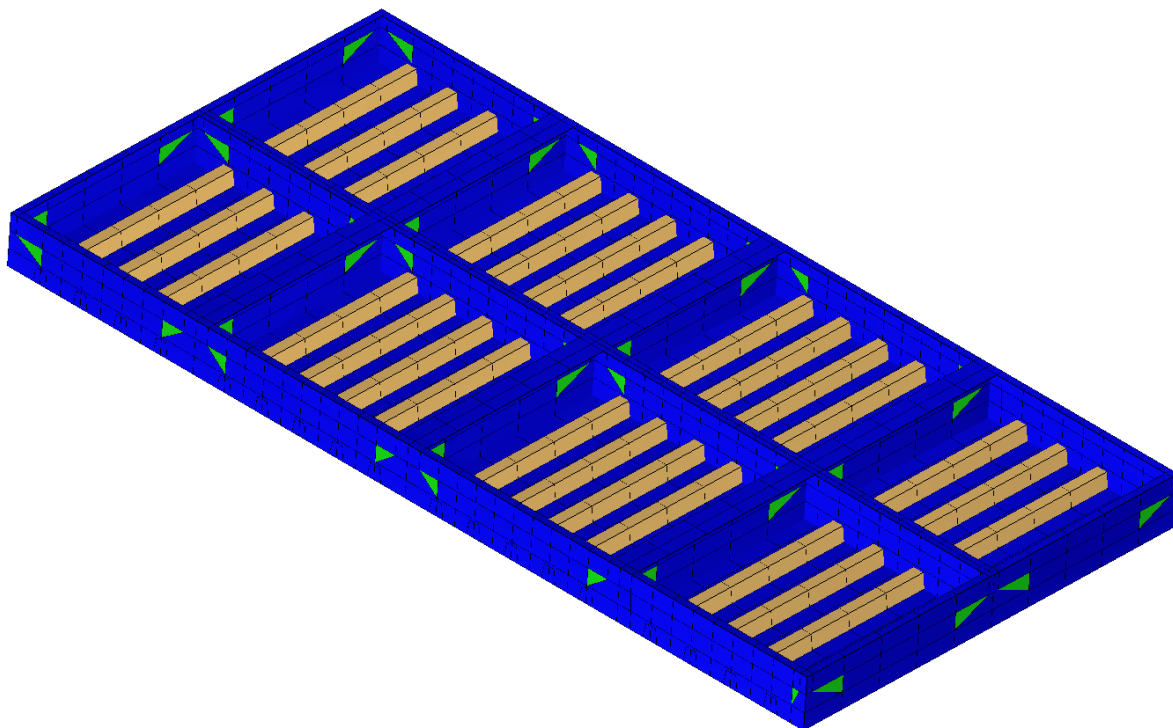
Broj elemenata: 1730

Broj četverokutnih elemenata: 1478

Broj grednih elemenata: 252



Slika 2-3 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1



Slika 2-4 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1

Varijanta mreže V2

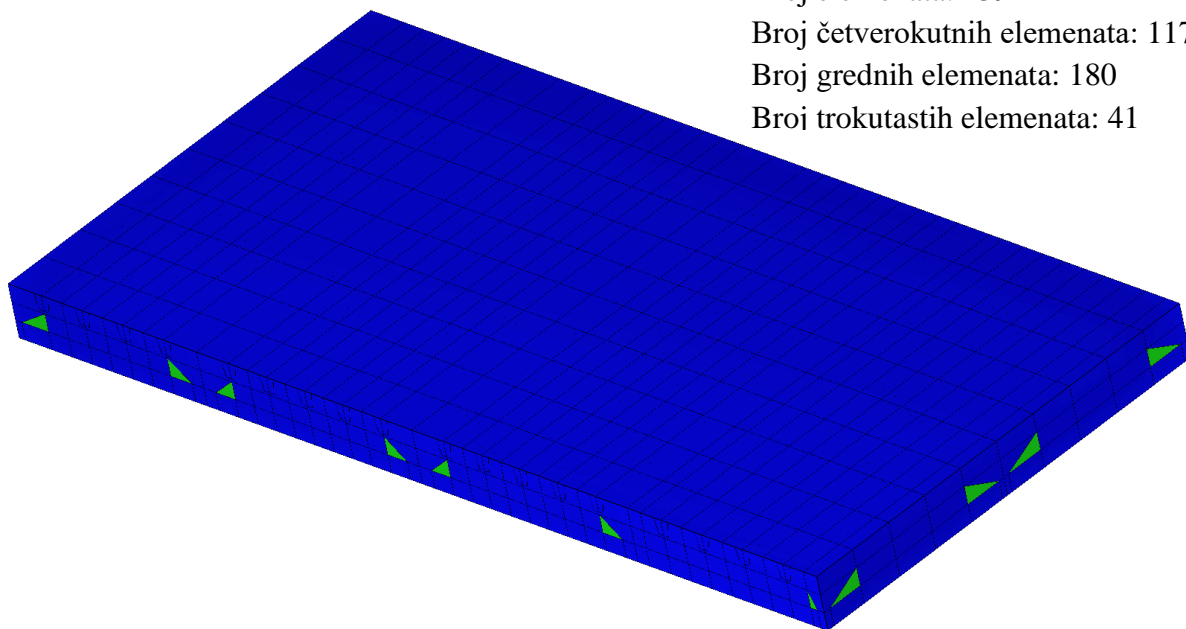
Broj čvorova: 1210

Broj elemenata: 1394

Broj četverokutnih elemenata: 1173

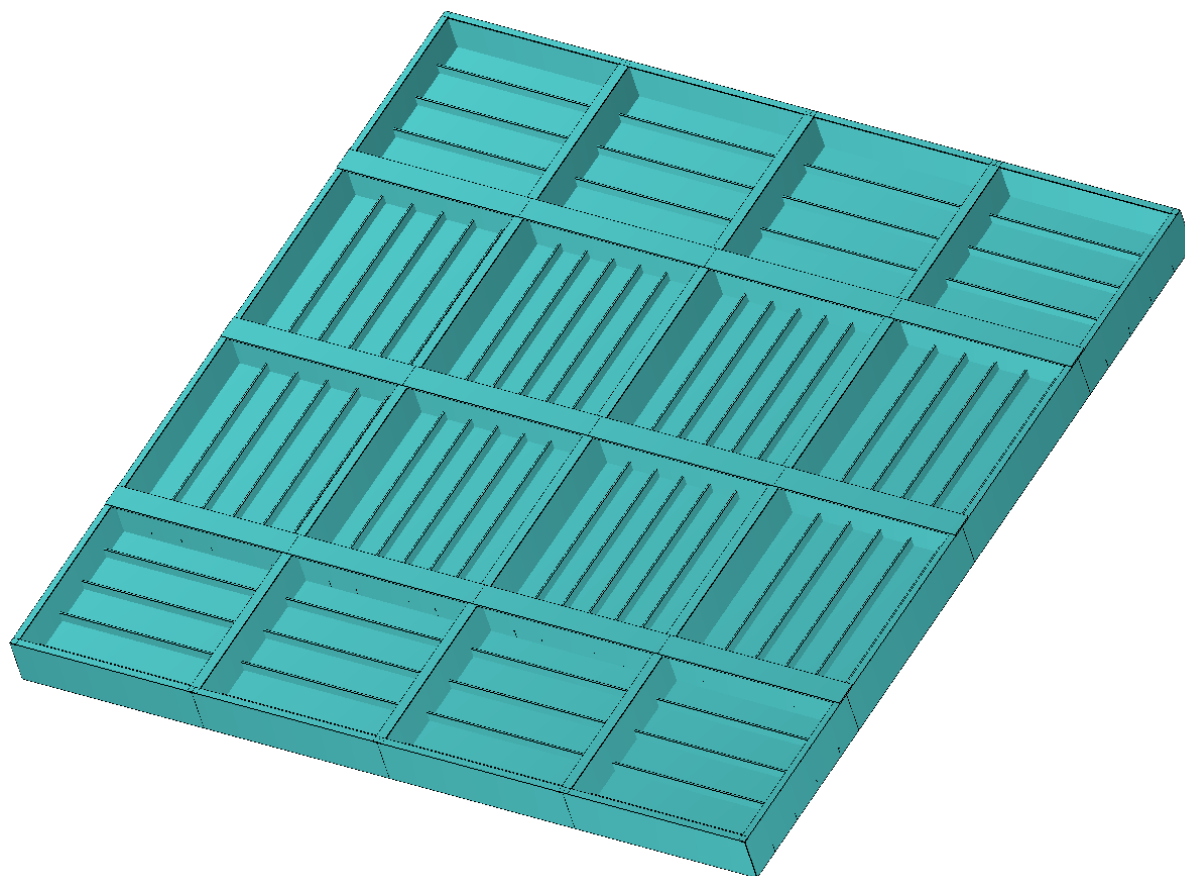
Broj grednih elemenata: 180

Broj trokutastih elemenata: 41

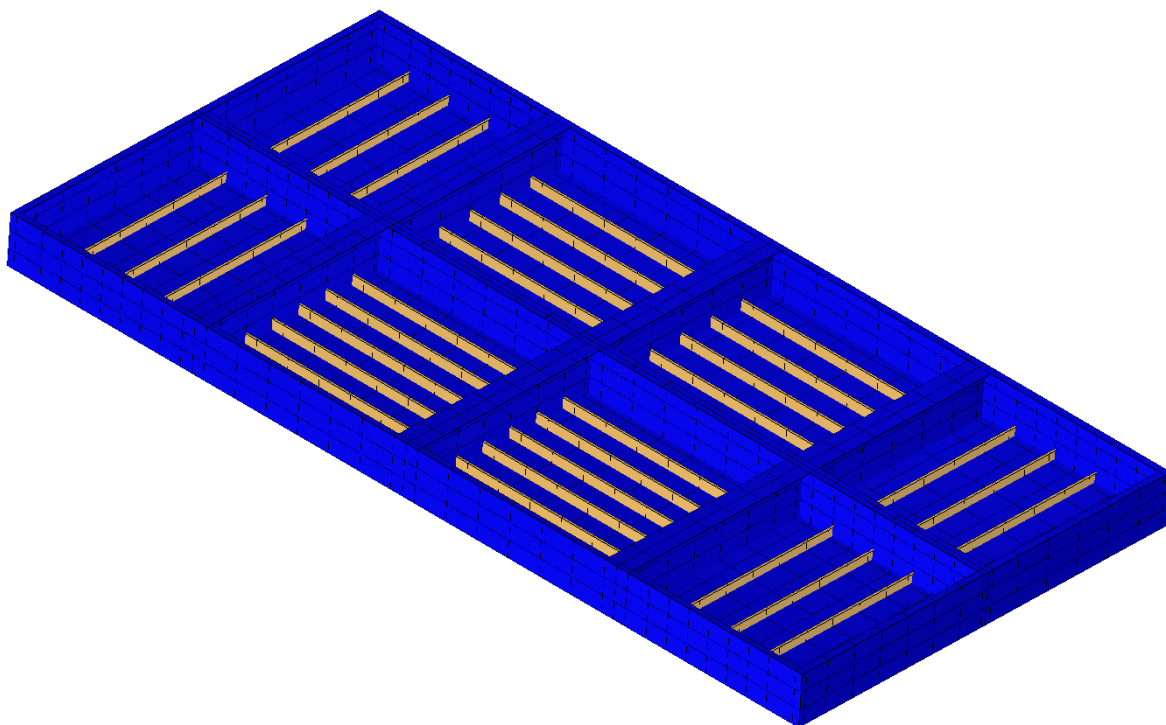


Slika 2-5 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1

2.) Ispitna varijanta hc_var_2



Slika 2-6 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_2



Slika 2-7 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2

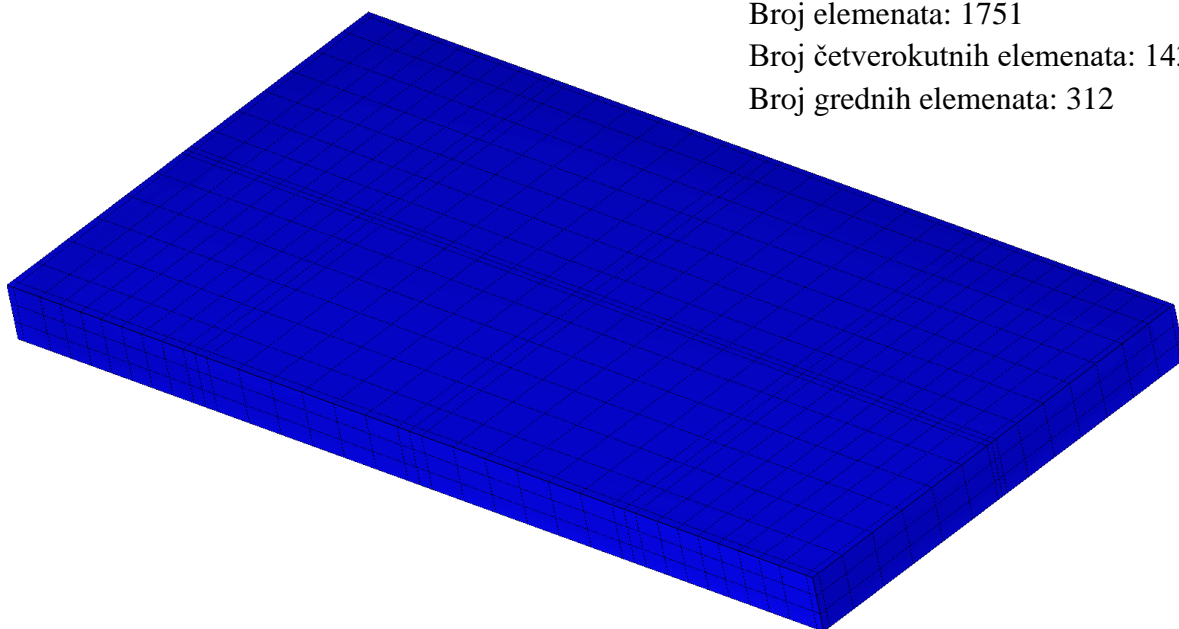
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 1440

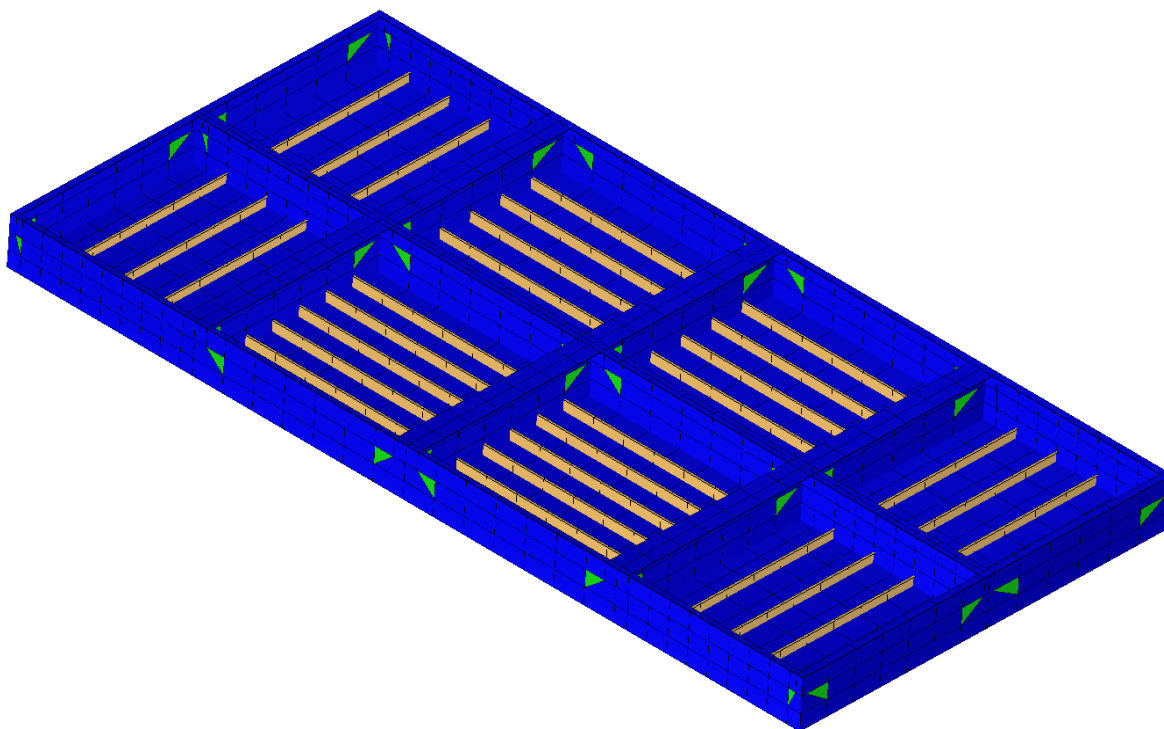
Broj elemenata: 1751

Broj četverokutnih elemenata: 1439

Broj grednih elemenata: 312



Slika 2-8 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2



Slika 2-9 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2

Varijanta mreže V2

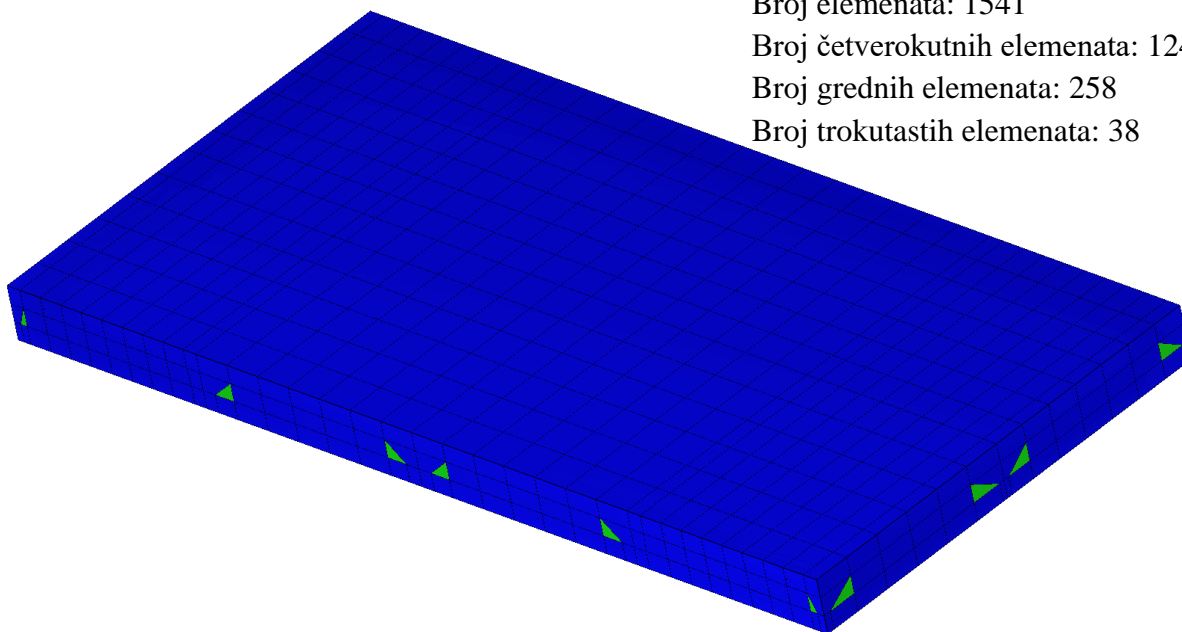
Broj čvorova: 1278

Broj elemenata: 1541

Broj četverokutnih elemenata: 1245

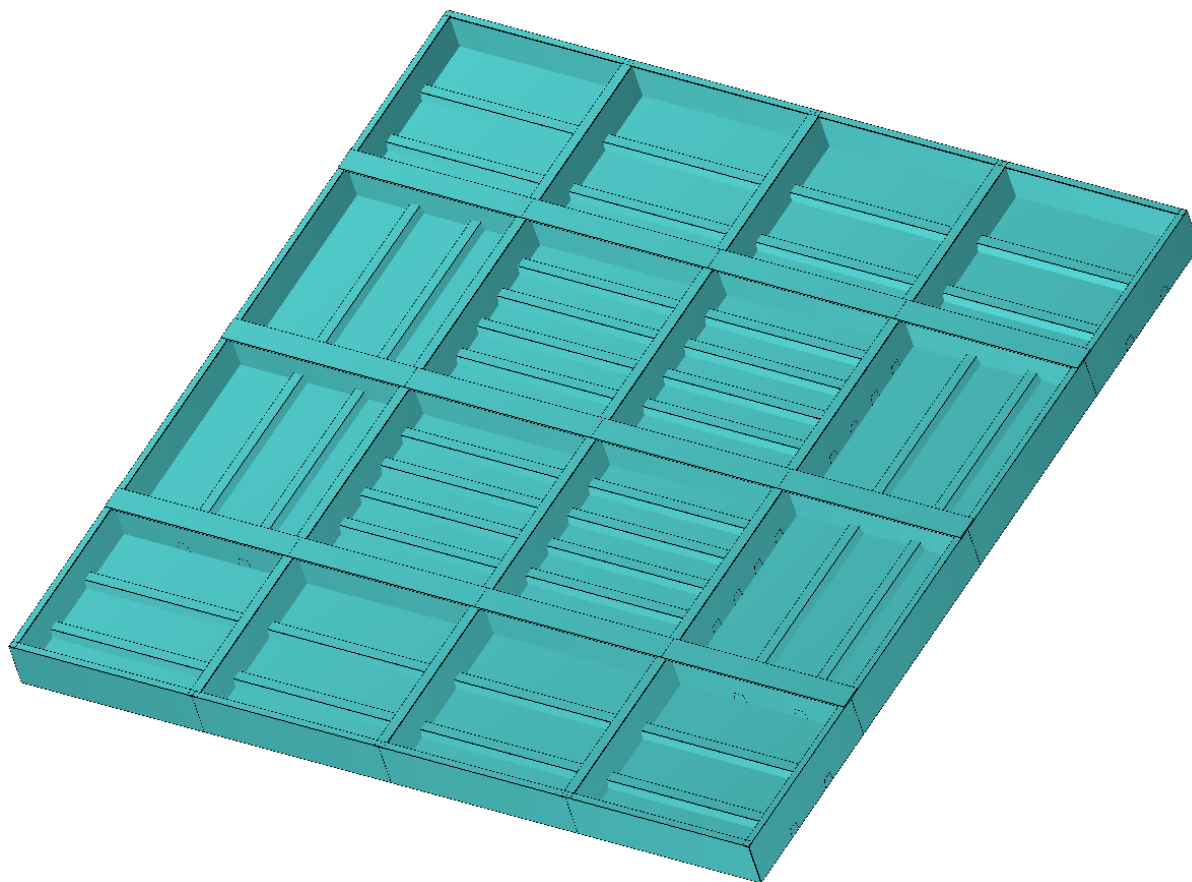
Broj grednih elemenata: 258

Broj trokutastih elemenata: 38

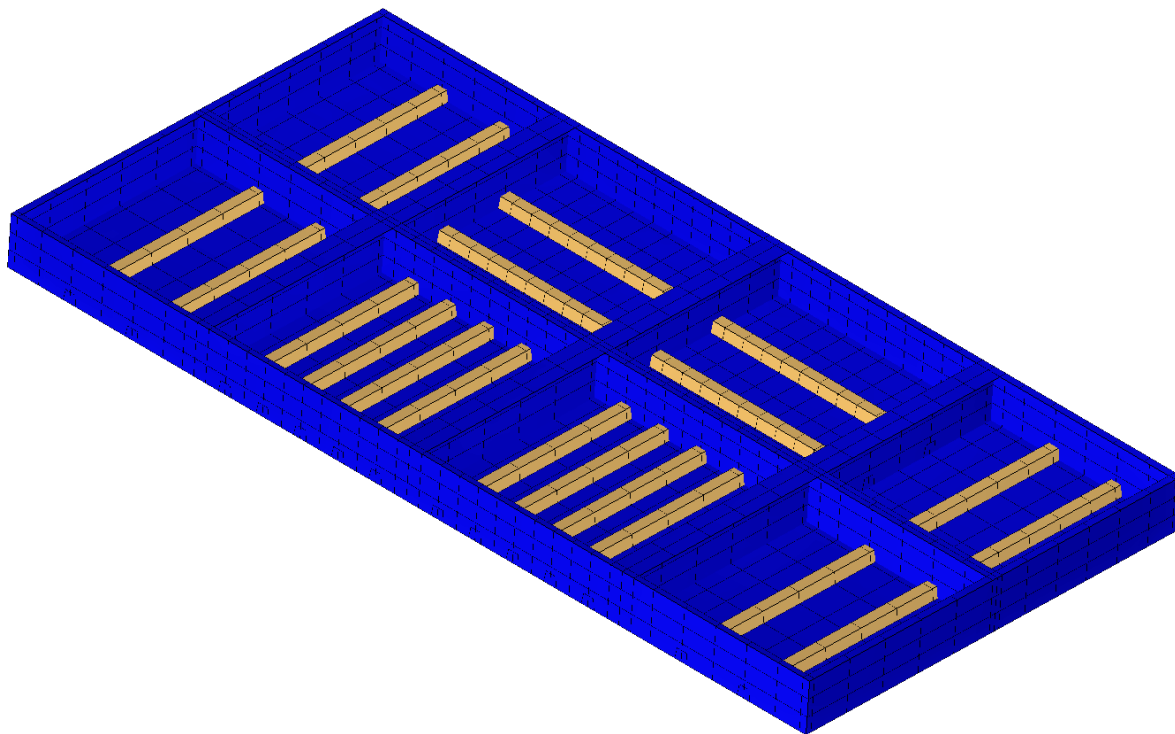


Slika 2-10 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2

3.) Ispitna varijanta hc_var_3



Slika 2-11 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_3



Slika 2-12 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3

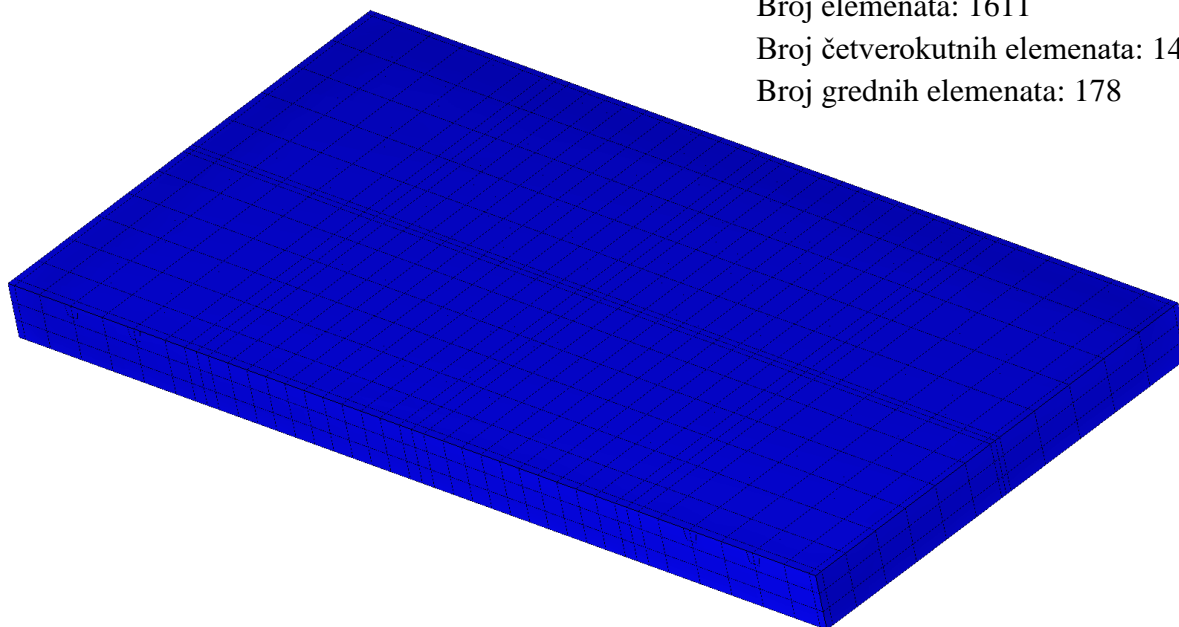
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 1436

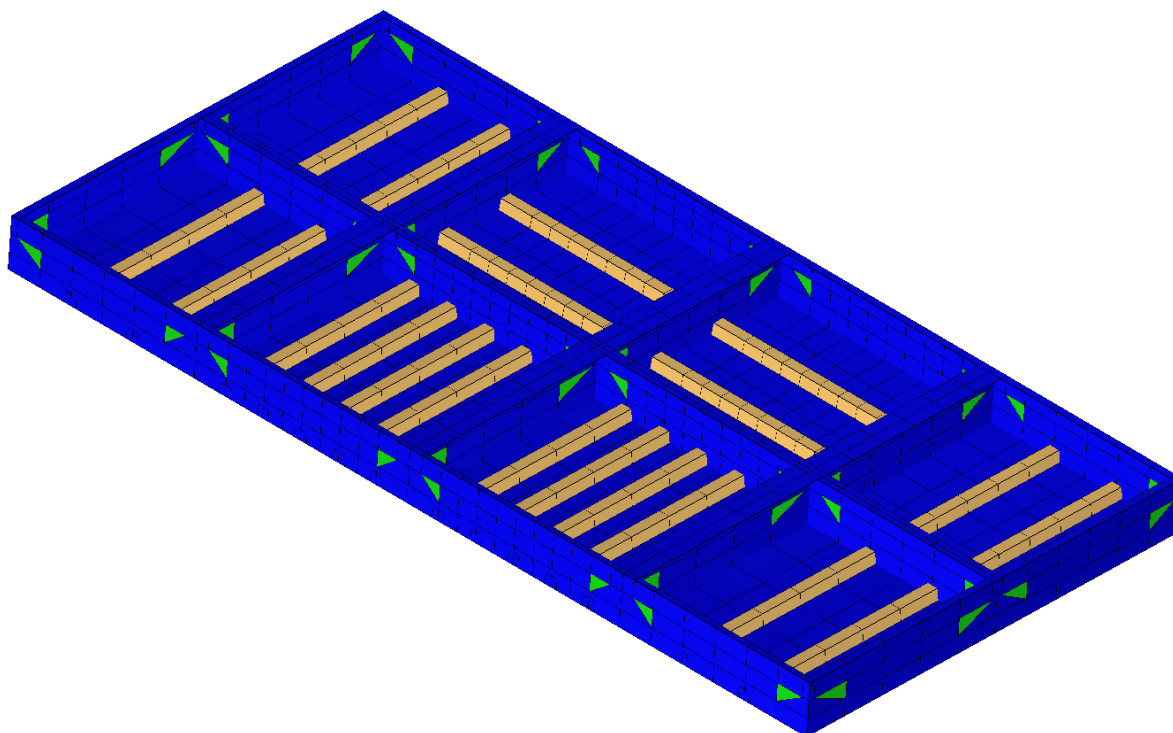
Broj elemenata: 1611

Broj četverokutnih elemenata: 1433

Broj grednih elemenata: 178



Slika 2-13 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3



Slika 2-14 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3

Varijanta mreže V2

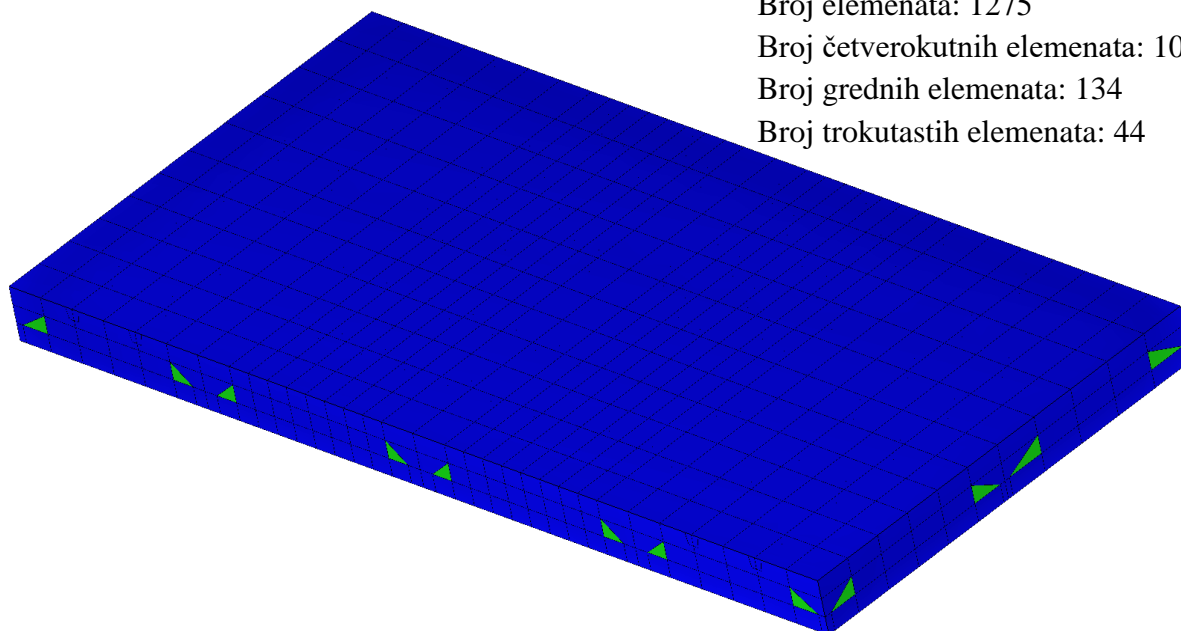
Broj čvorova: 1132

Broj elemenata: 1275

Broj četverokutnih elemenata: 1097

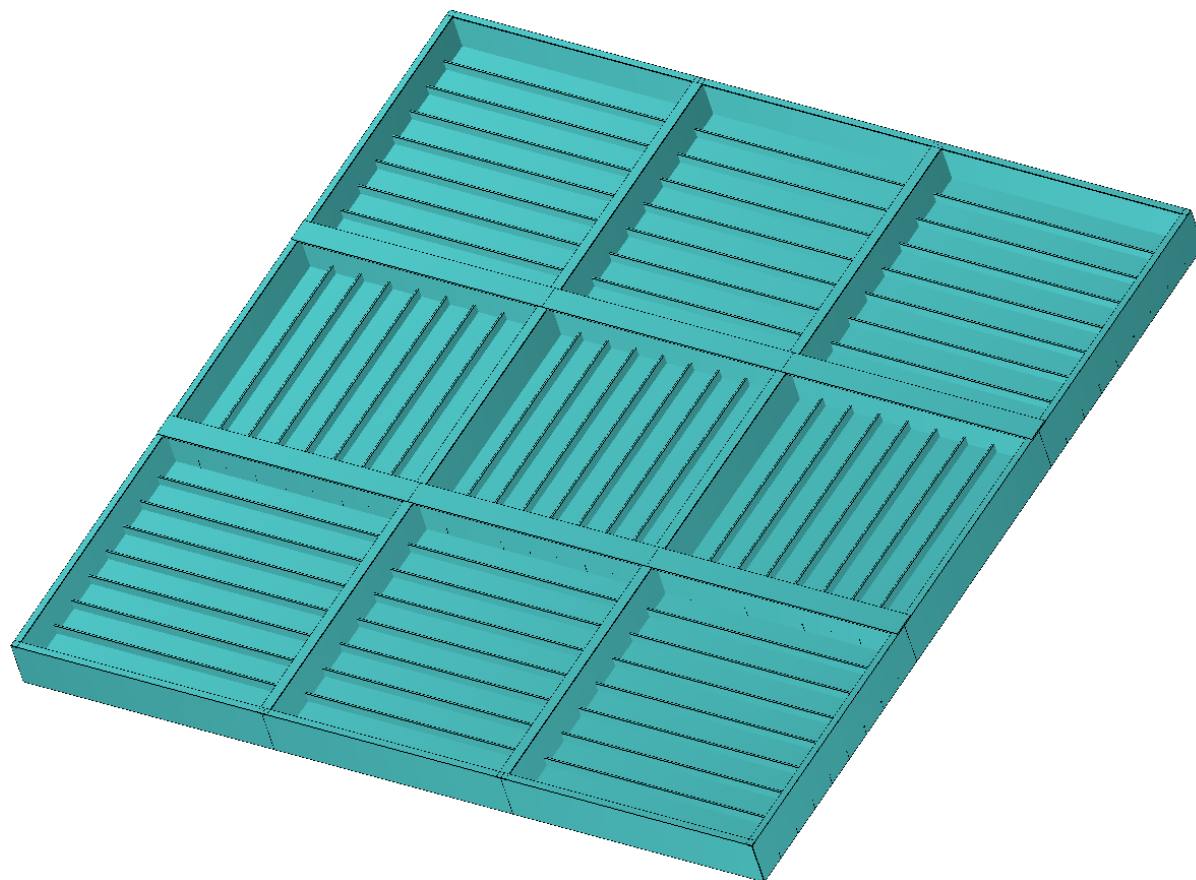
Broj grednih elemenata: 134

Broj trokutastih elemenata: 44

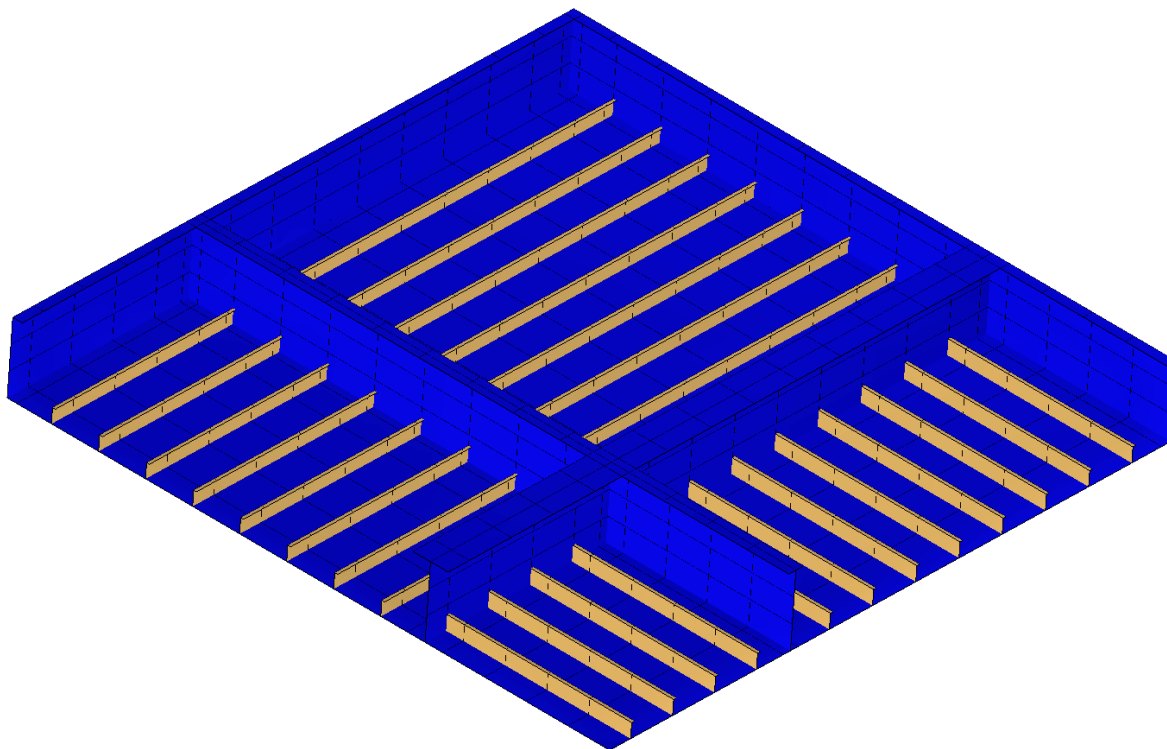


Slika 2-15 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3

4.) Ispitna varijanta hc_var_4



Slika 2-16 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_4



Slika 2-17 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4

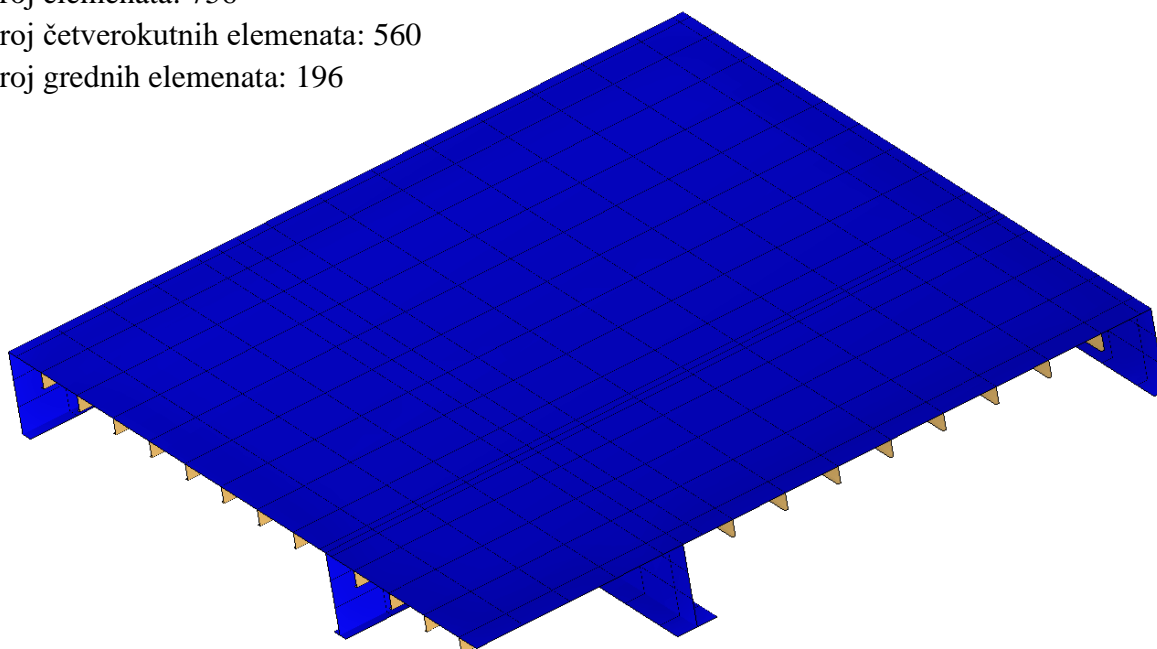
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 588

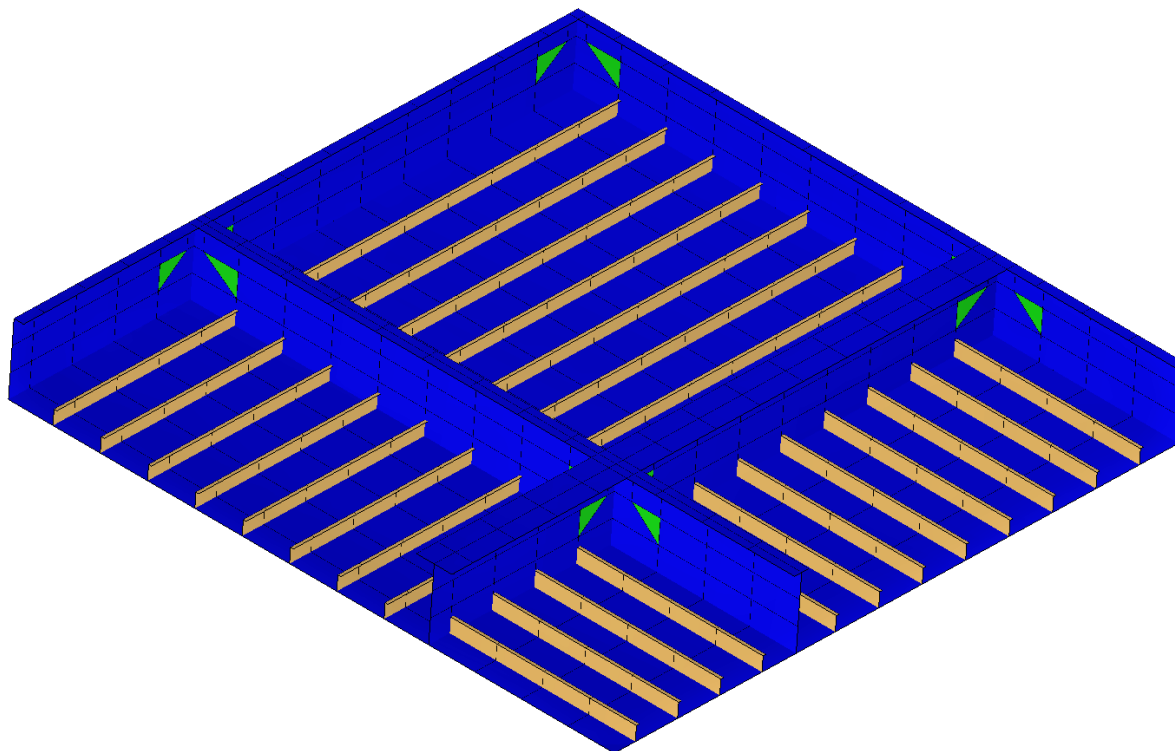
Broj elemenata: 756

Broj četverokutnih elemenata: 560

Broj grednih elemenata: 196



Slika 2-18 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4



Slika 2-19 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4

Varijanta mreže V2

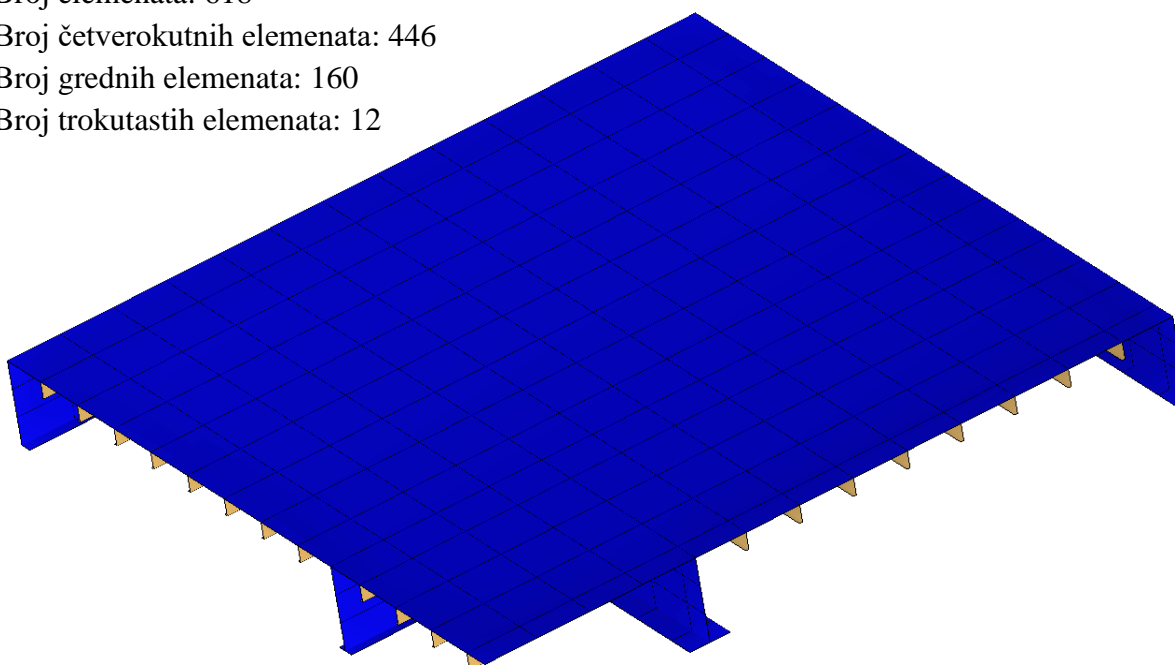
Broj čvorova: 480

Broj elemenata: 618

Broj četverokutnih elemenata: 446

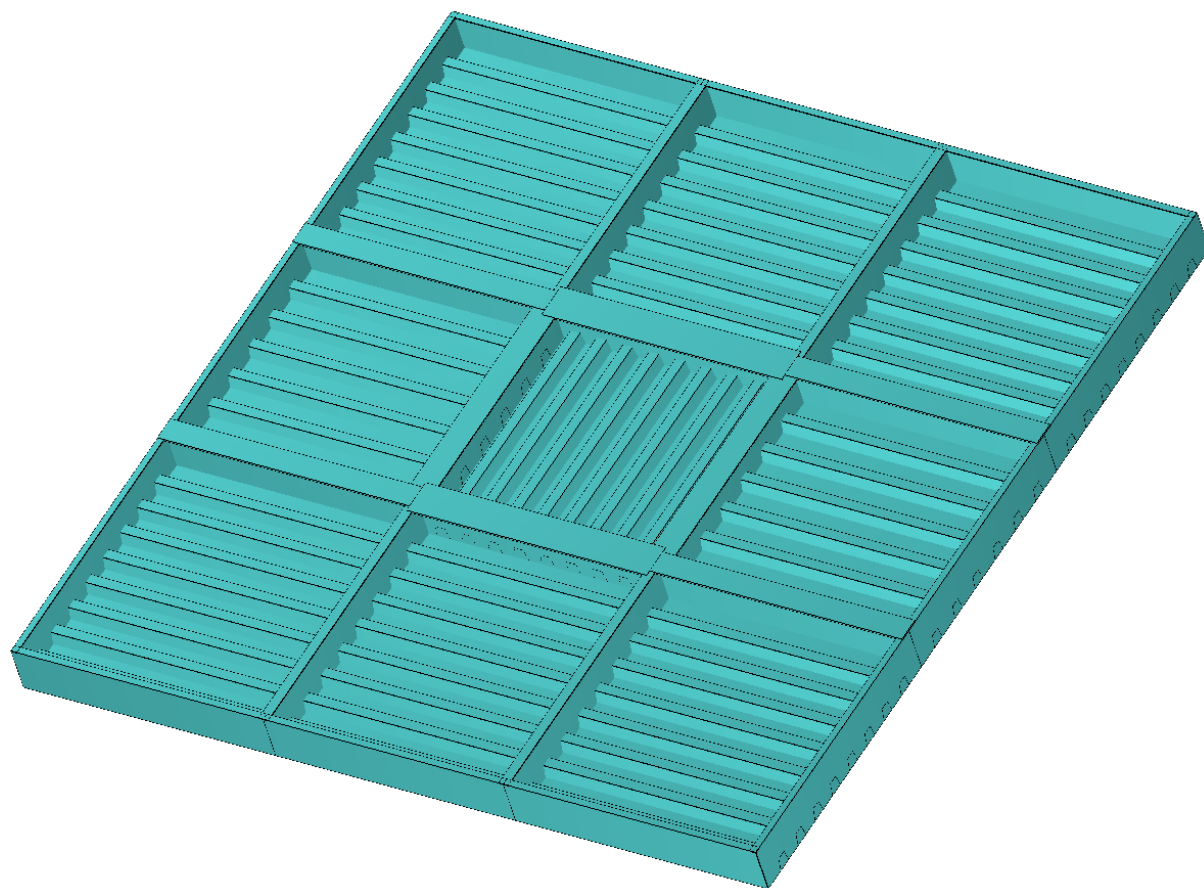
Broj grednih elemenata: 160

Broj trokutastih elemenata: 12

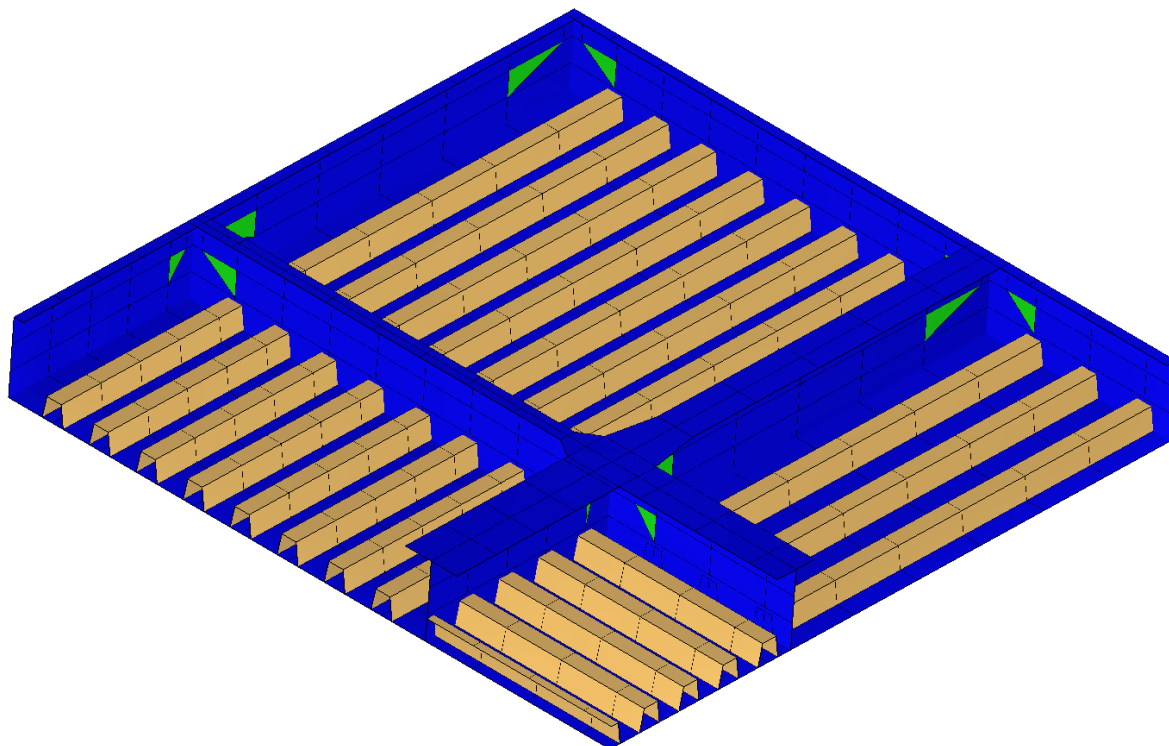


Slika 2-20 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4

5.) Ispitna varijanta hc_var_5



Slika 2-21 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_5



Slika 2-22 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5

Varijanta mreže V2

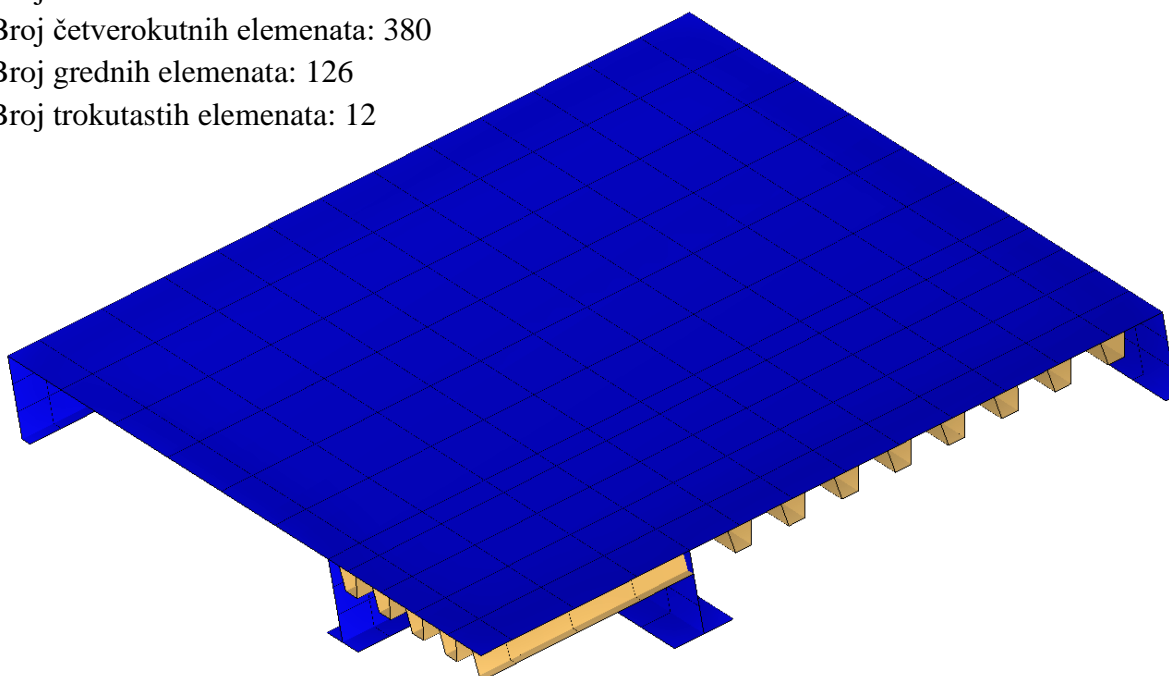
Broj čvorova: 411

Broj elemenata: 518

Broj četverokutnih elemenata: 380

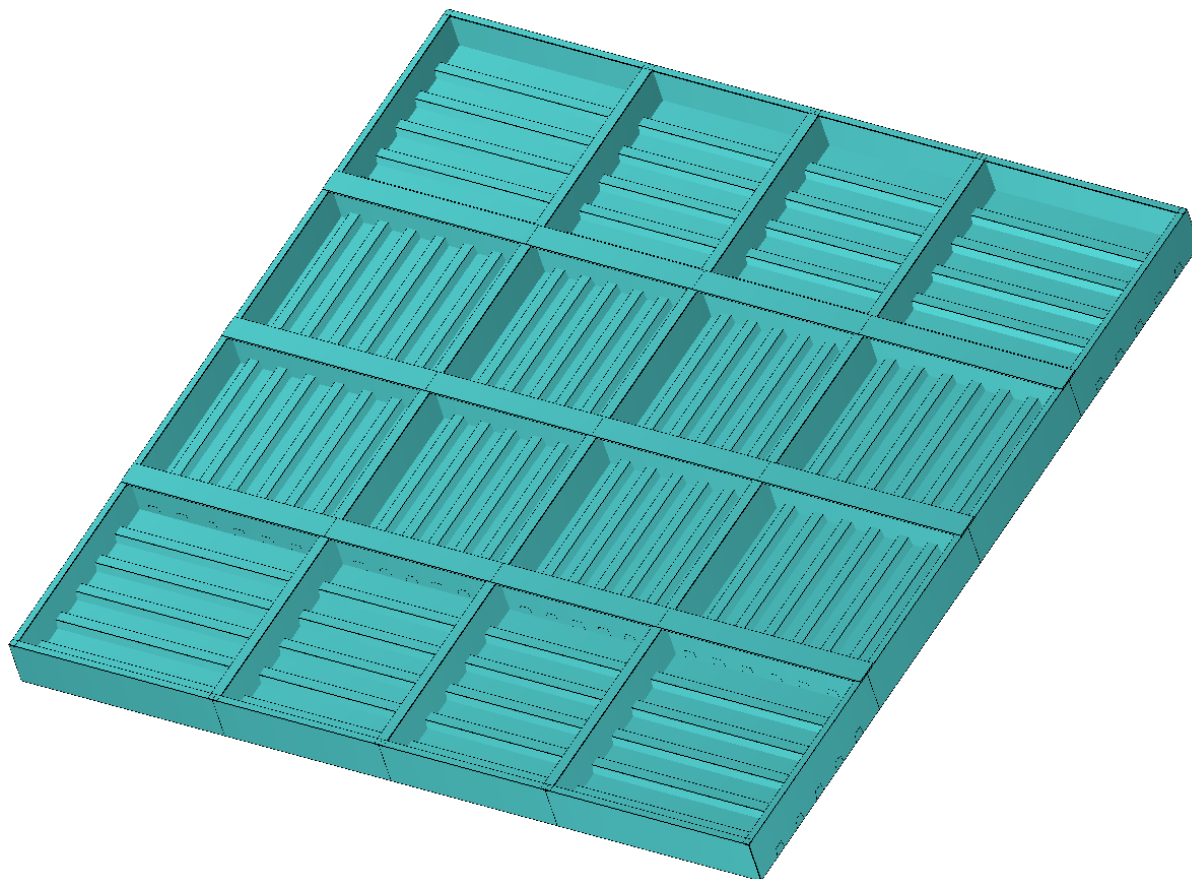
Broj grednih elemenata: 126

Broj trokutastih elemenata: 12

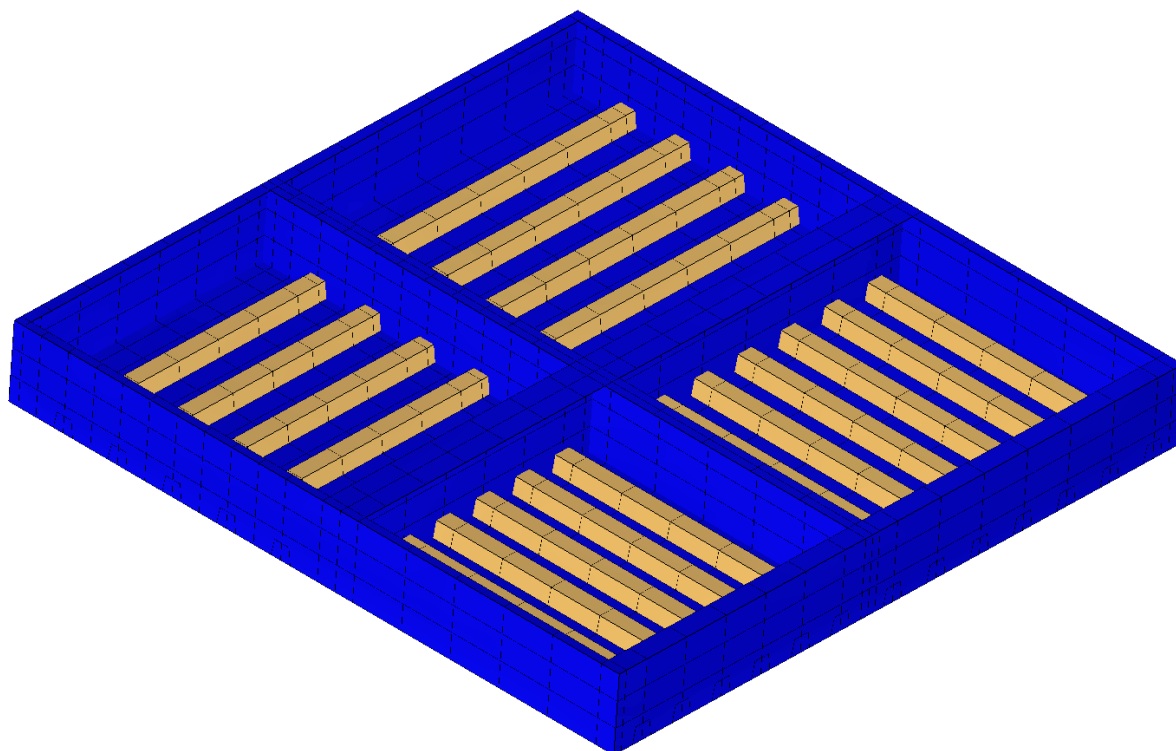


Slika 2-23 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5

6.) Ispitna varijanta hc_var_6



Slika 2-24 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_6



Slika 2-25 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6

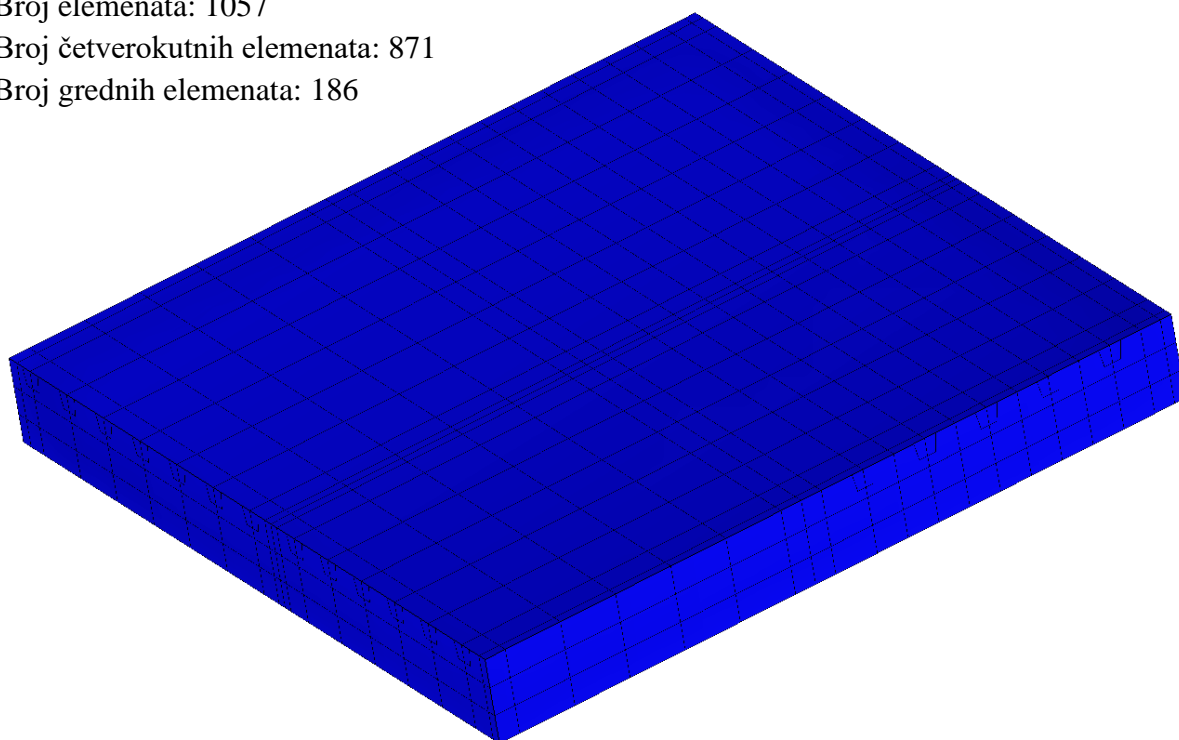
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 886

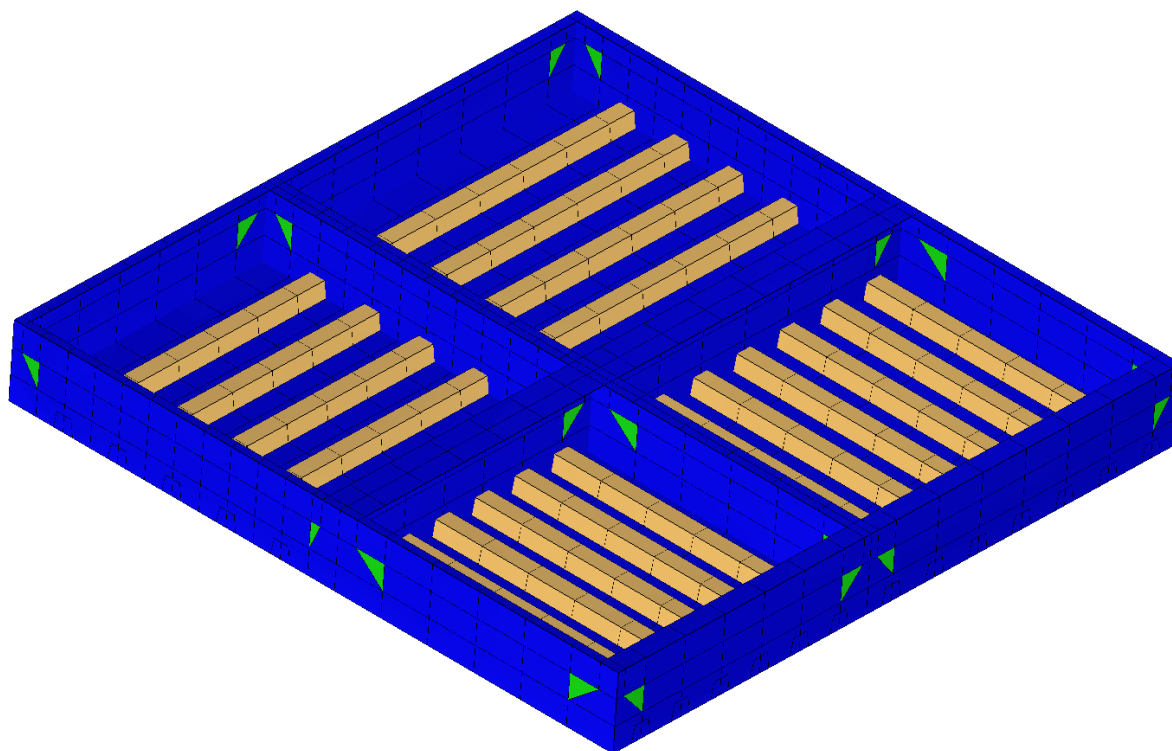
Broj elemenata: 1057

Broj četverokutnih elemenata: 871

Broj grednih elemenata: 186



Slika 2-26 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6



Slika 2-27 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6

Varijanta mreže V2

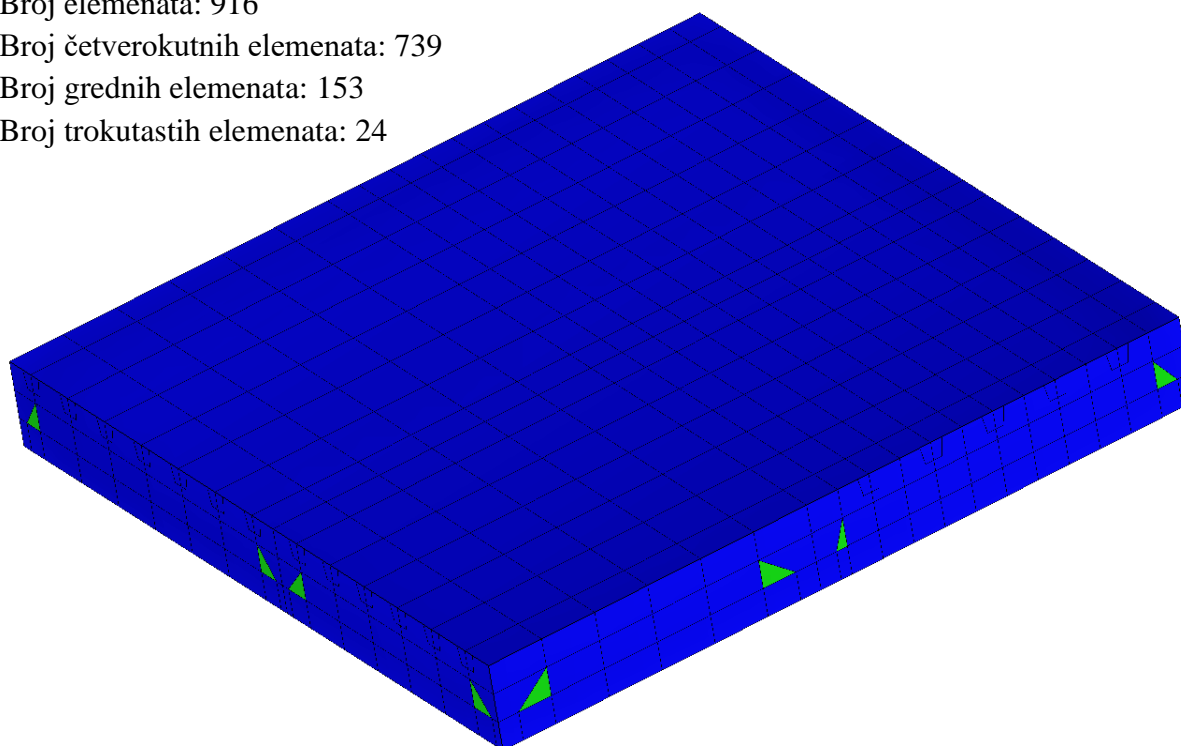
Broj čvorova: 772

Broj elemenata: 916

Broj četverokutnih elemenata: 739

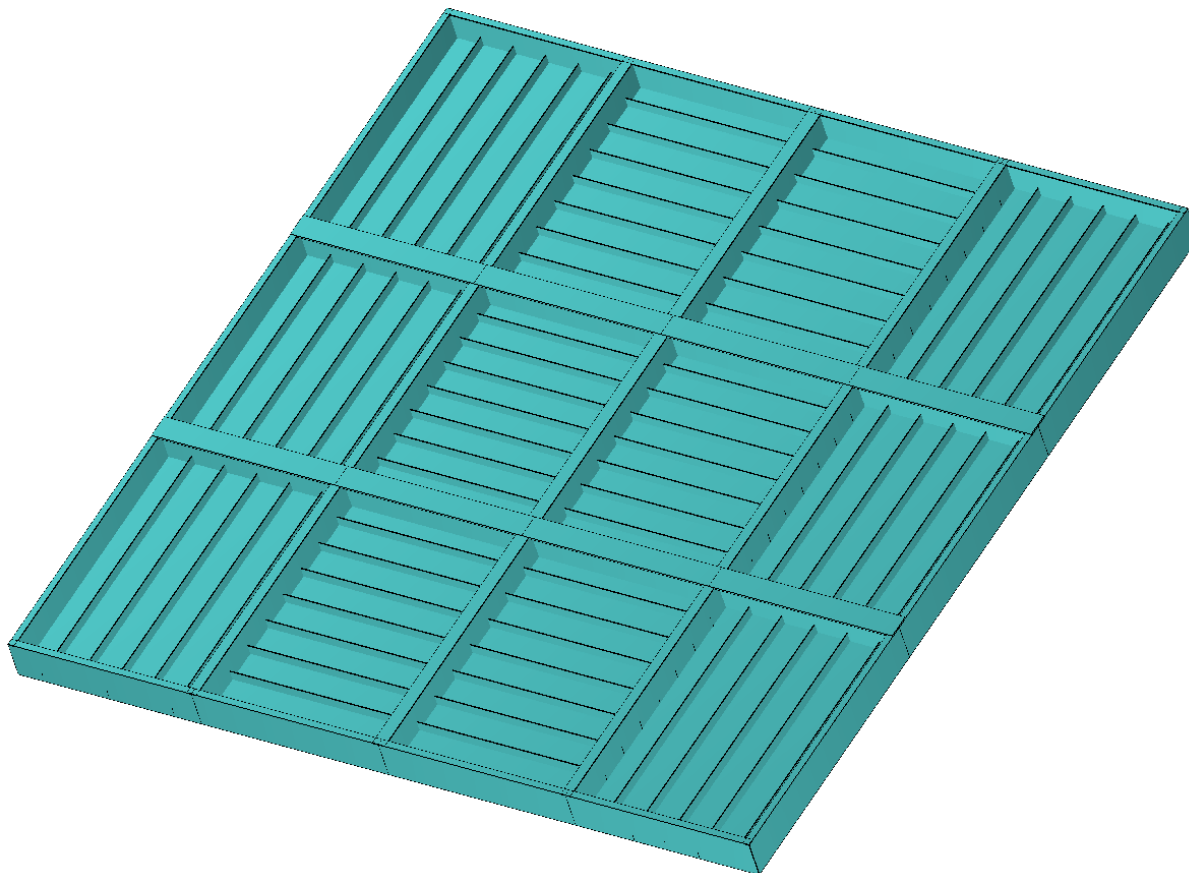
Broj grednih elemenata: 153

Broj trokutastih elemenata: 24

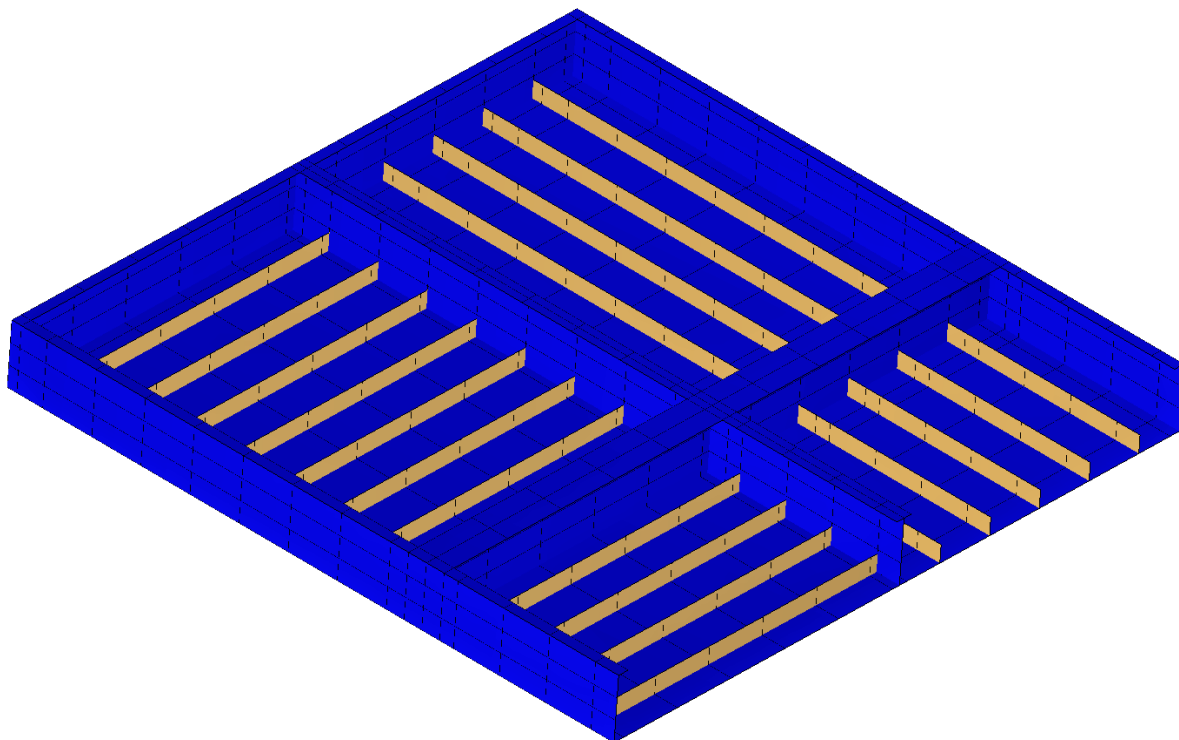


Slika 2-28 Varijanta mreže V2, prikaz oplate, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6

7.) Ispitna varijanta hc_var_7



Slika 2-29 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_7



Slika 2-30 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7

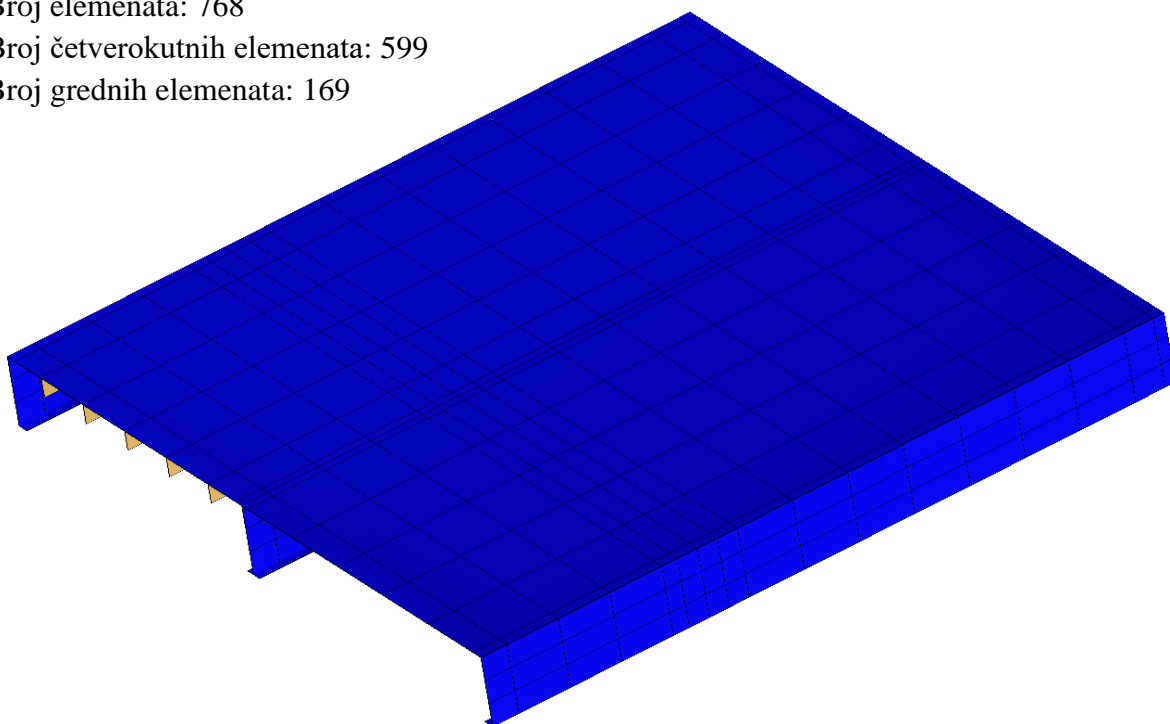
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 619

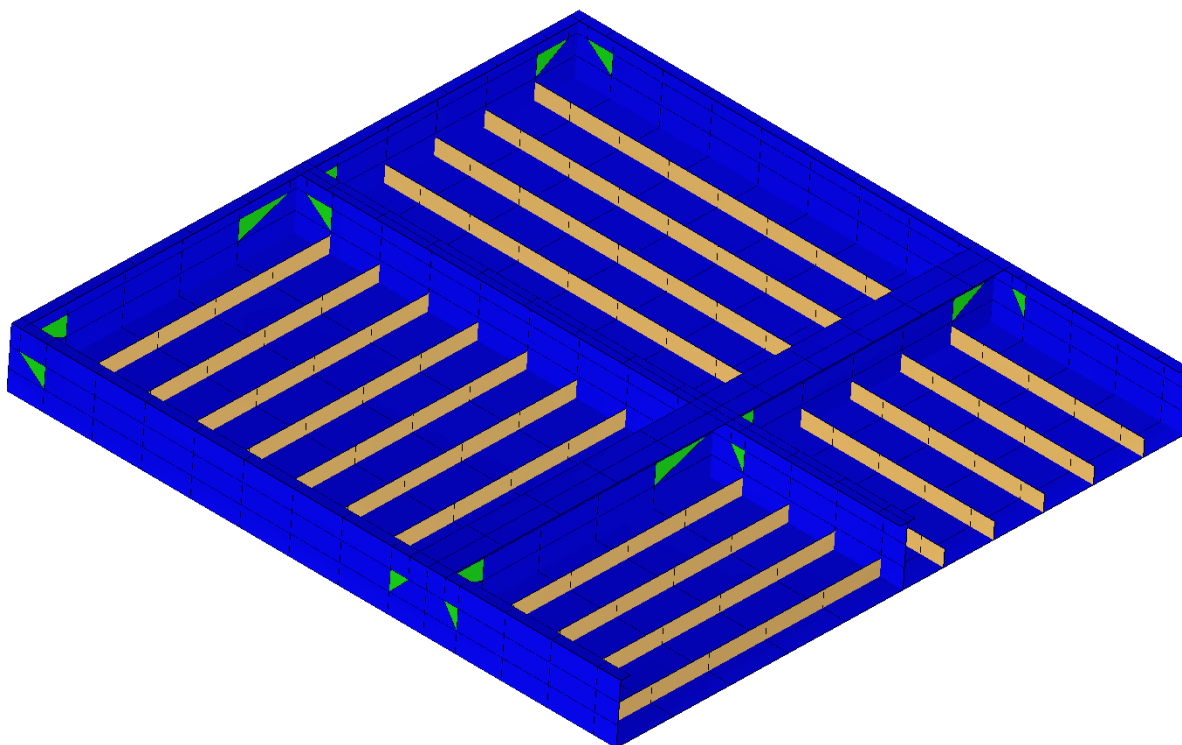
Broj elemenata: 768

Broj četverokutnih elemenata: 599

Broj grednih elemenata: 169



Slika 2-31 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7



Slika 2-32 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7

Varijanta mreže V2

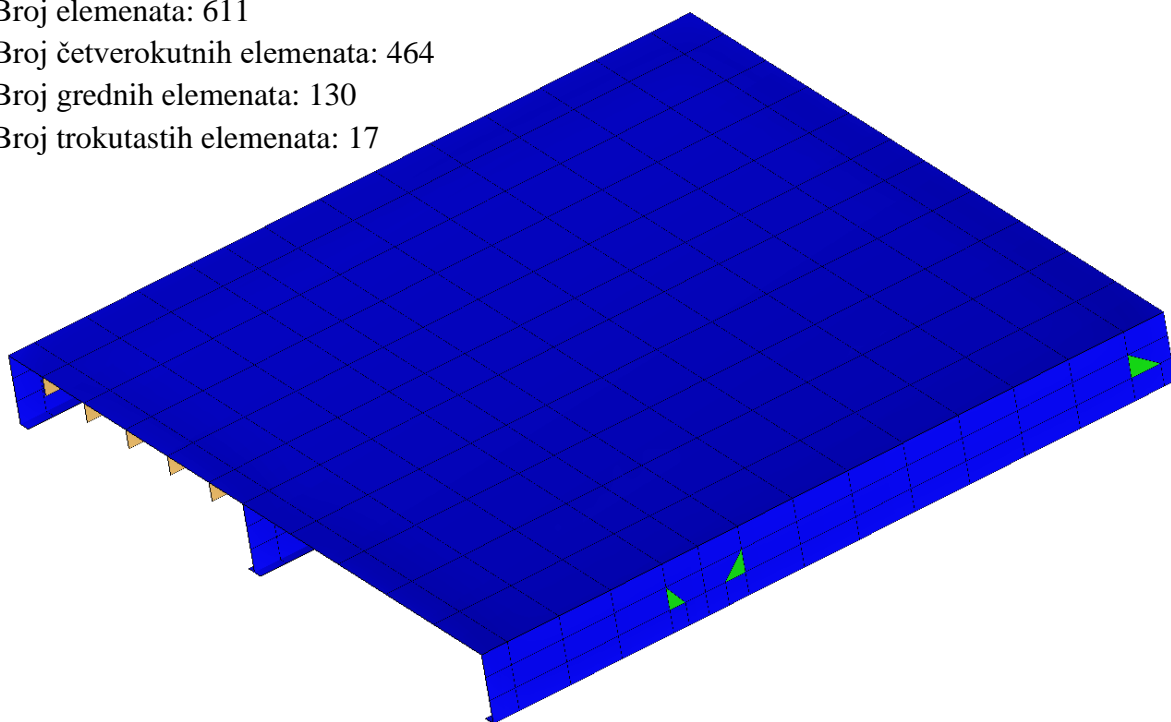
Broj čvorova: 494

Broj elemenata: 611

Broj četverokutnih elemenata: 464

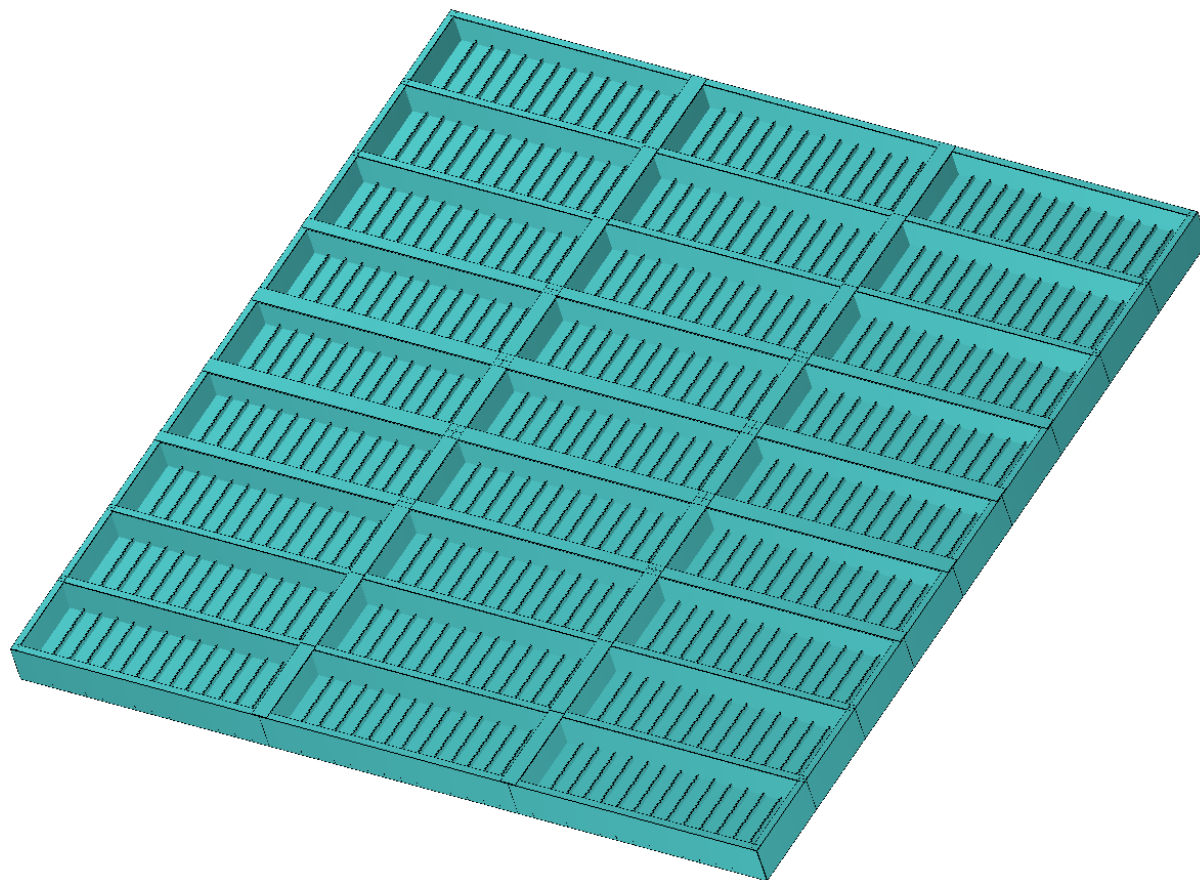
Broj grednih elemenata: 130

Broj trokutastih elemenata: 17

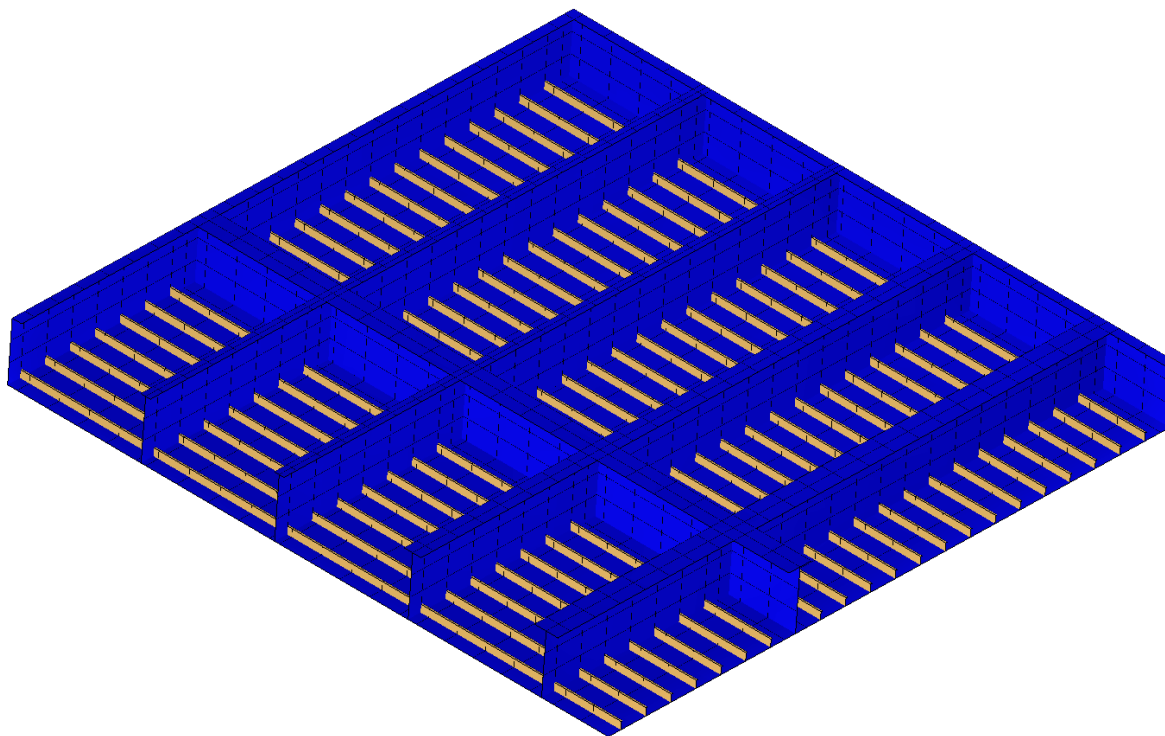


Slika 2-33 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7

8.) Ispitna varijanta hc_var_8



Slika 2-34 Model ispitne varijante konstrukcije hc_var_8



Slika 2-35 Varijanta mreže VI, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8

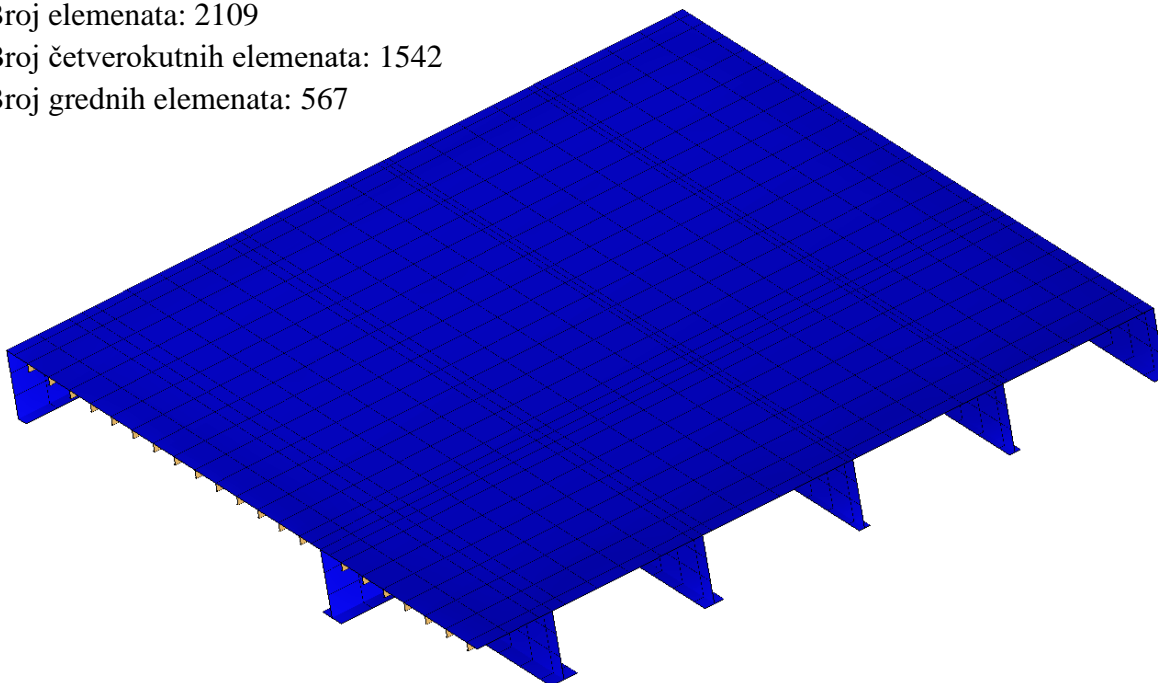
Varijanta mreže VI

Broj čvorova: 1566

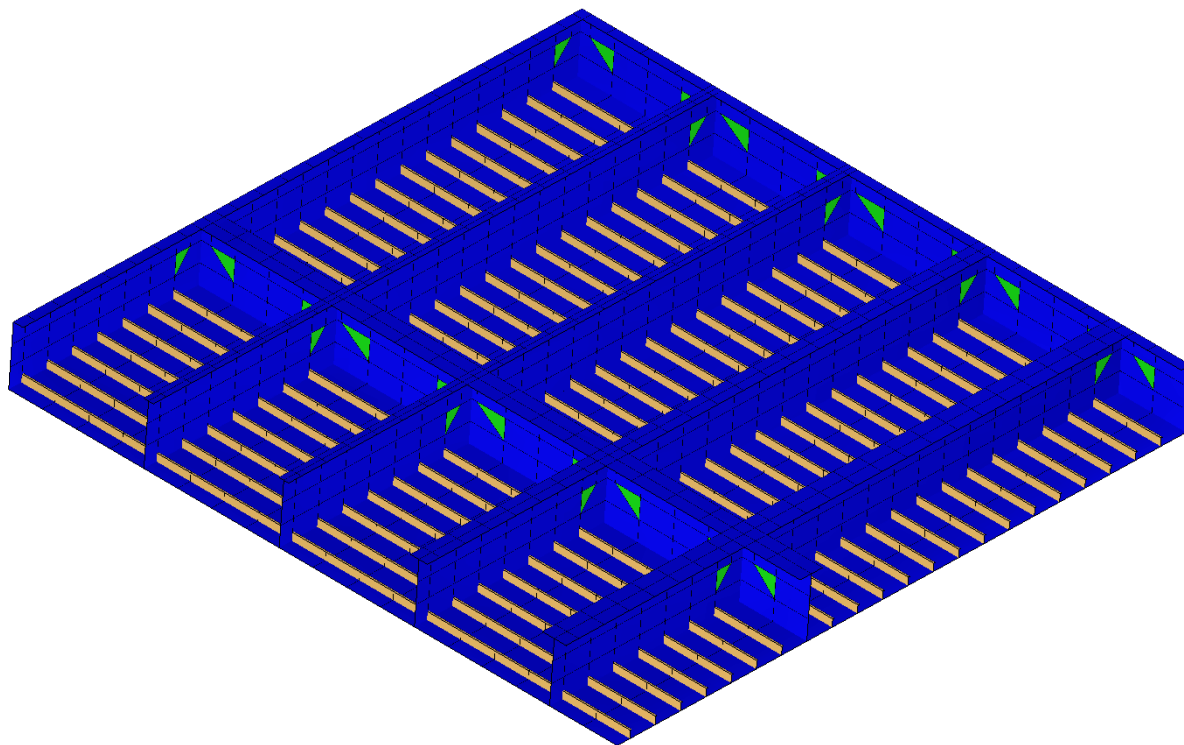
Broj elemenata: 2109

Broj četverokutnih elemenata: 1542

Broj grednih elemenata: 567



Slika 2-36 Varijanta mreže VI, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8



Slika 2-37 Varijanta mreže V2, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8

Varijanta mreže V2

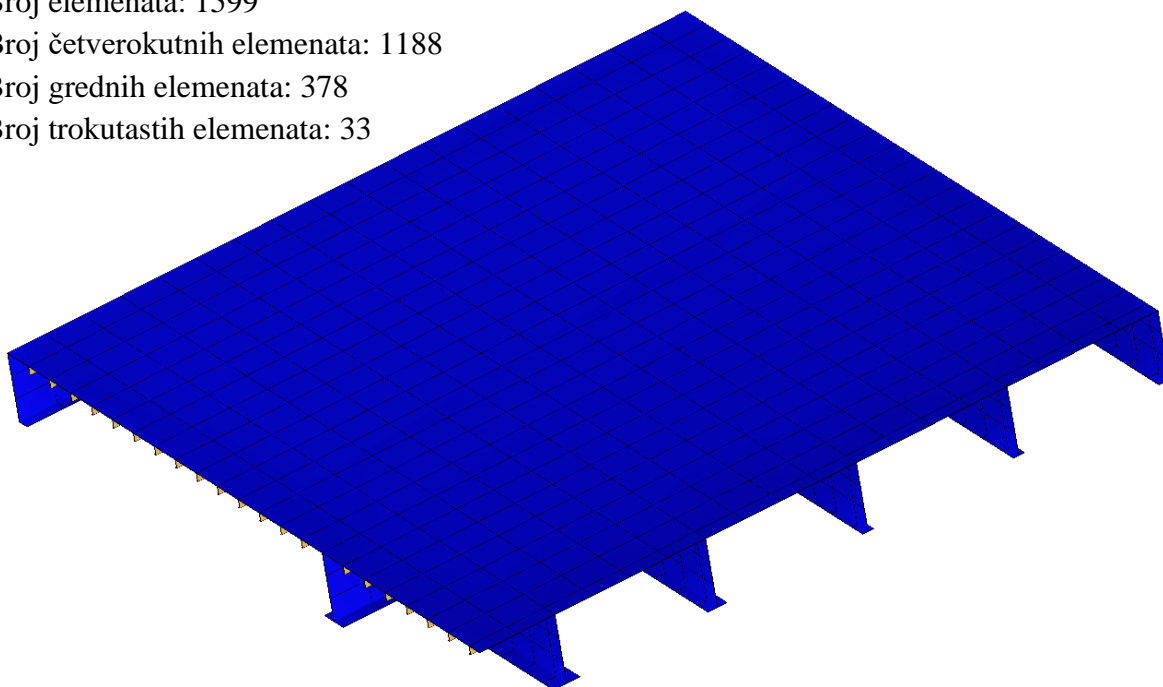
Broj čvorova: 1233

Broj elemenata: 1599

Broj četverokutnih elemenata: 1188

Broj grednih elemenata: 378

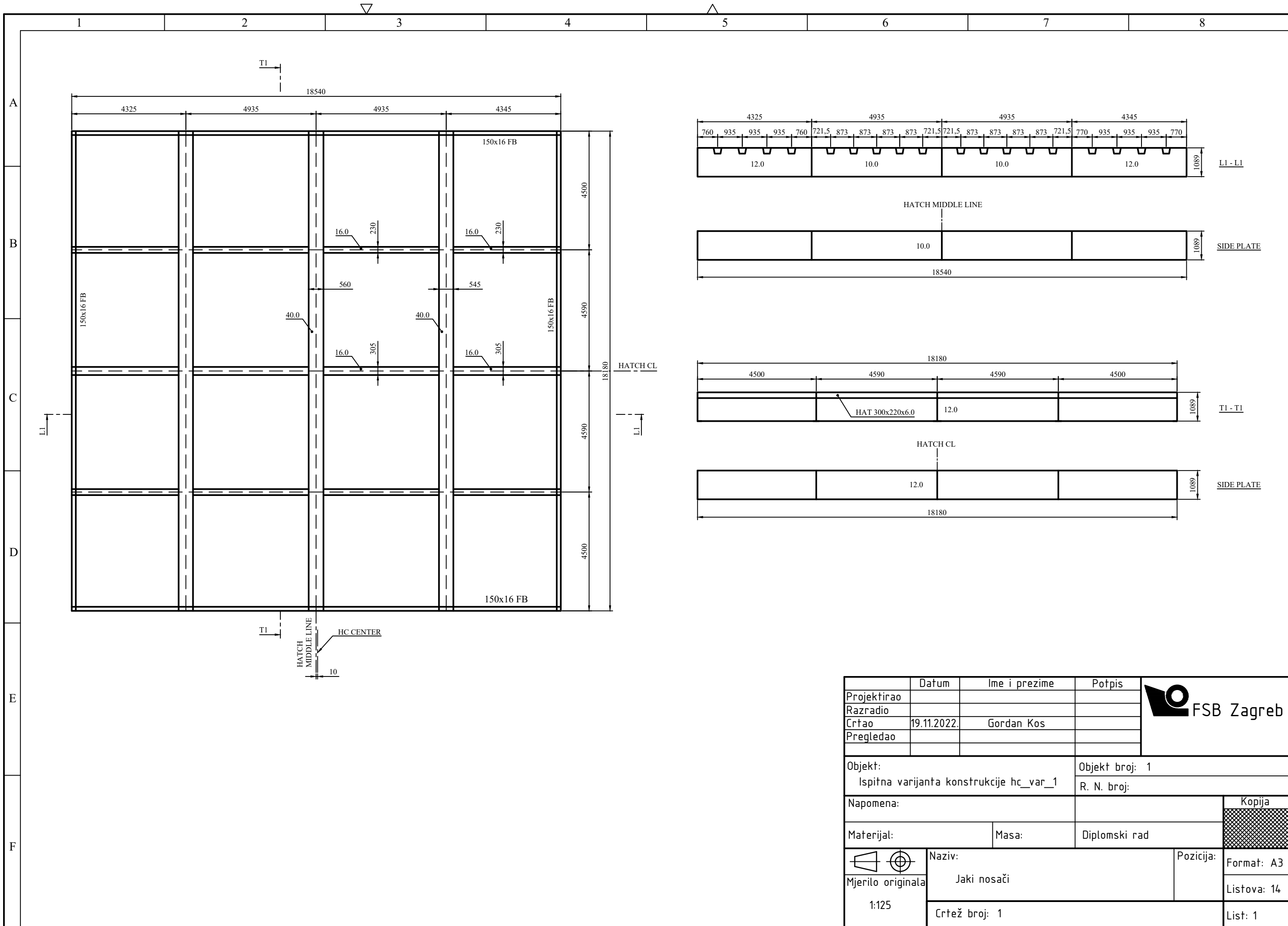
Broj trokutastih elemenata: 33



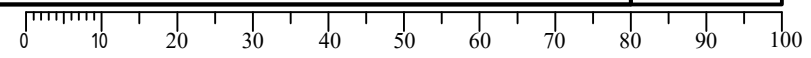
Slika 2-38 Varijanta mreže V2, prikaz oplata, ispitna varijanta konstrukcije hc_var_8

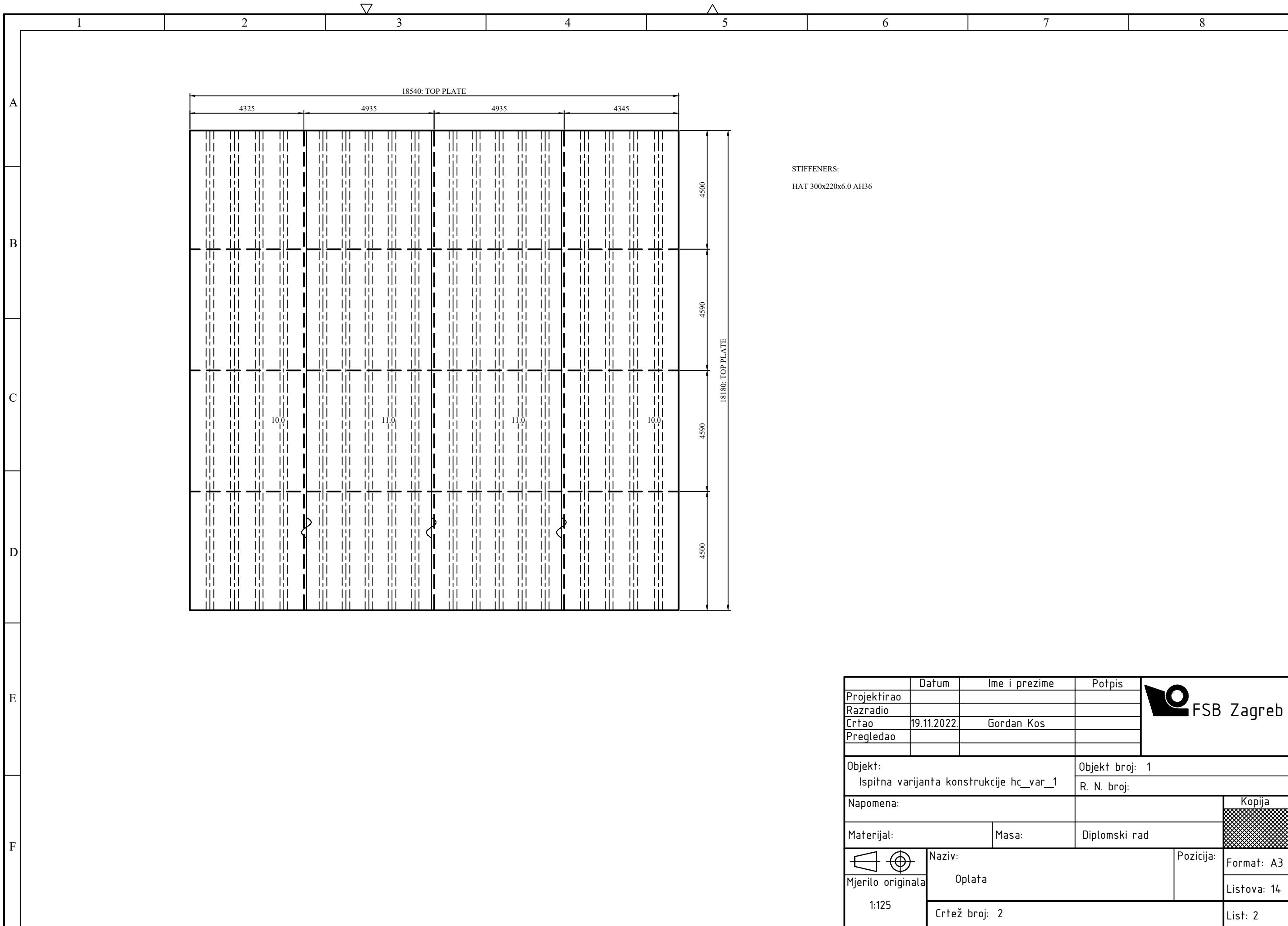
PRILOG III

**Nacrti ispitnih varijanti
konstrukcija grotlenih poklopaca**



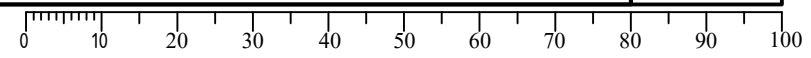
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1			Objekt broj: 1	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Jaki nosači		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 1			Listova: 14
				List: 1

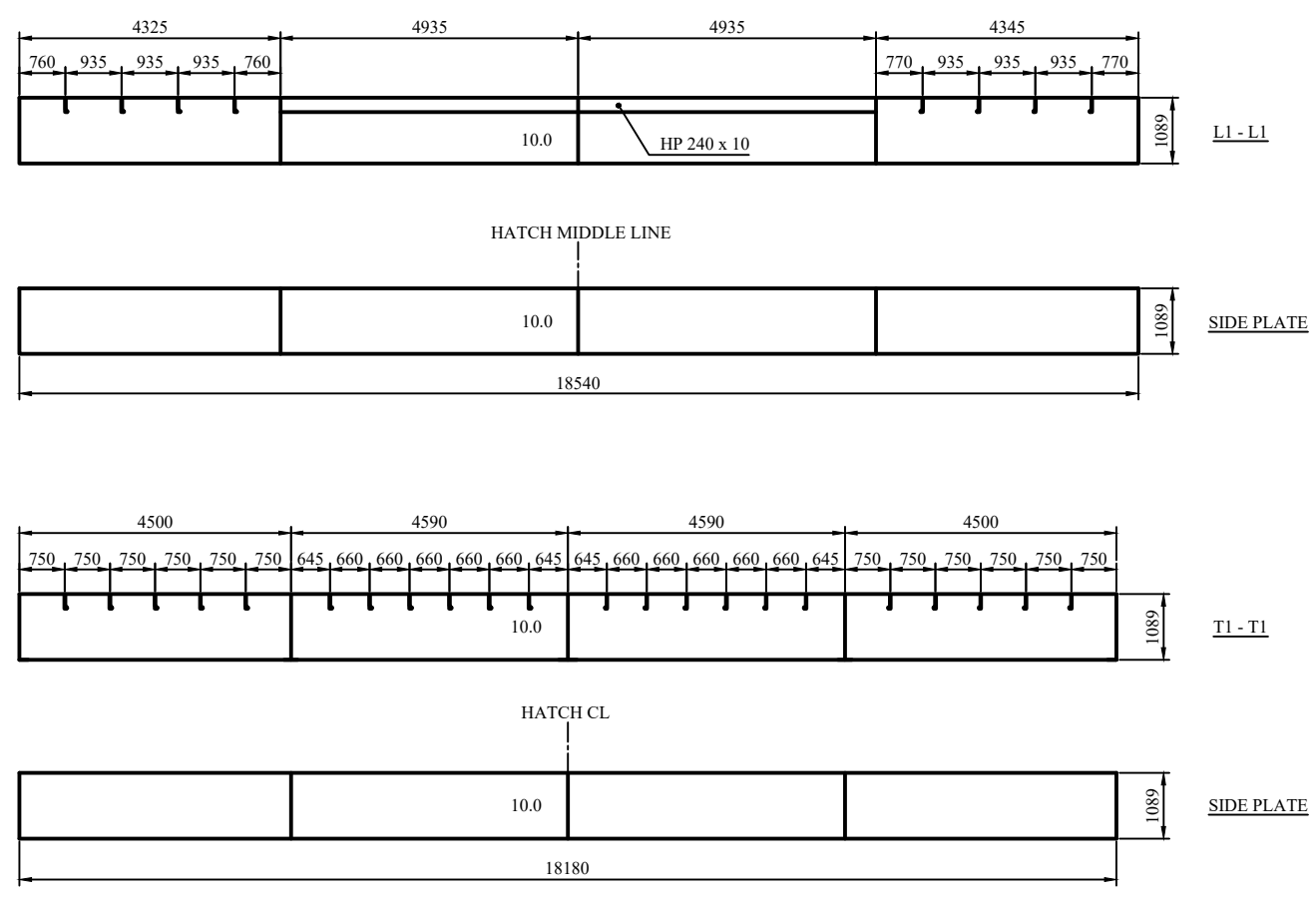
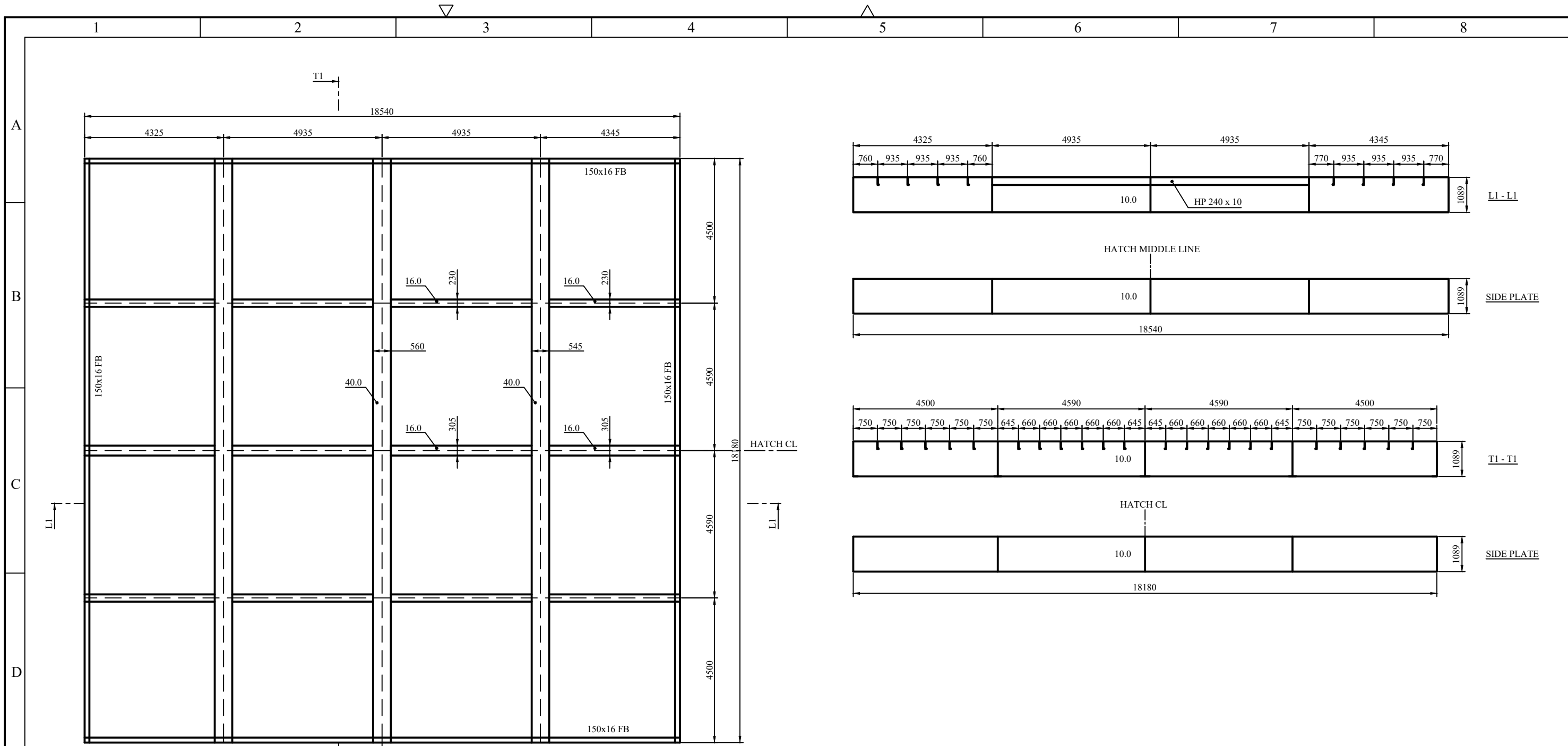




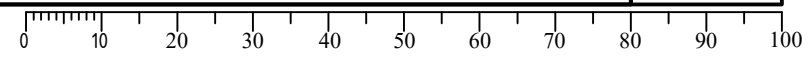
STIFFENERS:
HAT 300x220x6.0 AH36

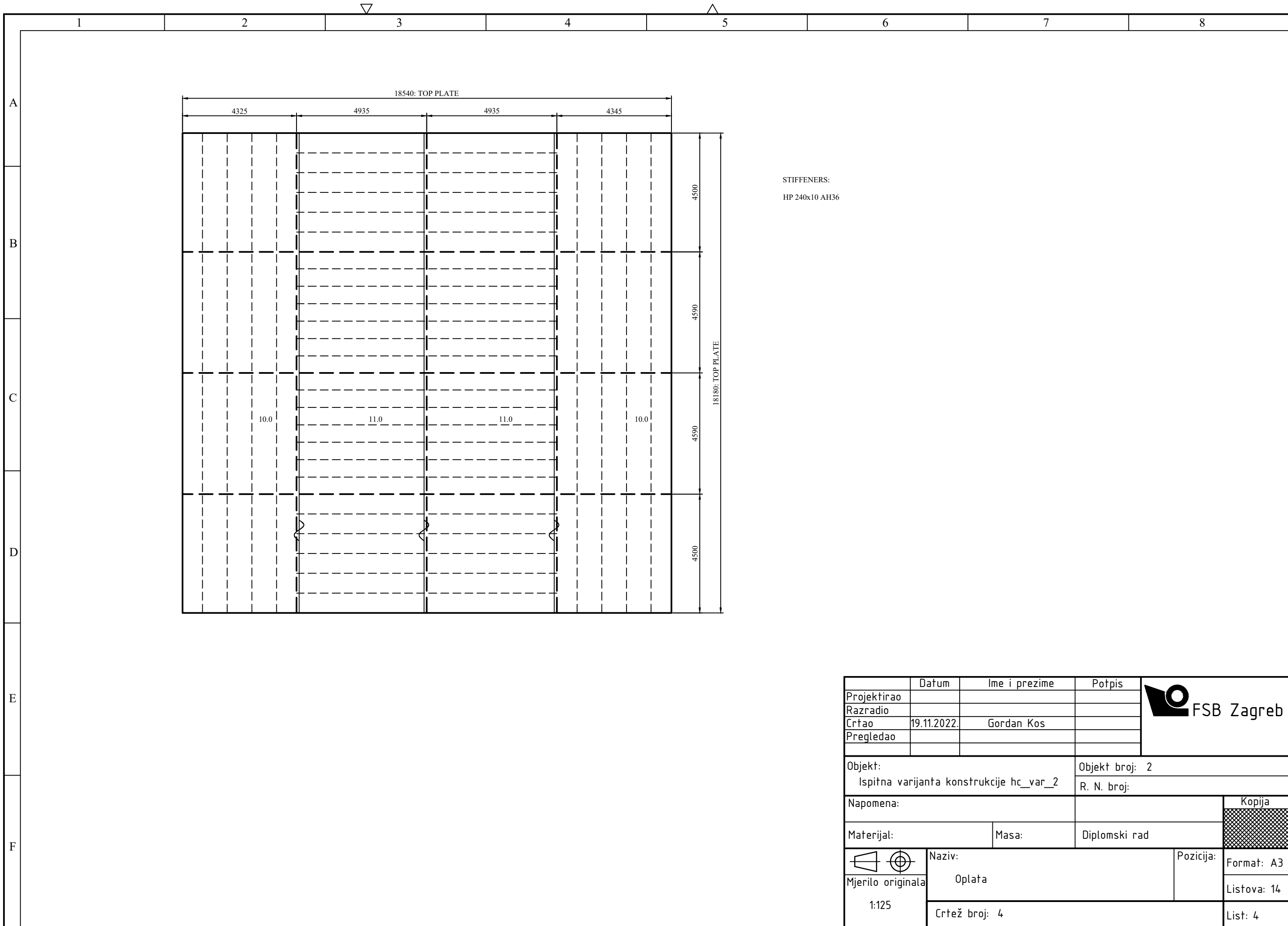
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao				
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_1			Objekt broj: 1	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
		Naziv: Oplata		Pozicija:
Mjerilo originala 1:125		Crtež broj: 2		Format: A3
				Listova: 14
				List: 2


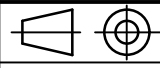


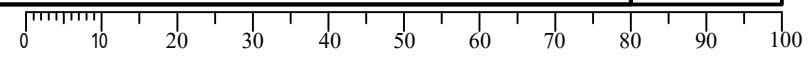


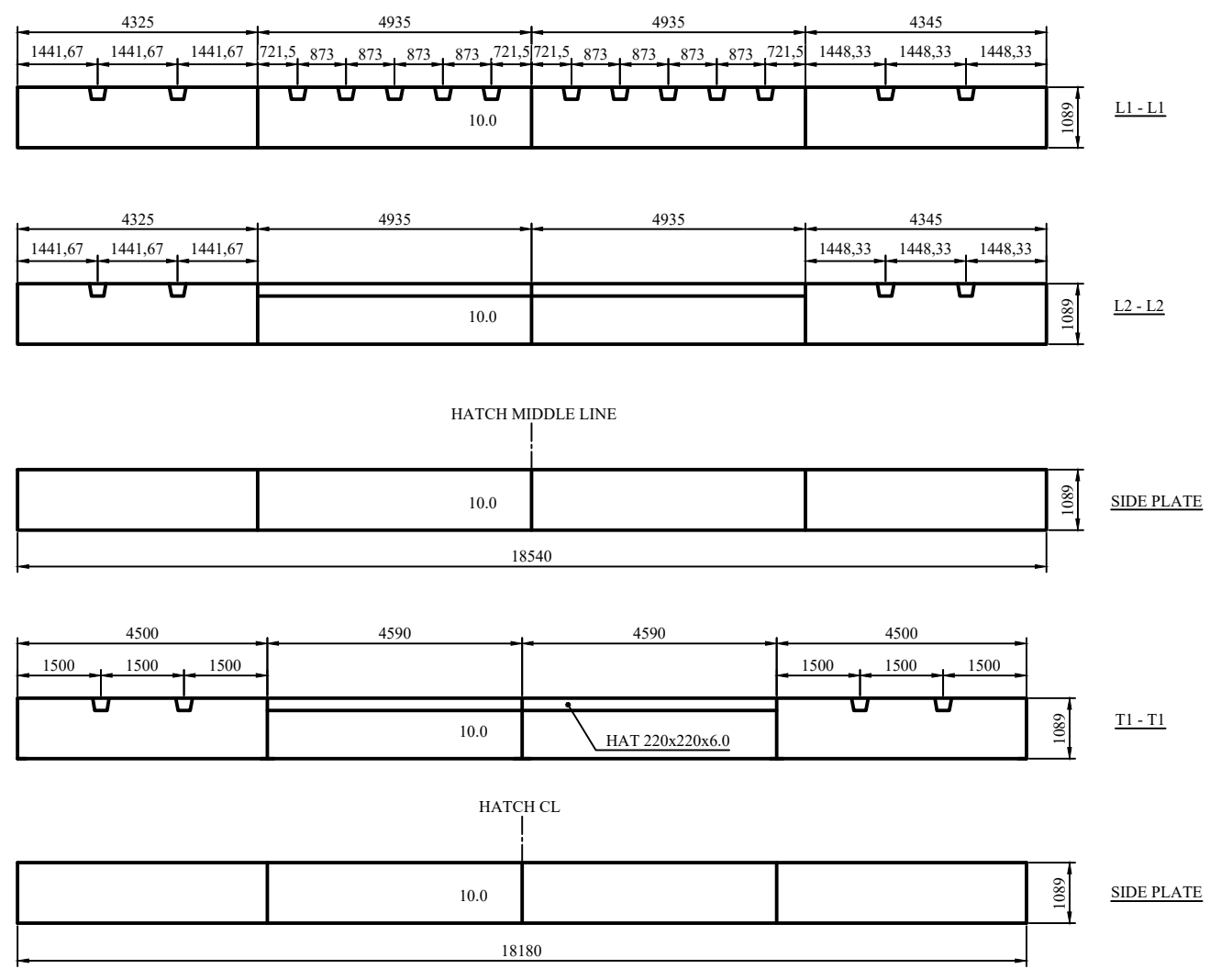
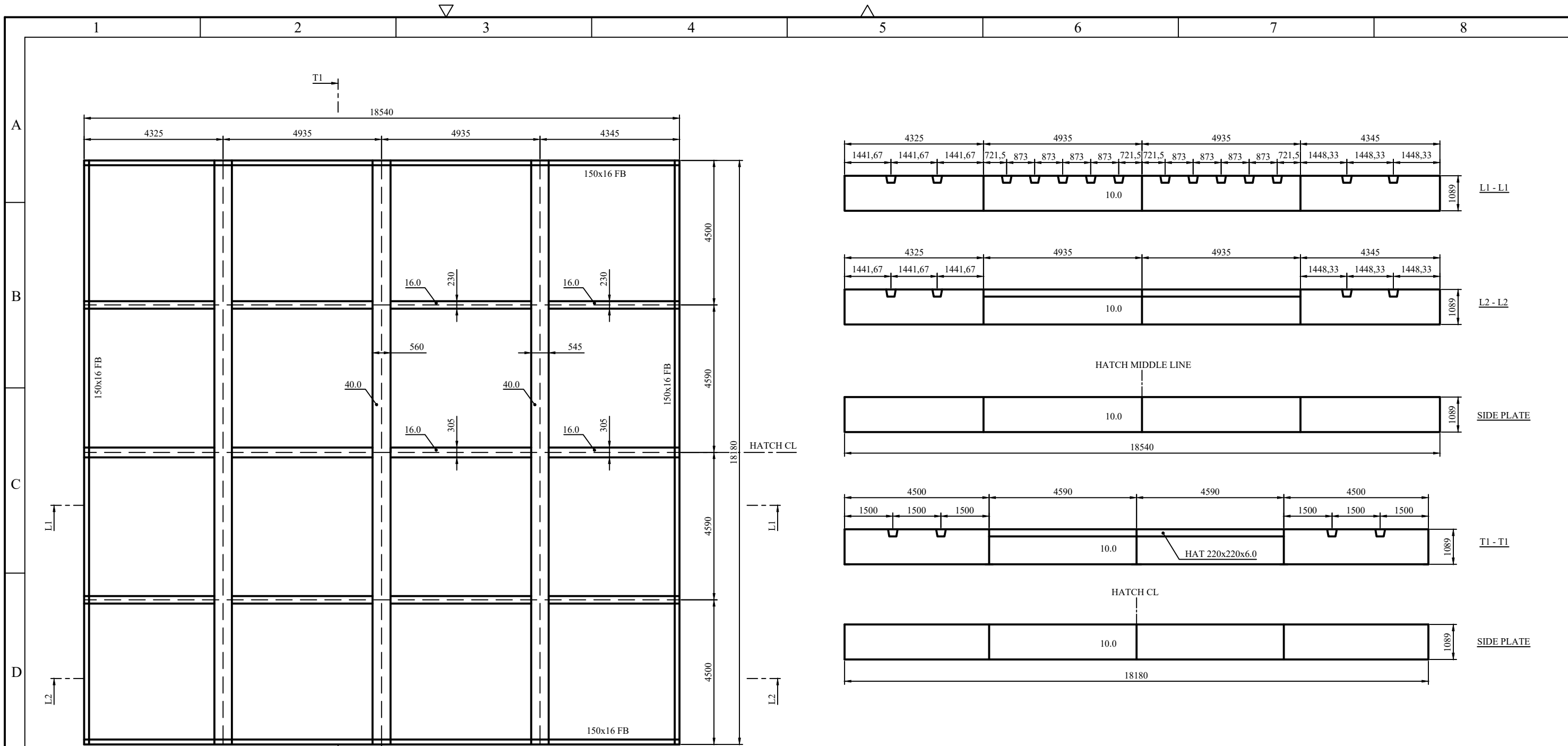
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2			Objekt broj: 2	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Jaki nosači		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 3			Listova: 14
				List: 3



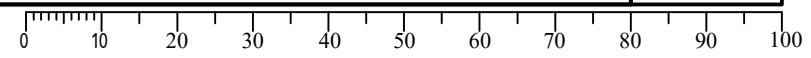


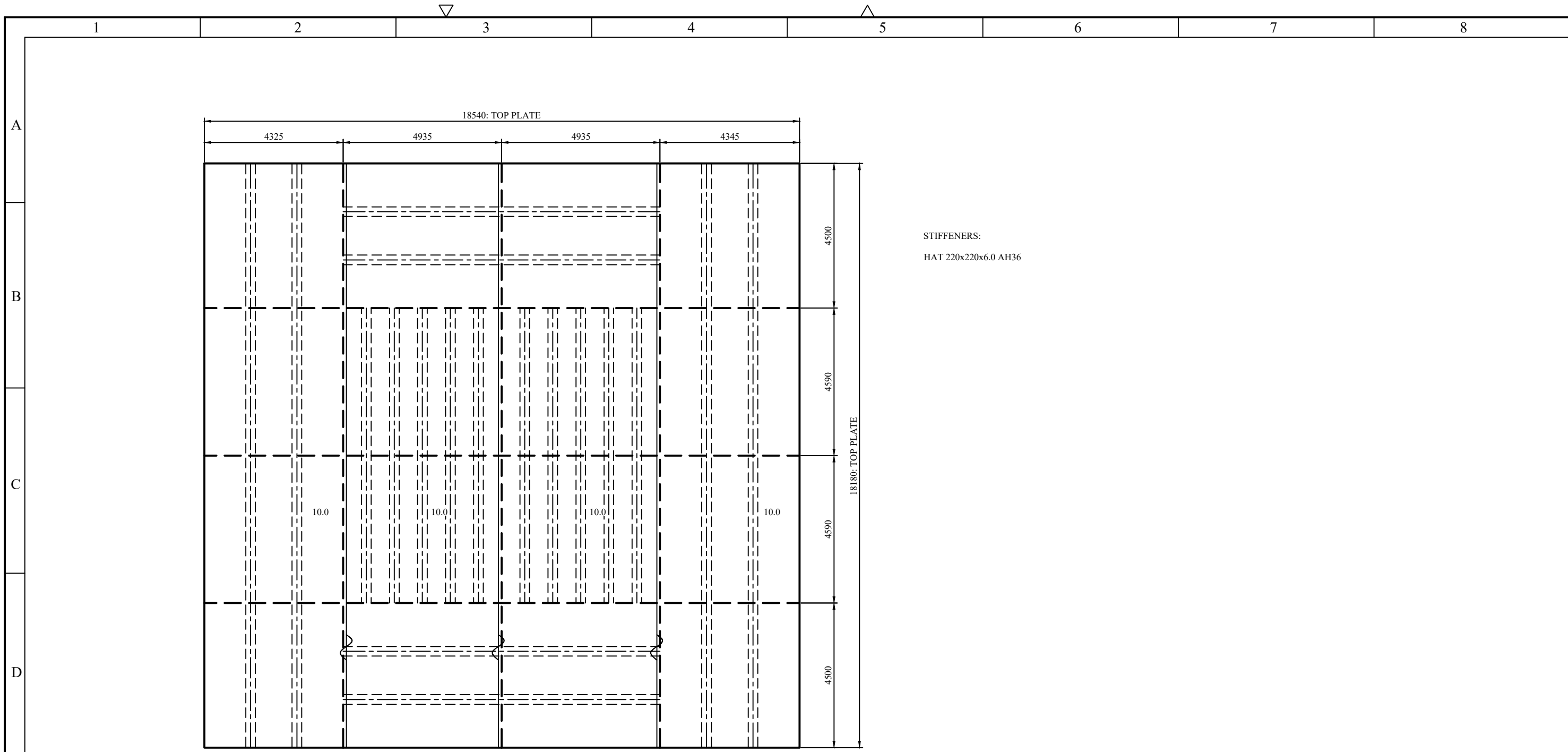
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_2			Objekt broj: 2	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Oplata		Pozicija:	Format: A3
			Crtež broj: 4	Listova: 14
				List: 4


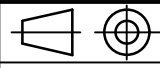


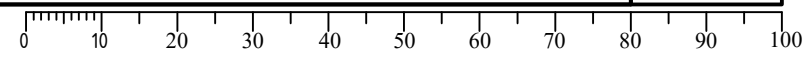


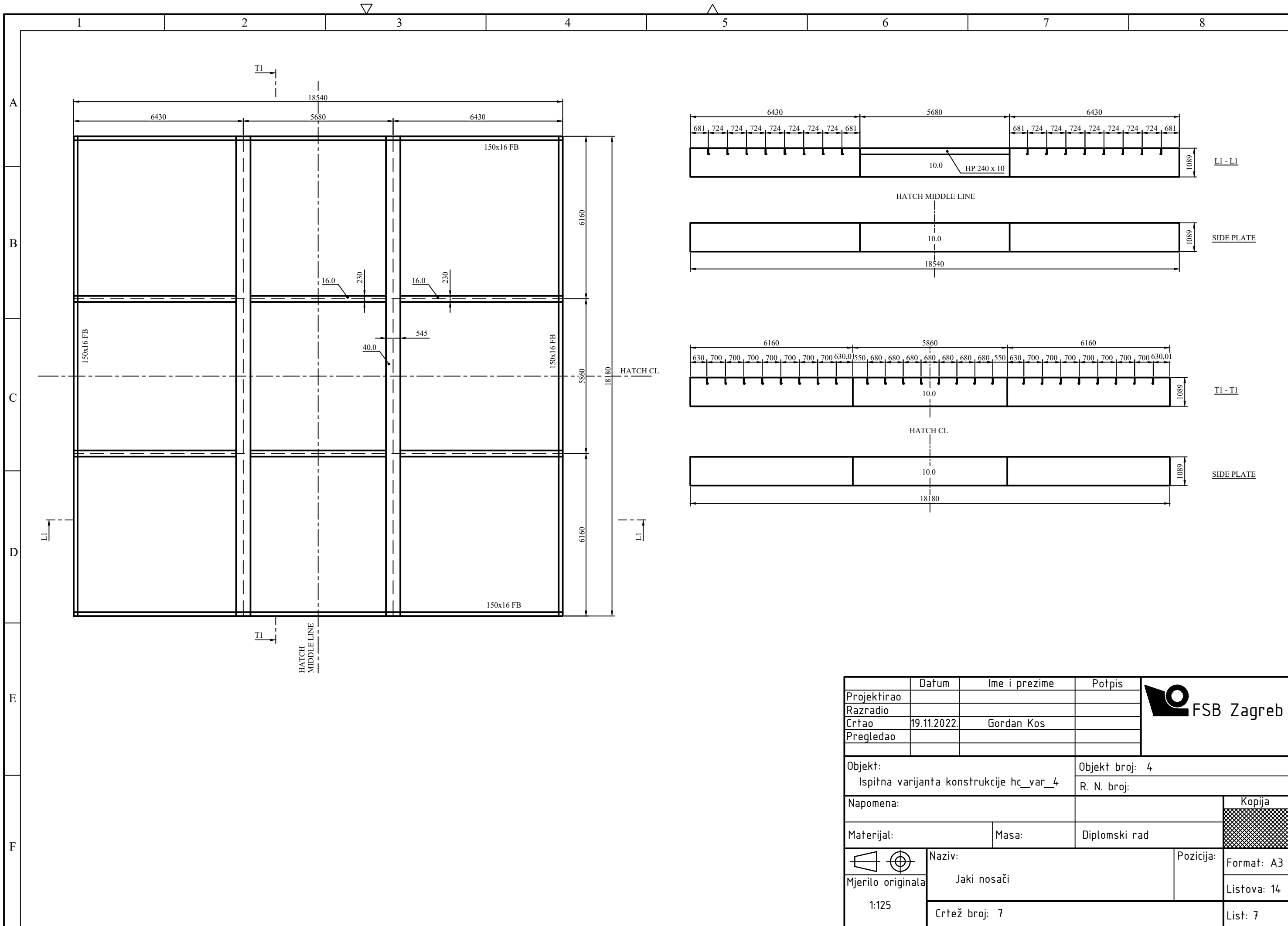
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3			Objekt broj: 3	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Jaki nosači		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 5			Listova: 14
				List: 5



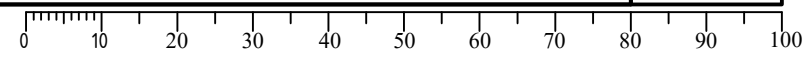


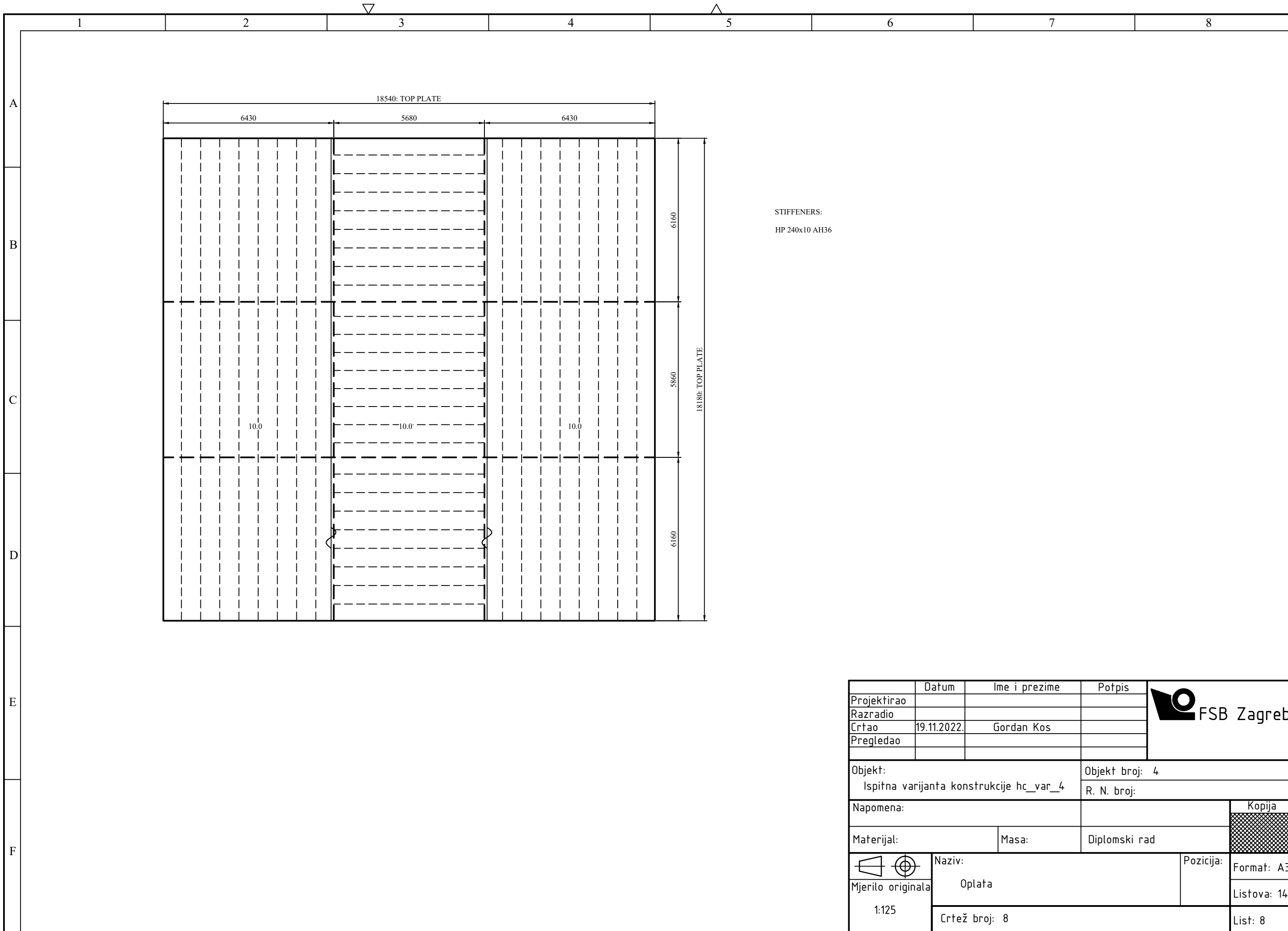
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_3			Objekt broj: 3	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Oplata		Pozicija:	Format: A3
			Crtež broj: 6	Listova: 14
				List: 6



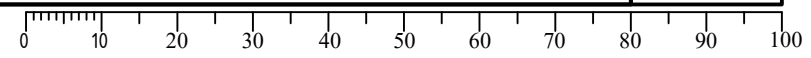


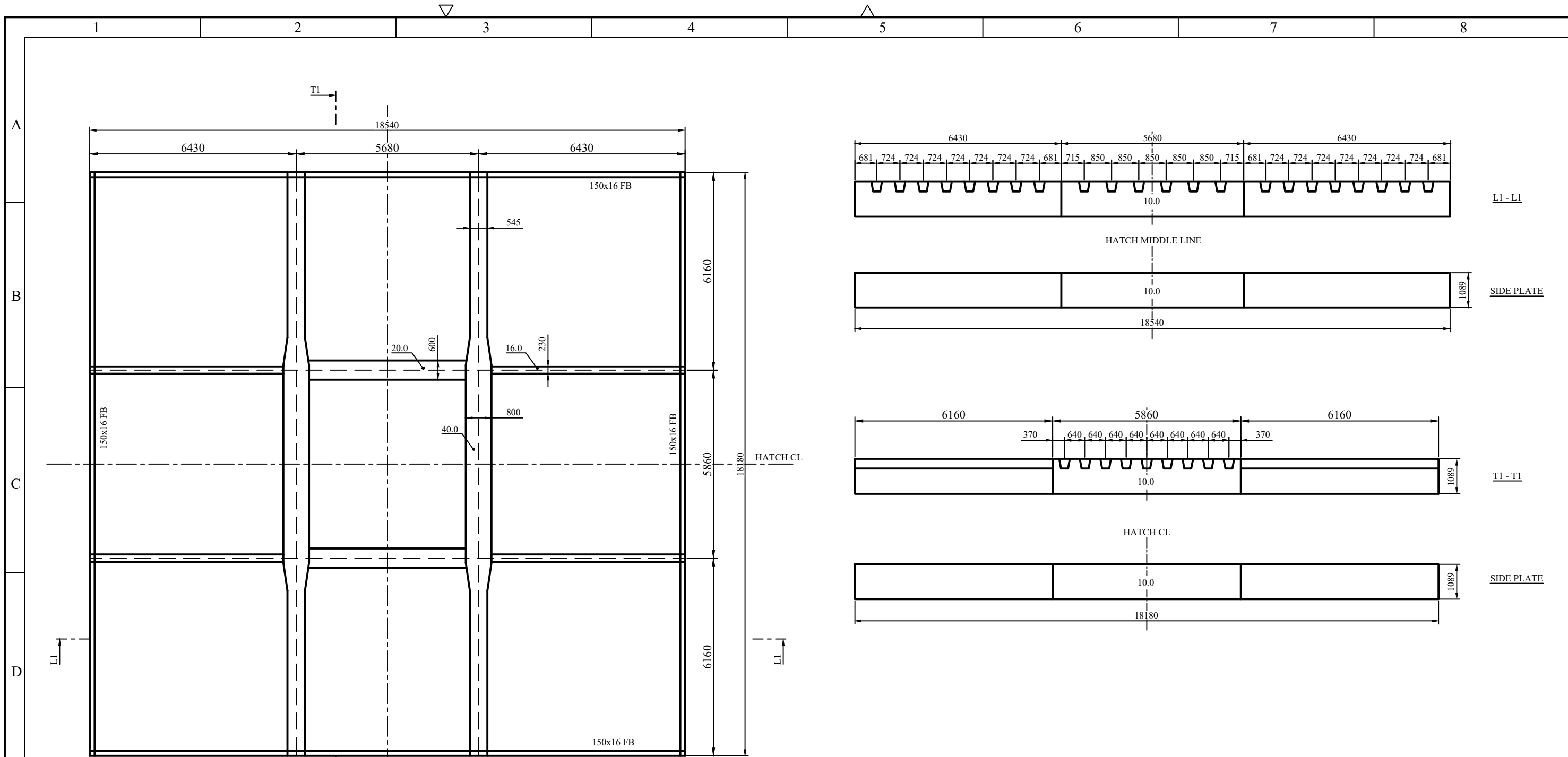
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao				
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4			Objekt broj: 4	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
Naziv: Mjerilo originala 1:125		Jaki nosači Crtež broj: 7		Kopija
			Pozicija:	Format: A3
				Listova: 14
				List: 7


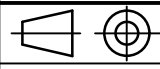


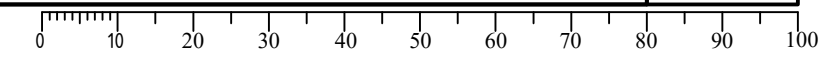


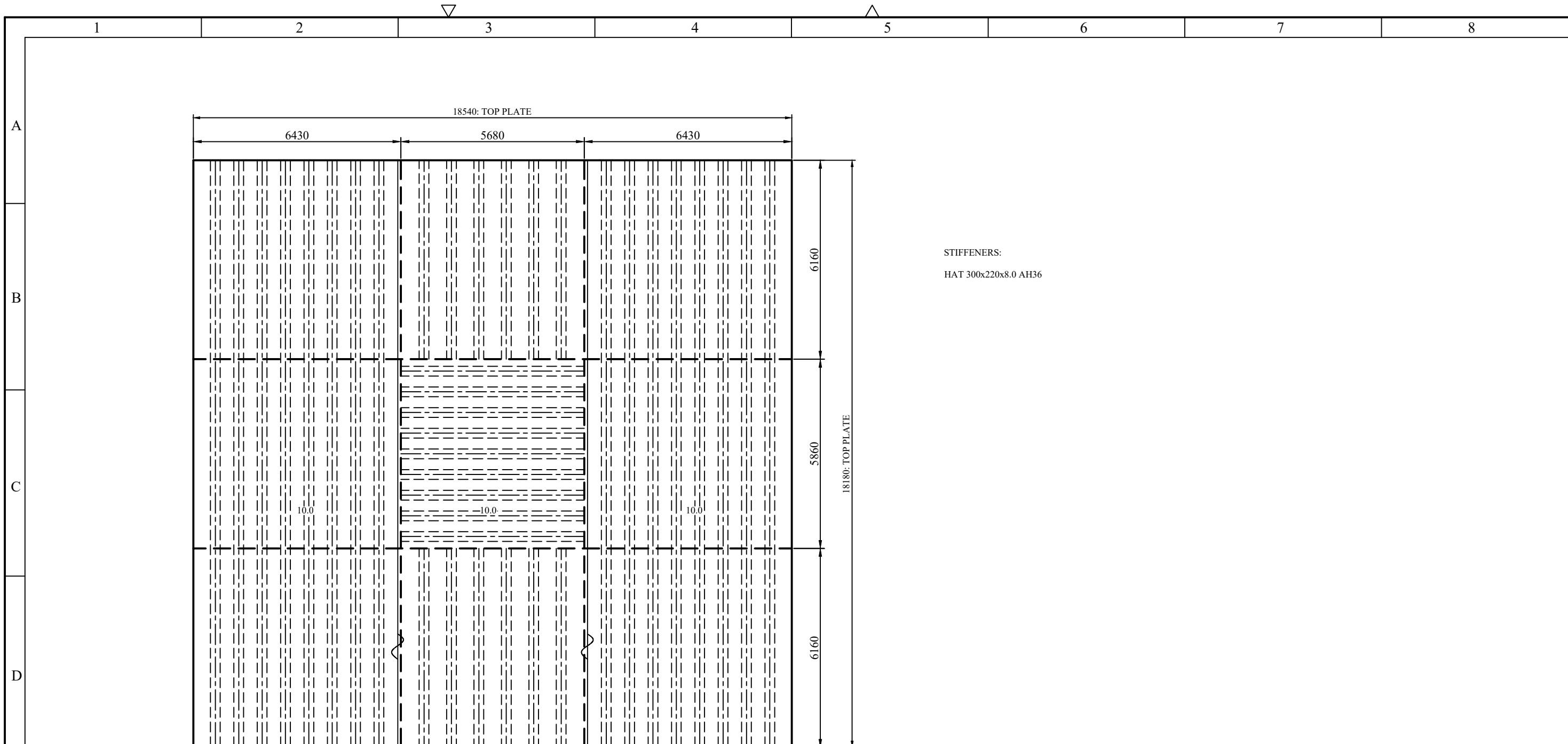
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_4			Objekt broj: 4	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
Mjerilo originala	Oplata			Listova: 14
1:125	Crtež broj: 8			List: 8





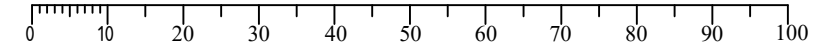
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5			Objekt broj: 5	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
		Naziv: Jaki nosači		Pozicija:
1:125		Crtež broj: 9		Format: A3
				Listova: 14
				List: 9

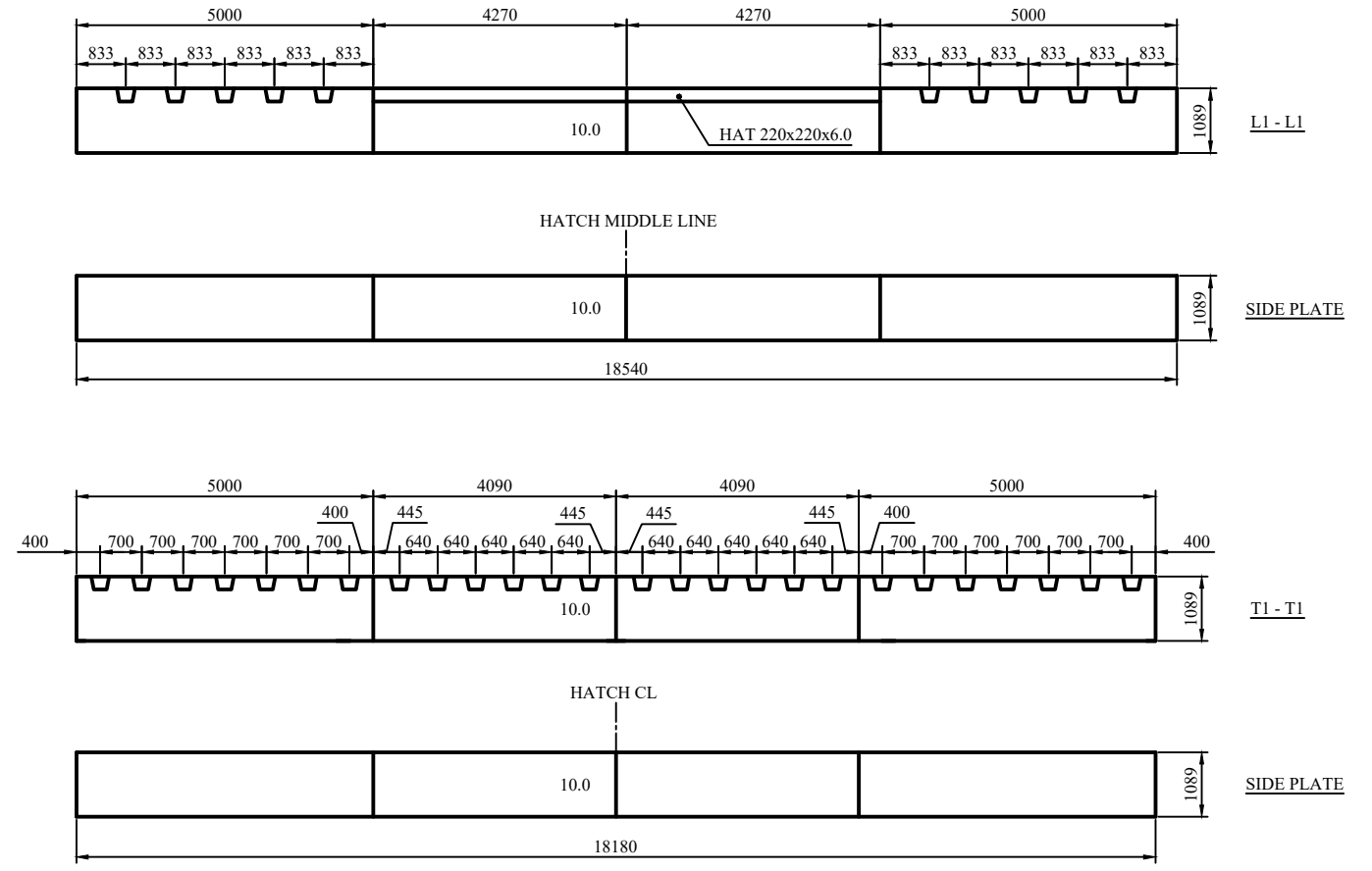
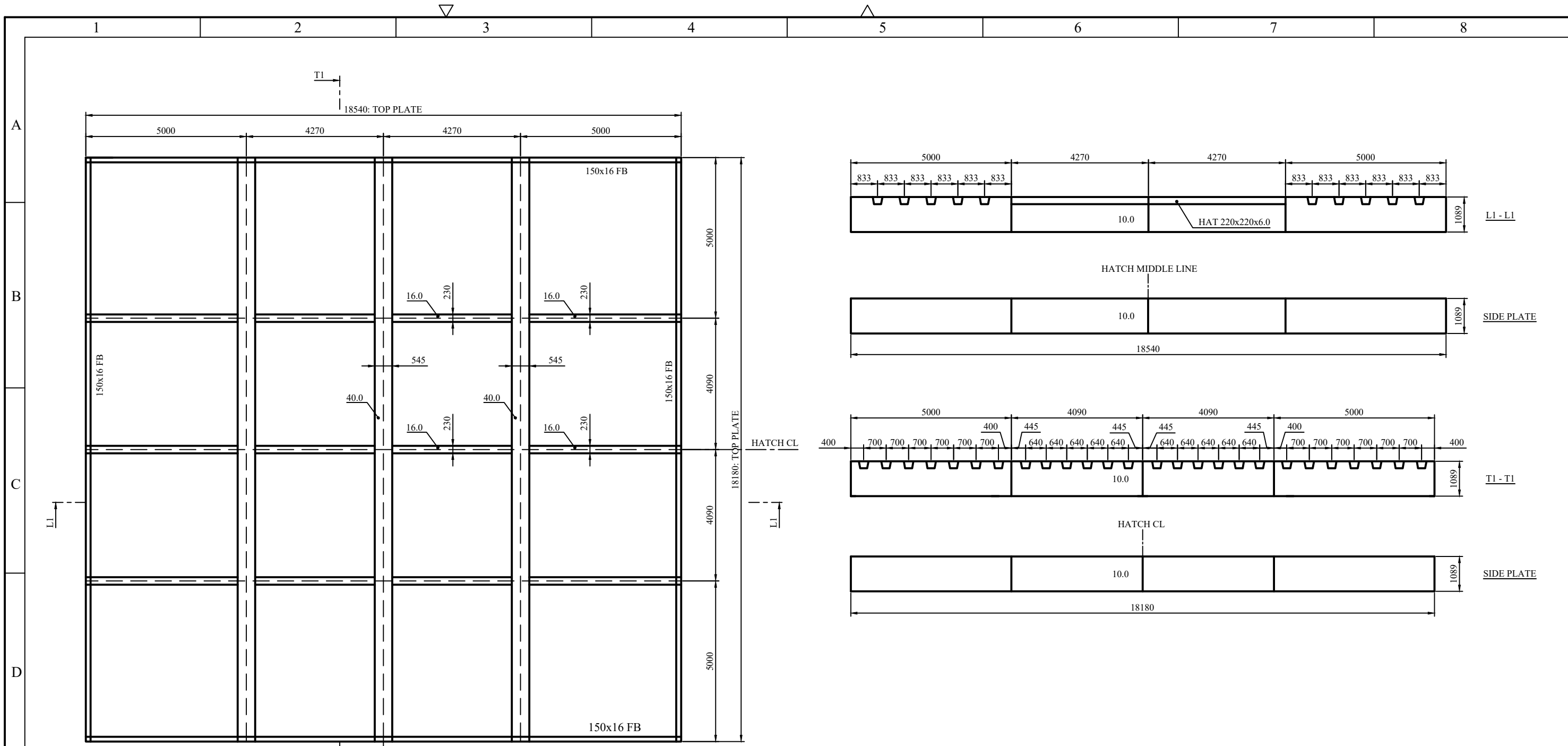



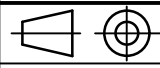


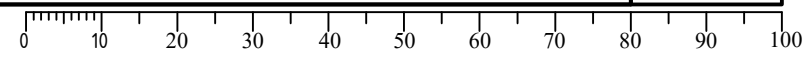
STIFFENERS:
HAT 300x220x8.0 AH36

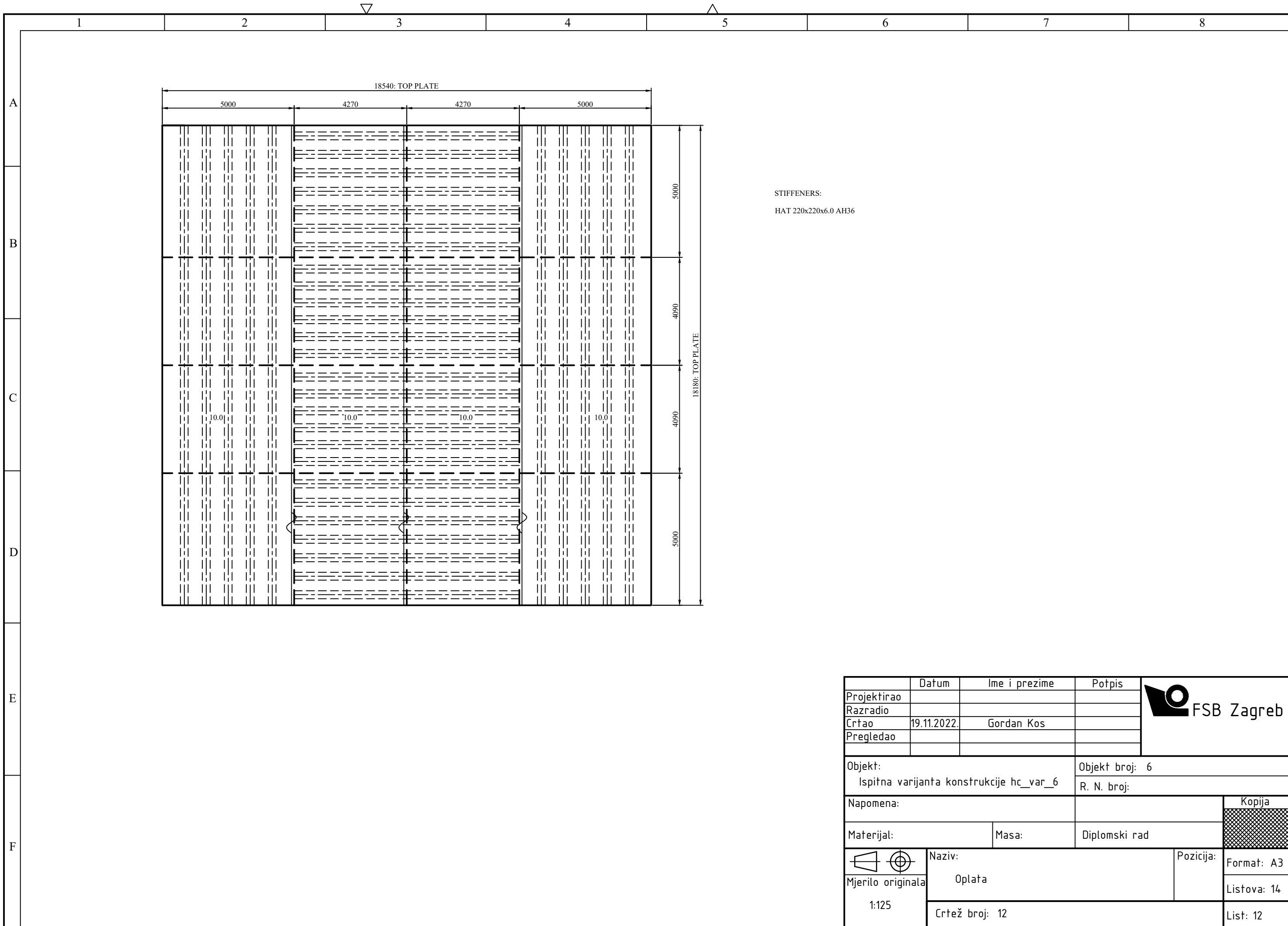
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao				
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_5			Objekt broj: 5	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Oplata		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 10			Listova: 14
				List: 10



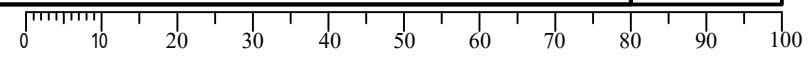


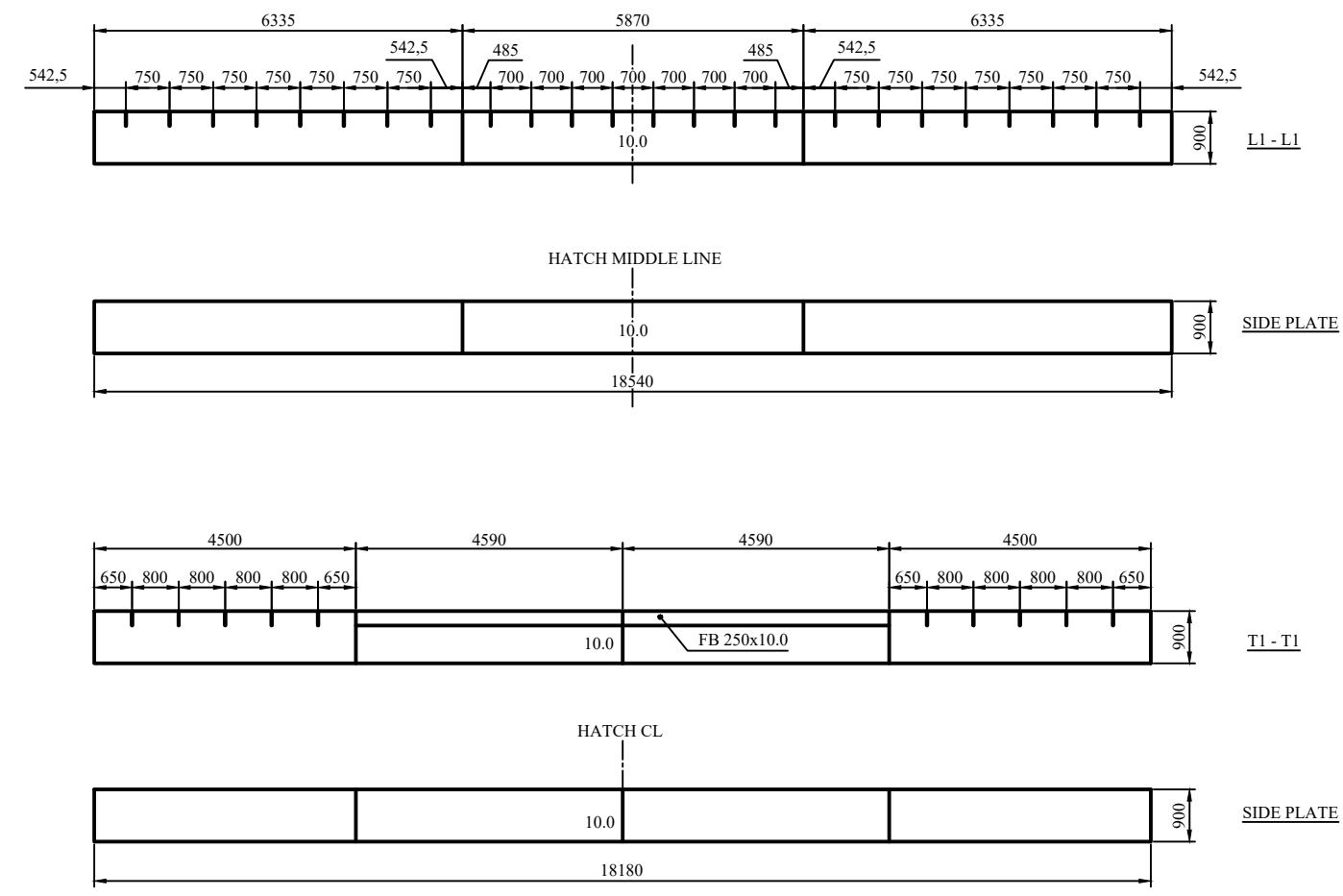
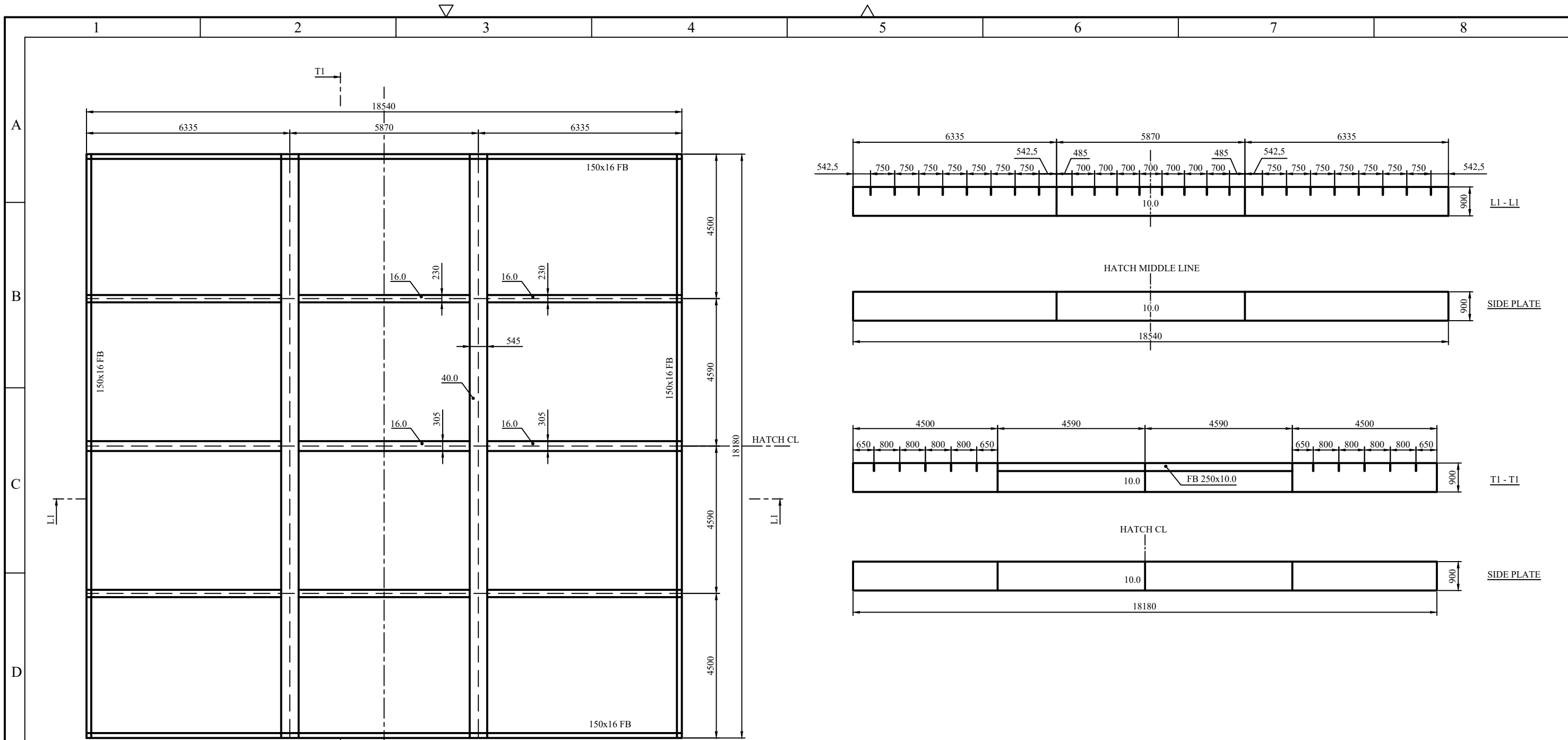
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6			Objekt broj: 6	
Napomena:			R. N. broj:	
Materijal:			Masa:	Diplomski rad
		Naziv: Jaki nosači		Pozicija:
Mjerilo originala 1:125		Crtež broj: 11		Format: A3
				Listova: 14
				List: 11



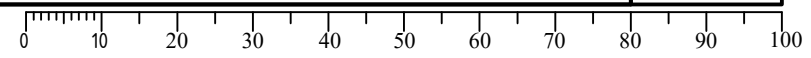


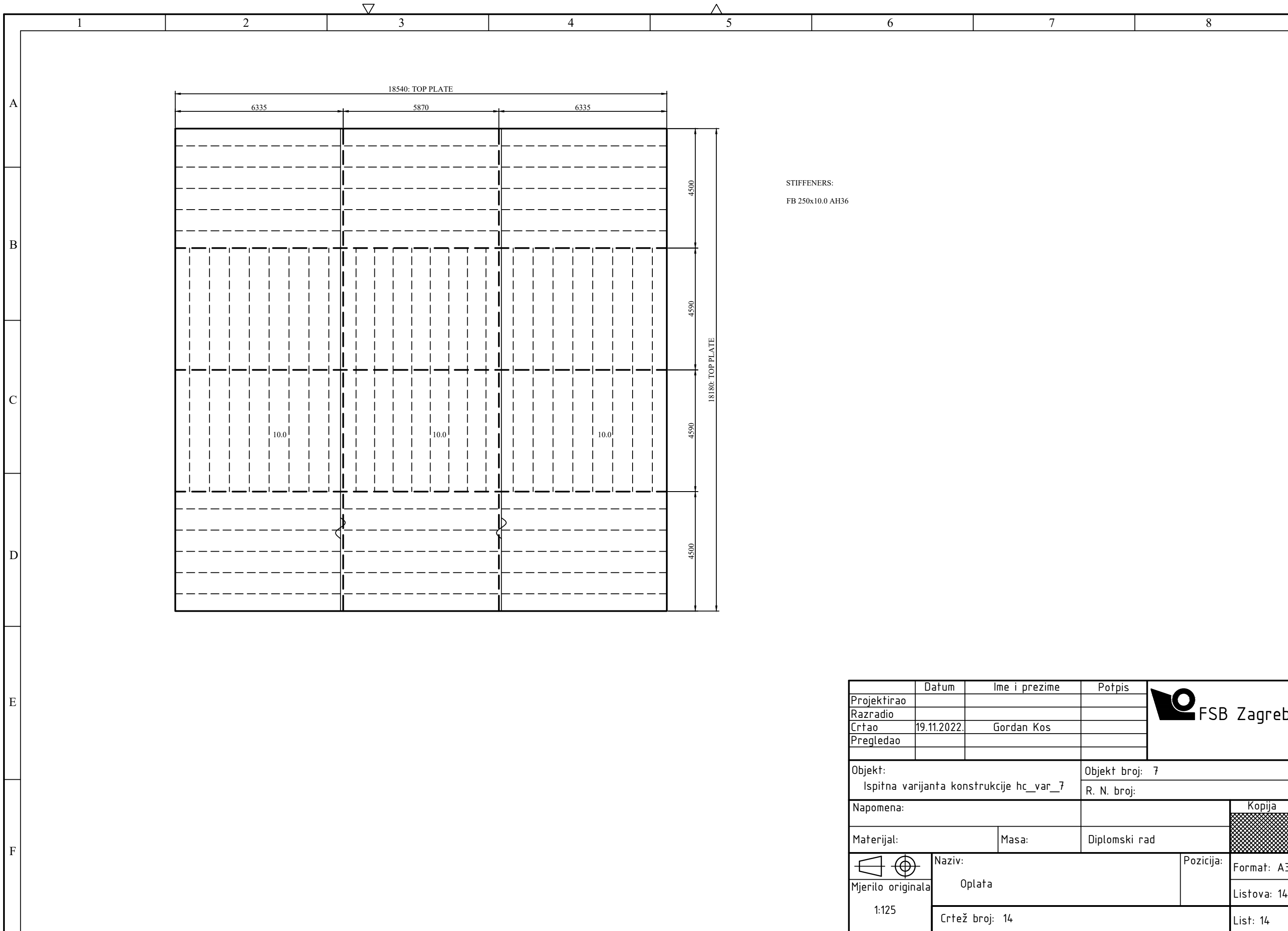
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_6			Objekt broj: 6	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Oplata		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 12			Listova: 14
			List: 12	



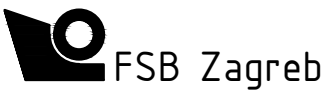
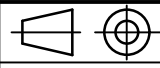


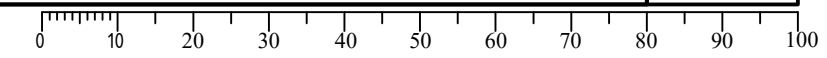
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7			Objekt broj: 7	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Jaki nosači		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 13			Listova: 14
				List: 13





STIFFENERS:
FB 250x10.0 AH36

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao				
Razradio				
Crtao	19.11.2022.	Gordan Kos		
Pregledao				
Objekt: Ispitna varijanta konstrukcije hc_var_7			Objekt broj: 7	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:	Diplomski rad	
 Mjerilo originala 1:125	Naziv: Oplata		Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: 14			Listova: 14
				List: 14



PRILOG IV

Programski kod modula grillage_mesher.py

```

1 """
2 University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
3 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering
4
5 Master's thesis project
6
7     Gordan Kos, univ.bacc.ing.nav.arch.
8     Dr.sc. Pero Prebeg, dipl.ing.
9
10 Module for grillage finite element mesh generation
11 Design Visualizer for Ship Grillage Design d3v-sgd
12
13 """
14 import itertools
15 from grillage.grillage_model import *
16 from femdir.custom_exceptions import *
17 from grillage.grillage_fem import GeoGrillageFEM
18
19
20 class MeshVariant(Enum):
21     V1 = 1
22     V2 = 2
23
24
25 class ModelCheck:
26     def __init__(self, grillage: Grillage):
27         """
28         Class for checking the grillage model for symmetry
29         and mesh generation feasibility.
30
31         Symmetry checks include:
32             Relative distances of symmetric primary supporting members.
33             Central primary supporting member position.
34             Plate property, stiffener layout and stiffener direction.
35             Beam property of segments.
36
37         :param grillage: Input grillage model.
38         """
39         self._grillage = grillage
40
41     def longitudinal_psm_symmetry(self):
42         """
43         :return: True if relative distances of longitudinal primary supporting
44                 members are symmetric.
45         """
46         test = False
47         for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
48             if member.rel_dist < 0.5:
49                 y1 = member.rel_dist
50                 y2 = member.symmetric_member.rel_dist
51                 test = np.isclose(y1, 1 - y2)
52                 if not test:
53                     break
54         return test
55
56     def transverse_psm_symmetry(self):
57         """
58         :return: True if relative distances of transverse primary supporting
59                 members are symmetric.
60         """

```

```

61     test = False
62     for member in self._grillage.transverse_members().values():
63         if member.rel_dist < 0.5:
64             x1 = member.rel_dist
65             x2 = member.symmetric_member.rel_dist
66             test = np.isclose(x1, 1 - x2)
67             if not test:
68                 break
69     return test
70
71     def central_longitudinal(self):
72         """
73         :return: True if central longitudinal primary supporting member exists
74                 and has relative distance coordinate 0.5
75         """
76         n_long = self._grillage.N_longitudinal
77         if np.mod(n_long, 2) != 0:
78             member_id = int(np.ceil(n_long / 2))
79             central_member = self._grillage.longitudinal_members()[member_id]
80             if np.isclose(central_member.rel_dist, 0.5):
81                 return True
82             else:
83                 return False
84         else:
85             return True
86
87     def central_transversal(self):
88         """
89         :return: True if central transverse primary supporting member exists
90                 and has relative distance coordinate 0.5
91         """
92         n_tran = self._grillage.N_transverse
93         if np.mod(n_tran, 2) != 0:
94             member_id = int(np.ceil(n_tran / 2))
95             central_member = self._grillage.transverse_members()[member_id]
96             if np.isclose(central_member.rel_dist, 0.5):
97                 return True
98             else:
99                 return False
100        else:
101            return True
102
103    def plate_zone_ID_array(self):
104        """
105        :return: 2D array of all plating zone IDs arranged to represent
106                relative placement of zones on the entire grillage model.
107        """
108        total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
109        total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
110        total_zones = total_rows * total_columns
111
112        id_list = np.arange(1, total_zones + 1, 1)
113        plating_zone_array = np.reshape(id_list, [total_rows, total_columns])
114        return plating_zone_array
115
116    def longitudinal_plate_symmetry(self):
117        """
118        :return: True if longitudinally symmetric plating zones have the same
119                plate property, stiffener layout and stiffener direction.
120        """

```

```

121     same_plate_prop = True
122     same_stiff_layout = True
123     same_stiff_dir = True
124
125     plate_ref_array = self.plate_zone_ID_array()
126     long_symm_ref_array = np.flip(plate_ref_array, axis=0)
127
128     row_limit = int(np.floor((self._grillage.N_longitudinal - 1) / 2))
129     column_limit = self._grillage.N_transverse - 1
130
131     for row in range(0, row_limit):
132         for column in range(0, column_limit):
133             plate_id = plate_ref_array[row, column]
134             symm_plate_id = long_symm_ref_array[row, column]
135             plate = self._grillage.plating()[plate_id]
136             symm_plate = self._grillage.plating()[symm_plate_id]
137
138             if plate.plate_prop is not symm_plate.plate_prop:
139                 same_plate_prop = False
140                 break
141
142             if plate.stiff_layout is not symm_plate.stiff_layout:
143                 same_stiff_layout = False
144                 break
145
146             if plate.stiff_dir is not symm_plate.stiff_dir:
147                 same_stiff_dir = False
148                 break
149
150     tests = [same_plate_prop, same_stiff_layout, same_stiff_dir]
151     if all(tests):
152         return True
153     else:
154         return False
155
156 def transverse_plate_symmetry(self):
157     """
158     :return: True if transversely symmetric plating zones have the same
159             plate property, stiffener layout and stiffener direction.
160     """
161     same_plate_prop = True
162     same_stiff_layout = True
163     same_stiff_dir = True
164
165     plate_ref_array = self.plate_zone_ID_array()
166     tran_symm_ref_array = np.flip(plate_ref_array, axis=1)
167
168     row_limit = self._grillage.N_longitudinal - 1
169     column_limit = int(np.floor((self._grillage.N_transverse - 1) / 2))
170
171     for row in range(0, row_limit):
172         for column in range(0, column_limit):
173             plate_id = plate_ref_array[row, column]
174             symm_plate_id = tran_symm_ref_array[row, column]
175             plate = self._grillage.plating()[plate_id]
176             symm_plate = self._grillage.plating()[symm_plate_id]
177
178             if plate.plate_prop is not symm_plate.plate_prop:
179                 same_plate_prop = False
180                 break

```

```

181
182         if plate.stiff_layout is not symm_plate.stiff_layout:
183             same_stiff_layout = False
184             break
185
186         if plate.stiff_dir is not symm_plate.stiff_dir:
187             same_stiff_dir = False
188             break
189
190     tests = [same_plate_prop, same_stiff_layout, same_stiff_dir]
191     if all(tests):
192         return True
193     else:
194         return False
195
196 def longitudinal_segment_symmetry(self):
197     """
198     :return: True if symmetric longitudinal segments have the same
199             beam property.
200     """
201     same_beam_prop = True
202
203     for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
204         if member.rel_dist < 0.5:
205             for segment_id in range(1, self._grillage.N_transverse):
206                 segment = member.segments[segment_id - 1]
207                 symm_seg = member.symmetric_member.segments[segment_id - 1]
208
209                 if segment.beam_prop is not symm_seg.beam_prop:
210                     same_beam_prop = False
211                     break
212     return same_beam_prop
213
214 def transverse_segment_symmetry(self):
215     """
216     :return: True if symmetric transverse segments have the same
217             beam property.
218     """
219     same_beam_prop = True
220
221     for member in self._grillage.transverse_members().values():
222         if member.rel_dist < 0.5:
223             for segment_id in range(1, self._grillage.N_longitudinal):
224                 segment = member.segments[segment_id - 1]
225                 symm_seg = member.symmetric_member.segments[segment_id - 1]
226
227                 if segment.beam_prop is not symm_seg.beam_prop:
228                     same_beam_prop = False
229                     break
230     return same_beam_prop
231
232 def long_symmetry_tests(self):
233     """
234     :return: True if model passes all longitudinal symmetry tests.
235     """
236     tests = [self.longitudinal_psm_symmetry(),
237             self.central_longitudinal(),
238             self.longitudinal_segment_symmetry(),
239             self.longitudinal_plate_symmetry()]
240     if all(tests):

```



```

241         return True
242     else:
243         return False
244
245     def tran_symmetry_tests(self):
246         """
247         :return: True if model passes all transverse symmetry tests.
248         """
249         tests = [self.transverse_psm_symmetry(),
250                 self.central_transversal(),
251                 self.transverse_segment_symmetry(),
252                 self.transverse_plate_symmetry()]
253         if all(tests):
254             return True
255         else:
256             return False
257
258     def assign_symmetry(self):
259         self._grillage.assign_symmetric_members()
260
261         if self.long_symmetry_tests() and self.tran_symmetry_tests():
262             return AOS.BOTH
263         elif self.long_symmetry_tests():
264             return AOS.LONGITUDINAL
265         elif self.tran_symmetry_tests():
266             return AOS.TRANSVERSE
267         else:
268             return AOS.NONE
269
270     def mesh_feasibility(self):
271         """
272         :return: Calls custom exception if input grillage model
273                 can not be meshed.
274
275         Method stops calculation of limits of grillage mesh generation if
276         grillage model does not meet the following criteria:
277         1.) Plating zones between two adjacent Primary Supporting Members
278             may not have the same stiffener orientation and different
279             stiffener spacing.
280         2.) Insert another impossibility here
281         """
282         # 1.)
283         # Between longitudinal primary supporting members:
284         for psm_id in range(1, self._grillage.N_longitudinal):
285             psm_1 = self._grillage.longitudinal_members()[psm_id]
286             psm_2 = self._grillage.longitudinal_members()[psm_id + 1]
287             plate_list = self._grillage.plating_zones_between_psm(psm_1, psm_2)
288             plate_combinations = itertools.combinations(plate_list, 2)
289
290             for plate in list(plate_combinations):
291                 plate1 = plate[0] # First plating zone of plate combinations
292                 plate2 = plate[1] # Second plating zone of plate combinations
293                 spacing1 = Plate.get_stiffener_spacing(plate1)
294                 spacing2 = Plate.get_stiffener_spacing(plate2)
295
296                 if plate1.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL and \
297                    plate2.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL and \
298                    spacing1 != spacing2:
299                     raise FeasibilityTestFailLong(psm_1.id, psm_2.id, plate1.id,
300                                                    plate2.id, spacing1, spacing2)

```

```

301
302     # Between transverse primary supporting members:
303     for psm_id in range(1, self._grillage.N_transverse):
304         psm_1 = self._grillage.transverse_members()[psm_id]
305         psm_2 = self._grillage.transverse_members()[psm_id + 1]
306         plate_list = self._grillage.plating_zones_between_psm(psm_1, psm_2)
307         plate_combinations = itertools.combinations(plate_list, 2)
308
309         for plate in list(plate_combinations):
310             plate1 = plate[0] # First plating zone of plate combinations
311             plate2 = plate[1] # Second plating zone of plate combinations
312             spacing1 = Plate.get_stiffener_spacing(plate1)
313             spacing2 = Plate.get_stiffener_spacing(plate2)
314
315             if plate1.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE and \
316                plate2.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE and \
317                spacing1 != spacing2:
318                 raise FeasibilityTestFailTran(psm_1.id, psm_2.id, plate1.id,
319                                                plate2.id, spacing1, spacing2)
320
321     @staticmethod
322     def symmetry_override_check(discovered: AOS, override: AOS):
323         """
324         Method checks if grillage model is actually symmetric about the chosen
325         Axis of Symmetry override, based on automatically discovered AOS.
326         :return: Raises InvalidAxisOfSymmOverride custom exception.
327         """
328         if discovered is AOS.NONE:
329             invalid_overrides = [AOS.LONGITUDINAL, AOS.TRANSVERSE, AOS.BOTH]
330             if override in invalid_overrides:
331                 raise InvalidAxisOfSymmOverride(discovered, override)
332
333         elif discovered is AOS.LONGITUDINAL:
334             invalid_overrides = [AOS.TRANSVERSE, AOS.BOTH]
335             if override in invalid_overrides:
336                 raise InvalidAxisOfSymmOverride(discovered, override)
337
338         elif discovered is AOS.TRANSVERSE:
339             invalid_overrides = [AOS.LONGITUDINAL, AOS.BOTH]
340             if override in invalid_overrides:
341                 raise InvalidAxisOfSymmOverride(discovered, override)
342
343     @staticmethod
344     def mesh_V2_tr_check(plate_edge_nodes, flange_edge_nodes):
345         """
346         Method checks transition row feasibility based on segment web finite
347         element dimensions at the top and bottom row of elements.
348
349         :param plate_edge_nodes: Distances between plate nodes.
350         :param flange_edge_nodes: Distances between flange nodes.
351         :return: Calls custom exception if grillage model can not be meshed using
352         MeshVariantV2 because the input mesh control parameters result in a
353         finite element mesh with elements that are too small.
354         """
355         p1_end1 = plate_edge_nodes[1]
356         p2_end1 = plate_edge_nodes[2]
357         p_end1_total = p1_end1 + p2_end1
358
359         p1_end2 = plate_edge_nodes[len(plate_edge_nodes)]
360         p2_end2 = plate_edge_nodes[len(plate_edge_nodes) - 1]

```

```

361     p_end2_total = p1_end2 + p2_end2
362
363     f1_end1 = flange_edge_nodes[1]
364     f1_end2 = flange_edge_nodes[len(flange_edge_nodes)]
365
366     if f1_end1 > p_end1_total:
367         raise MeshV2FeasibilityFail(p_end1_total, f1_end1)
368
369     if f1_end2 > p_end2_total:
370         raise MeshV2FeasibilityFail(p_end2_total, f1_end2)
371
372     if len(plate_edge_nodes) > 6:
373         p3_end1 = plate_edge_nodes[3]
374         p3_end2 = plate_edge_nodes[len(plate_edge_nodes) - 2]
375         f2_end1 = flange_edge_nodes[2]
376         f2_end2 = flange_edge_nodes[len(flange_edge_nodes) - 1]
377
378         p_end1_total = p1_end1 + p2_end1 + p3_end1
379         p_end2_total = p1_end2 + p2_end2 + p3_end2
380
381         if np.isclose(f1_end1 + f2_end1, p_end1_total):
382             raise MeshV2FeasibilityFailGeneric()
383
384         if np.isclose(f1_end2 + f2_end2, p_end2_total):
385             raise MeshV2FeasibilityFailGeneric()
386
387     def same_flange_width_test(self):
388         """
389         Method checks if Primary Supporting Members have different flange width
390         on their segments. Raises a custom exception for MeshVariantV1.
391         """
392         for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
393             bf_set = set()
394             for segment in member.segments:
395                 beam_type = segment.beam_prop.beam_type
396                 if beam_type is BeamType.T or beam_type is BeamType.L:
397                     bf = segment.beam_prop.bf
398                     bf_set.add(bf)
399                 if beam_type is BeamType.FB:
400                     bf_set.add(0)
401             if len(bf_set) > 1:
402                 raise DifferentFlangeWidth(member.id, member.direction.name)
403
404         for member in self._grillage.transverse_members().values():
405             bf_set = set()
406             for segment in member.segments:
407                 beam_type = segment.beam_prop.beam_type
408                 if beam_type is BeamType.T or beam_type is BeamType.L:
409                     bf = segment.beam_prop.bf
410                     bf_set.add(bf)
411                 if beam_type is BeamType.FB:
412                     bf_set.add(0)
413             if len(bf_set) > 1:
414                 raise DifferentFlangeWidth(member.id, member.direction.name)
415
416
417     class MeshExtent:
418         def __init__(self, grillage: Grillage, axis_of_symm_override):
419             """
420             Class for calculating FE mesh extents for the selected grillage model

```

```

421     and Axis of Symmetry. Contains dictionaries of all plating zones and
422     segments to be fully or partially meshed. Generates GeoFEM materials,
423     plate and beam properties based on identified mesh extents.
424
425     :param grillage: Input grillage model.
426     :param axis_of_symm_override: overrides automatic Axis of Symmetry discovery.
427
428     Class contains the following data:
429
430     plating_zones_ref_array - 2D array of plating zone IDs to be meshed,
431                             based on Axis of Symmetry selection (AOS)
432     all_plating_zones - All plating zones included in mesh generation
433     full_plate_zones - Plating zones to be fully meshed
434     long_half_plate_zones - Plating zones to be split with a longitudinal
435                             axis of symmetry
436     tran_half_plate_zones - Plating zones to be split with a transverse AOS
437     quarter_plate_zone - Plating zone to be split with both AOS
438     long_e_split_zone - Plating zones with longitudinal axis of symmetry
439                       passing between stiffeners
440     tran_e_split_zone - Plating zones with transverse axis of symmetry
441                       passing between stiffeners
442
443     all_segments - All segments included in mesh generation.
444     full_segments - Segments to be fully meshed
445     half_segments - Segments split in half by some axis of symmetry
446     """
447     self._grillage = grillage
448     self.model_check = ModelCheck(self._grillage)
449     self._axis_of_symm_override = axis_of_symm_override
450     self._aos_input = self.model_check.assign_symmetry()
451
452     self.plating_zones_ref_array = []
453     self.all_plating_zones = {}
454     self.full_plate_zones = {}
455     self.long_half_plate_zones = {}
456     self.tran_half_plate_zones = {}
457     self.quarter_plate_zone = {}
458     self.long_e_split_zone = {}
459     self.tran_e_split_zone = {}
460
461     self._all_segment_count = 0
462     self.all_segments = {}
463     self.full_segments = {}
464     self.half_segments = {}
465
466     @property
467     def grillage(self):
468         return self._grillage
469
470     @property
471     def axis_of_symm_override(self):
472         return self._axis_of_symm_override
473
474     @property
475     def aos_input(self):
476         return self._aos_input
477
478     @property
479     def axis_of_symm(self):
480         if self._axis_of_symm_override:

```

```

481         return self._axis_of_symm_override
482     else:
483         return self._aos_input
484
485     def hc_plate_zone_ref_ID_array(self):
486         """
487         :return: 2D array of all plating zone IDs arranged to represent
488                 relative placement of zones on the entire grillage model.
489
490         total_rows - Total number of plating zone rows on the grillage model
491         total_columns - Total number of plating zone columns on the model
492         """
493         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
494         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
495         total_zones = total_rows * total_columns
496
497         id_list = np.arange(1, total_zones + 1, 1)
498         plating_zone_array = np.reshape(id_list, [total_rows, total_columns])
499         return plating_zone_array
500
501     def longitudinal_psm_extent(self):
502         """
503         :return: Dictionary of longitudinal primary supporting members to be
504                 considered for mesh generation, based on input Axis of Symmetry.
505         """
506         longitudinals = {}
507
508         if self.axis_of_symm is AOS.LONGITUDINAL or self.axis_of_symm is AOS.BOTH:
509             n_long = int(np.ceil(self._grillage.N_longitudinal / 2))
510             for i in range(1, n_long + 1):
511                 longitudinals[i] = self._grillage.longitudinal_members()[i]
512             return longitudinals
513         else:
514             return self._grillage.longitudinal_members()
515
516     def transverse_psm_extent(self):
517         """
518         :return: Dictionary of transverse primary supporting members to be
519                 considered for mesh generation, based on input Axis of Symmetry.
520         """
521         transversals = {}
522
523         if self.axis_of_symm is AOS.TRANSVERSE or self.axis_of_symm is AOS.BOTH:
524             n_tran = int(np.ceil(self._grillage.N_transverse / 2))
525             for i in range(1, n_tran + 1):
526                 transversals[i] = self._grillage.transverse_members()[i]
527             return transversals
528         else:
529             return self._grillage.transverse_members()
530
531     def identify_long_full_segments(self):
532         """
533         :return: Identifies Segment objects for full mesh generation; grillage
534                 with a longitudinal axis of symmetry.
535                 Stores identified segments in full_segments dictionary.
536
537         n_tran_segments - Number of transverse segmenets to be fully meshed
538         """
539         n_long = self._grillage.N_longitudinal
540         n_tran = self._grillage.N_transverse

```

```

541     n = 1
542     for member in self.longitudinal_psm_extent().values():
543         for segment_id in range(0, n_tran - 1):
544             self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
545             self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
546             n += 1
547
548     n_tran_segments = int(np.floor((n_long - 1) / 2))
549     for member in self._grillage.transverse_members().values():
550         for segment_id in range(0, n_tran_segments):
551             self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
552             self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
553             n += 1
554
555     def identify_tran_full_segments(self):
556         """
557         :return: Identifies Segment objects for full mesh generation; grillage
558                 with a transverse axis of symmetry.
559                 Stores identified segments in full_segments dictionary.
560
561         n_long_segments - Number of longitudinal segments to be fully meshed
562         """
563         n_long = self._grillage.N_longitudinal
564         n_tran = self._grillage.N_transverse
565         n = 1
566         n_long_segments = int(np.floor((n_tran - 1) / 2))
567         for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
568             for segment_id in range(0, n_long_segments):
569                 self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
570                 self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
571                 n += 1
572
573         for member in self.transverse_psm_extent().values():
574             for segment_id in range(0, n_long - 1):
575                 self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
576                 self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
577                 n += 1
578
579     def identify_both_full_segments(self):
580         """
581         :return: Identifies Segment objects for full mesh generation; grillage
582                 with both axis of symmetry.
583                 Stores identified segments in full_segments dictionary.
584
585         n_long_segments - Number of longitudinal segments to be fully meshed
586         n_tran_segments - Number of transverse segmenets to be fully meshed
587         """
588         n_long = self._grillage.N_longitudinal
589         n_tran = self._grillage.N_transverse
590
591         n = 1
592         n_long_segments = int(np.floor((n_tran - 1) / 2))
593         for member in self.longitudinal_psm_extent().values():
594             for segment_id in range(0, n_long_segments):
595                 self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
596                 self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
597                 n += 1
598
599         n_tran_segments = int(np.floor((n_long - 1) / 2))
600         for member in self.transverse_psm_extent().values():

```

```

601         for segment_id in range(0, n_tran_segments):
602             self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
603             self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
604             n += 1
605
606     def identify_none_full_segments(self):
607         """
608         :return: Identifies Segment objects for full mesh generation;
609                 grillage with no axis of symmetry.
610                 Stores identified segments in full_segments dictionary.
611         """
612         n_long = self._grillage.N_longitudinal
613         n_tran = self._grillage.N_transverse
614
615         n = 1
616         for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
617             for segment_id in range(0, n_tran - 1):
618                 self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
619                 self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
620                 n += 1
621
622         for member in self._grillage.transverse_members().values():
623             for segment_id in range(0, n_long - 1):
624                 self.full_segments[n] = member.segments[segment_id]
625                 self.add_to_all_segments(member.segments[segment_id])
626                 n += 1
627
628     def identify_long_half_segments(self):
629         """
630         :return: Identifies Segment objects for half mesh generation;
631                 grillage with a longitudinal axis of symmetry. Center transverse
632                 segment exists for even number of longitudinal members.
633                 Stores identified segments in half_segments dictionary.
634         """
635         n_long = self._grillage.N_longitudinal
636         middle_segment_ID = int(np.ceil((n_long - 1) / 2))
637         n = 1
638
639         if np.mod(n_long, 2) == 0:
640             for member in self._grillage.transverse_members().values():
641                 self.half_segments[n] = member.segments[middle_segment_ID - 1]
642                 self.add_to_all_segments(member.segments[middle_segment_ID - 1])
643
644                 n += 1
645
646     def identify_tran_half_segments(self):
647         """
648         :return: Identifies Segment objects for half mesh generation;
649                 grillage with a transverse axis of symmetry. Center longitudinal
650                 segment exists for even number of transverse members.
651                 Stores identified segments in half_segments dictionary.
652         """
653         n_tran = self._grillage.N_transverse
654         middle_segment_ID = int(np.ceil((n_tran - 1) / 2))
655         n = 1
656
657         if np.mod(n_tran, 2) == 0:
658             for member in self._grillage.longitudinal_members().values():
659                 self.half_segments[n] = member.segments[middle_segment_ID - 1]
660                 self.add_to_all_segments(member.segments[middle_segment_ID - 1])

```

```

661         n += 1
662
663     def identify_both_half_segments(self):
664         """
665         :return: Identifies Segment objects for half mesh generation;
666                 grillage with both axis of symmetry.
667                 Stores identified segments in half_segments dictionary.
668         """
669         n_long = self._grillage.N_longitudinal
670         n_tran = self._grillage.N_transverse
671         long_segment_ID = int(np.ceil((n_tran - 1) / 2))
672         tran_segment_ID = int(np.ceil((n_long - 1) / 2))
673
674         n = 1
675         if np.mod(n_tran, 2) == 0:
676             for member in self.longitudinal_psm_extent().values():
677                 self.half_segments[n] = member.segments[long_segment_ID - 1]
678                 self.add_to_all_segments(member.segments[long_segment_ID - 1])
679                 n += 1
680
681         if np.mod(n_long, 2) == 0:
682             for member in self.transverse_psm_extent().values():
683                 self.half_segments[n] = member.segments[tran_segment_ID - 1]
684                 self.add_to_all_segments(member.segments[tran_segment_ID - 1])
685                 n += 1
686
687     def identify_long_full_plate_zones(self):
688         """
689         :return: Identifies Plate objects for full mesh generation on the entire
690                 plating zone; grillage with a longitudinal axis of symm.
691                 Stores identified zones in full_plate_zones dictionary.
692         """
693         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
694         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
695
696         n_full_rows = int(np.floor(total_rows / 2))
697         zone_arr_split = plating_zone_array[0:n_full_rows, :]
698         for i in zone_arr_split:
699             for j in i:
700                 self.full_plate_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
701                 self.all_plating_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
702
703     def identify_tran_full_plate_zones(self):
704         """
705         :return: Identifies Plate objects for full mesh generation on the entire
706                 plating zone; grillage with a transverse axis of symm.
707                 Stores identified zones in full_plate_zones dictionary.
708         """
709         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
710         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
711
712         n_full_columns = int(np.floor(total_columns / 2))
713         zone_arr_split = plating_zone_array[:, 0:n_full_columns]
714         for i in zone_arr_split:
715             for j in i:
716                 self.full_plate_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
717                 self.all_plating_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
718
719     def identify_both_full_plate_zones(self):
720         """

```



```

721     :return: Identifies Plate objects for full mesh generation on the entire
722     plating zone; grillage with both axis of symm.
723     Stores identified zones in full_plate_zones dictionary.
724     """
725     total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
726     total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
727     plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
728
729     mid_row_id = int(np.floor(total_rows / 2))
730     mid_col_id = int(np.floor(total_columns / 2))
731     zone_arr_split = plating_zone_array[0:mid_row_id, 0:mid_col_id]
732     for i in zone_arr_split:
733         for j in i:
734             self.full_plate_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
735             self.all_plating_zones[j] = self._grillage.plating()[j]
736
737     def identify_long_half_plate_zones(self):
738         """
739         :return: Identifies Plate objects for half mesh generation; plating
740         zones split with a longitudinal axis of symmetry.
741         Stores identified zones in long_half_plate_zones dictionary.
742         """
743         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
744         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
745
746         if np.mod(self._grillage.N_longitudinal, 2) == 0:
747             mid_row_id = int(np.floor(total_rows / 2))
748             middle_row = plating_zone_array[mid_row_id, :]
749             for i in middle_row:
750                 self.long_half_plate_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
751                 self.all_plating_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
752
753     def identify_tran_half_plate_zones(self):
754         """
755         :return: Identifies Plate objects for half mesh generation; plating
756         zones split with a transverse axis of symmetry.
757         Stores identified zones in tran_half_plate_zones dictionary.
758         """
759         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
760         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
761
762         if np.mod(self._grillage.N_transverse, 2) == 0:
763             mid_col_id = int(np.floor(total_columns / 2))
764             middle_column = plating_zone_array[:, mid_col_id]
765             for i in middle_column:
766                 self.tran_half_plate_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
767                 self.all_plating_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
768
769     def identify_both_half_plate_zones(self):
770         """
771         :return: Identifies Plate objects for half mesh generation; grillage
772         with both axis of symm. Stores identified zones in
773         long_half_plate_zones and tran_half_plate_zones dictionary.
774         """
775         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
776         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
777         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
778         mid_row_id = int(np.floor(total_rows / 2))
779         mid_col_id = int(np.floor(total_columns / 2))
780

```

```

781     if np.mod(self._grillage.N_longitudinal, 2) == 0:
782         middle_row = plating_zone_array[mid_row_id, 0:mid_col_id]
783         for i in middle_row:
784             self.long_half_plate_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
785             self.all_plating_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
786
787     if np.mod(self._grillage.N_transverse, 2) == 0:
788         middle_column = plating_zone_array[0:mid_row_id, mid_col_id]
789         for i in middle_column:
790             self.tran_half_plate_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
791             self.all_plating_zones[i] = self._grillage.plating()[i]
792
793     def identify_quarter_plate_zone(self):
794         """
795         :return: Identifies Plate object for quarter mesh generation;
796                 plating zone split with both axis of symmetry.
797                 Only possible if grillage has both axis of symmetry, with even
798                 number of longitudinal and transverse primary supporting members.
799                 There can be only one plating zone split with both axis of symmetry.
800                 Identified zone is saved in quarter_plate_zone dictionary
801                 for consistency with other methods.
802         """
803         if np.mod(self._grillage.N_longitudinal, 2) == 0 and \
804            np.mod(self._grillage.N_transverse, 2) == 0:
805             total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
806             total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
807             plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
808
809             mid_row_id = int(np.floor(total_rows / 2))
810             mid_col_id = int(np.floor(total_columns / 2))
811             plateid = plating_zone_array[mid_row_id, mid_col_id]
812
813             self.quarter_plate_zone[plateid] = self._grillage.plating()[plateid]
814             self.all_plating_zones[plateid] = self._grillage.plating()[plateid]
815
816     def get_plate_dim(self, plate: Plate, plate_dim):
817         """
818         :param plate: Selected plating zone.
819         :param plate_dim: Full plating zone dimension.
820         :return: Method returns half of the full plating zone dimension if
821                 selected plate is split by any axis of symmetry.
822         """
823         if plate.id in self.full_plate_zones:
824             return plate_dim
825
826         elif plate.id in self.long_half_plate_zones or \
827              plate.id in self.tran_half_plate_zones or \
828              plate.id in self.quarter_plate_zone:
829             return plate_dim / 2
830
831     def get_long_plate_dim(self, plate: Plate):
832         """
833         :param plate: Selected plating zone.
834         :return: Method returns longitudinal dimension of the selected plating
835                 zone. Returns half of the original value if the zone is split by
836                 transverse axis of symmetry.
837         """
838         if plate.id in self.full_plate_zones or \
839            plate.id in self.long_half_plate_zones:
840             return plate.plate_longitudinal_dim() * 1000

```

```

841
842     elif plate.id in self.tran_half_plate_zones or \
843           plate.id in self.quarter_plate_zone:
844         return (plate.plate_longitudinal_dim() / 2) * 1000
845
846 def get_tran_plate_dim(self, plate: Plate):
847     """
848     :param plate: Selected plating zone.
849     :return: Method returns transverse dimension of the selected plating
850             zone. Returns half of the original value if the zone is split by
851             longitudinal axis of symmetry.
852     """
853     if plate.id in self.full_plate_zones or \
854       plate.id in self.tran_half_plate_zones:
855         return plate.plate_transverse_dim() * 1000
856
857     elif plate.id in self.long_half_plate_zones or \
858           plate.id in self.quarter_plate_zone:
859         return (plate.plate_transverse_dim() / 2) * 1000
860
861 def aos_between_stiffeners(self, plate: Plate):
862     """
863     :param plate: Selected plating zone.
864     :return: True if some axis of symmetry passes between stiffeners on the
865             selected plating zone. False return does not indicate stiffener is
866             located on some axis of symmetry! If a new stiffener layout
867             definition type would be created with nonsymmetric stiffener
868             placement, this method needs to be modified.
869     """
870     stiff_num = plate.get_stiffener_number()
871     if (plate.id in self.long_half_plate_zones or
872         plate.id in self.quarter_plate_zone) and \
873         np.mod(stiff_num, 2) == 0 and \
874         plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
875         return True
876
877     elif (plate.id in self.tran_half_plate_zones or
878          plate.id in self.quarter_plate_zone) and \
879          np.mod(stiff_num, 2) == 0 and \
880          plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
881         return True
882     else:
883         return False
884
885 def aos_on_stiffener(self, plate: Plate):
886     """
887     :param plate: Selected plating zone.
888     :return: True if some axis of symmetry is located on and parallel to a
889             stiffener on the selected plating zone. False return does not
890             indicate axis of symmetry passes between stiffeners! If a new
891             stiffener layout definition type would be created with nonsymmetric
892             stiffener placement, this method needs to be modified.
893     """
894     stiff_num = plate.get_stiffener_number()
895     if (plate.id in self.long_half_plate_zones or
896         plate.id in self.quarter_plate_zone) and \
897         np.mod(stiff_num, 2) != 0 and \
898         plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
899         return True
900

```

```

901     elif (plate.id in self.tran_half_plate_zones or
902           plate.id in self.quarter_plate_zone) and \
903           np.mod(stiff_num, 2) != 0 and \
904           plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
905         return True
906     else:
907         return False
908
909     def aos_on_segment(self, segment: Segment):
910         """
911         :param segment: Segment of a primary supporting member.
912         :return: True if some axis of symmetry is located on and parallel to a
913                segment. Used to identify which segments should be assigned half of
914                their original web thickness and half of their flange.
915         """
916         rel_dist = segment.primary_supp_mem.rel_dist
917         direction = segment.primary_supp_mem.direction
918         aos = self.axis_of_symm
919         if (aos is AOS.LONGITUDINAL or aos is AOS.BOTH) and \
920             direction is BeamDirection.LONGITUDINAL and \
921             np.isclose(rel_dist, 0.5):
922             return True
923
924         elif (aos is AOS.TRANSVERSE or aos is AOS.BOTH) and \
925             direction is BeamDirection.TRANSVERSE and \
926             np.isclose(rel_dist, 0.5):
927             return True
928         else:
929             return False
930
931     def identify_tran_split_zones(self):
932         """
933         :return: Identifies Plate objects where transverse axis of symmetry
934                passes between stiffeners. Stores all identified zones located on
935                the column of plating zones into tran_e_split_zone dictionary.
936         """
937         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
938         for plate in self.all_plating_zones.values():
939             if self.aos_between_stiffeners(plate) \
940                 and plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
941                 column_id = np.where(plating_zone_array == plate.id)[1]
942                 split_element_zones = plating_zone_array[:, column_id]
943                 for i in split_element_zones:
944                     for j in i:
945                         self.tran_e_split_zone[j] = self._grillage.plating()[j]
946
947     def identify_long_split_zones(self):
948         """
949         :return: Identifies Plate objects where longitudinal axis of symmetry
950                passes between stiffeners. Stores all identified zones located on
951                the row of plating zones into long_e_split_zone dictionary.
952         """
953         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
954         for plate in self.all_plating_zones.values():
955             if self.aos_between_stiffeners(plate) \
956                 and plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
957                 row_id = np.where(plating_zone_array == plate.id)[0]
958                 split_element_zones = plating_zone_array[row_id, :]
959                 for i in split_element_zones:
960                     for j in i:

```

```

961             self.long_e_split_zone[j] = self._grillage.plating()[j]
962
963     def longitudinal_symm_plate_ref_array(self):
964         """
965         :return: 2D array of plating zone IDs to be meshed for longitudinal
966                 Axis of Symmetry, arranged to represent their relative placement
967                 on the grillage model.
968         """
969         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
970         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
971         mid_row_id = int(np.ceil(total_rows / 2))
972         self.plating_zones_ref_array = plating_zone_array[0:mid_row_id, :]
973
974     def transverse_symm_plate_ref_array(self):
975         """
976         :return: 2D array of plating zone IDs to be meshed for transverse
977                 Axis of Symmetry, arranged to represent their relative placement
978                 on the grillage model.
979         """
980         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
981         plating_zone_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
982         mid_col_id = int(np.ceil(total_columns / 2))
983         self.plating_zones_ref_array = plating_zone_array[:, 0:mid_col_id]
984
985     def both_symm_plate_ref_array(self):
986         """
987         :return: 2D array of plating zone IDs to be meshed for both longitudinal
988                 and transverse Axis of Symmetry, arranged to represent their
989                 relative placement on the grillage model.
990         """
991         total_rows = self._grillage.N_longitudinal - 1
992         total_columns = self._grillage.N_transverse - 1
993         ref_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
994         mid_row_id = int(np.ceil(total_rows / 2))
995         mid_col_id = int(np.ceil(total_columns / 2))
996         self.plating_zones_ref_array = ref_array[0:mid_row_id, 0:mid_col_id]
997
998     def grillage_plate_extent(self):
999         """
1000        :return: Determines limits of plate mesh generation based on input
1001                Axis of Symmetry value. Calls specific methods for identifying which
1002                plating zones will be fully or partially meshed. If grillage has no
1003                axis of symmetry, all plating zones inside grillage.plating() will
1004                be meshed. Saves a reference ID array of all plating zones to be
1005                meshed into plating_zones_ref_array.
1006        """
1007        if self.axis_of_symm is AOS.LONGITUDINAL:
1008            self.identify_long_full_plate_zones()
1009            self.identify_long_half_plate_zones()
1010            self.longitudinal_symm_plate_ref_array()
1011            self.identify_long_split_zones()
1012
1013        elif self.axis_of_symm is AOS.TRANSVERSE:
1014            self.identify_tran_full_plate_zones()
1015            self.identify_tran_half_plate_zones()
1016            self.transverse_symm_plate_ref_array()
1017            self.identify_tran_split_zones()
1018
1019        elif self.axis_of_symm is AOS.BOTH:
1020            self.identify_both_full_plate_zones()

```

```

1021         self.identify_both_half_plate_zones()
1022         self.identify_quarter_plate_zone()
1023         self.both_symm_plate_ref_array()
1024         self.identify_long_split_zones()
1025         self.identify_tran_split_zones()
1026
1027     else:
1028         self.full_plate_zones = self._grillage.plating()
1029         self.all_plating_zones = self._grillage.plating()
1030         self.plating_zones_ref_array = self.hc_plate_zone_ref_ID_array()
1031
1032     def add_to_all_segments(self, segment):
1033         self._all_segment_count += 1
1034         self.all_segments[self._all_segment_count] = segment
1035
1036     def grillage_segment_extent(self):
1037         """
1038         :return: Determines limits of segment mesh generation based on selected
1039                 Axis of Symmetry. Calls specific methods for identifying which
1040                 segments will be fully or partially meshed. If grillage has no axis
1041                 of symmetry, all segments on the grillage model will be meshed.
1042         """
1043         if self.axis_of_symm is AOS.LONGITUDINAL:
1044             self.identify_long_full_segments()
1045             self.identify_long_half_segments()
1046
1047         elif self.axis_of_symm is AOS.TRANSVERSE:
1048             self.identify_tran_full_segments()
1049             self.identify_tran_half_segments()
1050
1051         elif self.axis_of_symm is AOS.BOTH:
1052             self.identify_both_full_segments()
1053             self.identify_both_half_segments()
1054
1055         else:
1056             self.identify_none_full_segments()
1057
1058     def add_unique_plate_prop(self, prop: PlateProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1059         """
1060         Method adds plating zone plate finite element property.
1061         Checks for duplicate PlateProperty ID in plate_property_IDs.
1062         If no duplicate exists, a new GeoFEM plate property is created.
1063         :param prop: Grillage model PlateProperty object.
1064         :param fem: Grillage FEM model.
1065         """
1066         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1067         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1068         if prop.id not in fem.plate_property_IDs.keys():
1069             tp = prop.tp_net(corr_add, prop.tp)
1070             mat_id = prop.plate_mat.id
1071             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1072             fem.add_plate_property(gfe_prop_id, tp, mat)
1073             fem.plate_property_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1074
1075     def add_unique_web_prop(self, prop: TBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1076         """
1077         Method adds segment web plate finite element property.
1078         Checks for duplicate BeamProperty ID in web_property_IDs.
1079         If no duplicate exists, a new GeoFEM plate property is created.
1080         :param prop: Grillage model TBeamProperty object.

```

```

1081         :param fem: Grillage FEM model.
1082         """
1083         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1084         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1085         if prop.id not in fem.web_property_IDs.keys():
1086             tw = prop.tw_net(corr_add)
1087             mat_id = prop.mat.id
1088             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1089             fem.add_plate_property(gfe_prop_id, tw, mat)
1090             fem.web_property_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1091
1092     def add_unique_half_web_prop(self, prop: TBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1093         """
1094         Method adds segment web plate finite element property with half tw.
1095         Checks for duplicate BeamProperty ID in half_web_property_IDs.
1096         If no duplicate exists, a new GeoFEM plate property is created.
1097         :param prop: Grillage model TBeamProperty object.
1098         :param fem: Grillage FEM model.
1099         """
1100         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1101         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1102         if prop.id not in fem.half_web_property_IDs.keys():
1103             tw = prop.tw_net(corr_add) / 2
1104             mat_id = prop.mat.id
1105             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1106             fem.add_plate_property(gfe_prop_id, tw, mat)
1107             fem.half_web_property_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1108
1109     def add_unique_flange_prop(self, prop: TBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1110         """
1111         Method adds segment flange plate finite element property.
1112         Checks for duplicate BeamProperty ID in flange_property_IDs.
1113         If no duplicate exists, a new GeoFEM plate property is created.
1114         :param prop: Grillage model TBeamProperty object.
1115         :param fem: Grillage FEM model.
1116         """
1117         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1118         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1119         if prop.id not in fem.flange_property_IDs.keys():
1120             tf = prop.tf_net(corr_add)
1121             mat_id = prop.mat.id
1122             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1123             fem.add_plate_property(gfe_prop_id, tf, mat)
1124             fem.flange_property_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1125
1126     def add_unique_T_beam_prop(self, prop: TBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1127         """
1128         Method adds stiffener layout beam element property.
1129         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1130         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1131         :param prop: Grillage model TBeamProperty object.
1132         :param fem: Grillage FEM model.
1133         """
1134         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1135         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1136         if prop.id not in fem.stiff_beam_prop_IDs.keys():
1137             name_str = "T_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1138             name_str += "/" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.tf)
1139             hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1140             tw = prop.tw_net(corr_add)

```

```

1141         bf = prop.bf_net(corr_add)
1142         tf = prop.tf_net(corr_add)
1143         mat_id = prop.mat.id
1144         mat = fem.getMaterial(mat_id)
1145         fem.add_T_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1146         fem.stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1147
1148     def add_unique_half_T_beam_prop(self, prop: TBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1149         """
1150         Method adds stiffener layout beam element property.
1151         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1152         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1153         :param prop: Grillage model TBeamProperty object.
1154         :param fem: Grillage FEM model.
1155         """
1156         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1157         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1158         if prop.id not in fem.half_stiff_beam_prop_IDs.keys():
1159             name_str = "T_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1160             name_str += "/" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.tf)
1161             hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1162             tw = prop.tw_net(corr_add)
1163             bf = prop.bf_net(corr_add)
1164             tf = prop.tf_net(corr_add)
1165             mat_id = prop.mat.id
1166             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1167             fem.add_half_T_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1168             fem.half_stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1169
1170     def add_unique_L_beam_prop(self, prop: LBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1171         """
1172         Method adds stiffener layout beam element property.
1173         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1174         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1175         :param prop: Grillage model LBeamProperty object.
1176         :param fem: Grillage FEM model.
1177         """
1178         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1179         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1180         if prop.id not in fem.stiff_beam_prop_IDs.keys():
1181             name_str = "L_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1182             name_str += "/" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.tf)
1183             hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1184             tw = prop.tw_net(corr_add)
1185             bf = prop.bf_net(corr_add)
1186             tf = prop.tf_net(corr_add)
1187             mat_id = prop.mat.id
1188             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1189             fem.add_L_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1190             fem.stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1191
1192     def add_unique_half_L_beam_prop(self, prop: LBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1193         """
1194         Method adds stiffener layout beam element property.
1195         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1196         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1197         :param prop: Grillage model LBeamProperty object.
1198         :param fem: Grillage FEM model.
1199         """
1200         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]

```



```

1201     gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1202     if prop.id not in fem.half_stiff_beam_prop_IDs.keys():
1203         name_str = "L_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1204         name_str += "/" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.tf)
1205         hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1206         tw = prop.tw_net(corr_add)
1207         bf = prop.bf_net(corr_add)
1208         tf = prop.tf_net(corr_add)
1209         mat_id = prop.mat.id
1210         mat = fem.getMaterial(mat_id)
1211         fem.add_half_L_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1212         fem.half_stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1213
1214     def add_unique_FB_beam_prop(self, prop: FBBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1215         """
1216         Method adds stiffener layout beam element property.
1217         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1218         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1219         :param prop: Grillage model FBBeamProperty object.
1220         :param fem: Grillage FEM model.
1221         """
1222         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1223         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1224         if prop.id not in fem.stiff_beam_prop_IDs.keys():
1225             name_str = "FB_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1226             hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1227             tw = prop.tw_net(corr_add)
1228             mat_id = prop.mat.id
1229             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1230             fem.add_FB_beam_property(name_str, hw, tw, mat)
1231             fem.stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1232
1233     def add_unique_half_FB_beam_prop(self, prop: FBBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1234         """
1235         Method adds stiffener layout beam element property.
1236         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1237         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1238         :param prop: Grillage model FBBeamProperty object.
1239         :param fem: Grillage FEM model.
1240         """
1241         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1242         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1243         if prop.id not in fem.half_stiff_beam_prop_IDs.keys():
1244             name_str = "FB_" + str(prop.hw) + "x" + str(prop.tw)
1245             hw = prop.hw_net(corr_add, 0.0)
1246             tw = prop.tw_net(corr_add)
1247             mat_id = prop.mat.id
1248             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1249             fem.add_half_FB_beam_property(name_str, hw, tw, mat)
1250             fem.half_stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1251
1252     def add_unique_Bulb_beam_prop(self, prop: BulbBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1253         """
1254         Method adds stiffener layout beam element property.
1255         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1256         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1257         :param prop: Grillage model BulbBeamProperty object.
1258         :param fem: Grillage FEM model.
1259         """
1260         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]

```

```

1261     gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1262     if prop.id not in fem.stiff_beam_prop_IDs.keys():
1263         name_str = "HP_" + str(prop.hw_HP) + "x" + str(prop.tw_HP)
1264         hw = prop.hw_ekv_net(corr_add)
1265         tw = prop.tw_ekv_net(corr_add)
1266         bf = prop.bf_ekv_net(corr_add)
1267         tf = prop.tf_ekv_net(corr_add)
1268         mat_id = prop.mat.id
1269         mat = fem.getMaterial(mat_id)
1270         fem.add_Bulb_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1271         fem.stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1272
1273     def add_unique_half_Bulb_beam_prop(self, prop: BulbBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1274         """
1275         Method adds stiffener layout beam element property.
1276         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1277         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1278         :param prop: Grillage model BulbBeamProperty object.
1279         :param fem: Grillage FEM model.
1280         """
1281         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1282         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1283         if prop.id not in fem.half_stiff_beam_prop_IDs.keys():
1284             name_str = "HP_" + str(prop.hw_HP) + "x" + str(prop.tw_HP)
1285             hw = prop.hw_ekv_net(corr_add)
1286             tw = prop.tw_ekv_net(corr_add)
1287             bf = prop.bf_ekv_net(corr_add)
1288             tf = prop.tf_ekv_net(corr_add)
1289             mat_id = prop.mat.id
1290             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1291             fem.add_half_Bulb_beam_property(name_str, hw, tw, bf, tf, mat)
1292             fem.half_stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1293
1294     def add_unique_Hat_beam_prop(self, prop: HatBeamProperty, fem: GeoGrillageFEM):
1295         """
1296         Method adds stiffener layout beam element property.
1297         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.
1298         If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1299         :param prop: Grillage model HatBeamProperty object.
1300         :param fem: Grillage FEM model.
1301         """
1302         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1303         gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1304         if prop.id not in fem.stiff_beam_prop_IDs.keys():
1305             name_str = "Hat_" + str(prop.h) + "x" + str(prop.t)
1306             name_str += "x" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.fi) + ""
1307             h = prop.h_net(corr_add)
1308             t = prop.t_net(corr_add)
1309             bf = prop.bf_net(corr_add)
1310             fi = prop.fi
1311             mat_id = prop.mat.id
1312             mat = fem.getMaterial(mat_id)
1313             fem.add_Hat_beam_property(name_str, h, t, bf, fi, mat)
1314             fem.stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1315
1316     def add_unique_half_Hat_beam_prop(self, prop: HatBeamProperty,
1317                                     fem: GeoGrillageFEM):
1318         """
1319         Method adds stiffener layout beam element property.
1320         Checks for duplicate BeamProperty ID in stiff_beam_prop_IDs.

```

```

1321     If no duplicate exists, a new GeoFEM Beam property is created.
1322     :param prop: Grillage model HatBeamProperty object.
1323     :param fem: Grillage FEM model.
1324     """
1325     corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1326     gfe_prop_id = fem.id_prop_count
1327     if prop.id not in fem.half_stiff_beam_prop_IDs.keys():
1328         name_str = "Hat_" + str(prop.h) + "x" + str(prop.t)
1329         name_str += "x" + str(prop.bf) + "x" + str(prop.fi) + "°"
1330         h = prop.h_net(corr_add)
1331         t = prop.t_net(corr_add)
1332         bf = prop.bf_net(corr_add)
1333         fi = prop.fi
1334         mat_id = prop.mat.id
1335         mat = fem.getMaterial(mat_id)
1336         fem.add_half_Hat_beam_property(name_str, h, t, bf, fi, mat)
1337         fem.half_stiff_beam_prop_IDs[prop.id] = gfe_prop_id
1338
1339     def generate_FEM_material(self, fem: GeoGrillageFEM):
1340         """
1341         :return: Generates GeoFEM materials from grillage model materials.
1342         """
1343         for mat in self._grillage.material_props().values():
1344             fem.add_material(mat)
1345
1346     def generate_FEM_plate_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
1347         """
1348         :return: Generates GeoFEM plate property from grillage BeamProperty.
1349         """
1350         for plate in self.all_plating_zones.values():
1351             self.add_unique_plate_prop(plate.plate_prop, fem)
1352
1353         for segment in self.all_segments.values():
1354             beam_prop = segment.beam_prop
1355             beam_type = beam_prop.beam_type
1356
1357             if self.aos_on_segment(segment):
1358                 self.add_unique_half_web_prop(beam_prop, fem)
1359             else:
1360                 self.add_unique_web_prop(beam_prop, fem)
1361
1362             if beam_type is BeamType.T or beam_type is BeamType.L:
1363                 self.add_unique_flange_prop(beam_prop, fem)
1364
1365     def generate_FEM_beam_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
1366         """
1367         :return: Generates GeoFEM beam property from grillage BeamProperty.
1368         Does not recognize stiffeners on Axis Of Symmetry. Stiffener on
1369         AOS identification is done at the moment of beam element generation.
1370         """
1371         for plate in self.all_plating_zones.values():
1372             stiff_prop = plate.stiff_layout.beam_prop
1373
1374             if stiff_prop.beam_type is BeamType.T:
1375                 self.add_unique_T_beam_prop(stiff_prop, fem)
1376
1377             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.L:
1378                 self.add_unique_L_beam_prop(stiff_prop, fem)
1379
1380             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.FB:

```

```

1381         self.add_unique_FB_beam_prop(stiff_prop, fem)
1382
1383     elif stiff_prop.beam_type is BeamType.Bulb:
1384         self.add_unique_Bulb_beam_prop(stiff_prop, fem)
1385
1386     elif stiff_prop.beam_type is BeamType.Hat:
1387         self.add_unique_Hat_beam_prop(stiff_prop, fem)
1388
1389 def generate_half_FEM_beam_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
1390     for plate in self.all_plating_zones.values():
1391         stiff_prop = plate.stiff_layout.beam_prop
1392         if self.aos_on_stiffener(plate):
1393             if stiff_prop.beam_type is BeamType.T:
1394                 self.add_unique_half_T_beam_prop(stiff_prop, fem)
1395
1396             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.L:
1397                 self.add_unique_half_L_beam_prop(stiff_prop, fem)
1398
1399             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.FB:
1400                 self.add_unique_half_FB_beam_prop(stiff_prop, fem)
1401
1402             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.Bulb:
1403                 self.add_unique_half_Bulb_beam_prop(stiff_prop, fem)
1404
1405             elif stiff_prop.beam_type is BeamType.Hat:
1406                 self.add_unique_half_Hat_beam_prop(stiff_prop, fem)
1407
1408 def grillage_mesh_extent(self):
1409     """
1410     :return: Determines limits of grillage mesh generation for plating zones
1411             and segments based on Axis of Symmetry value. Method stops mesh
1412             generation if the model does not pass the feasibility test.
1413     """
1414     self.model_check.mesh_feasibility()
1415     self.grillage_plate_extent()
1416     self.grillage_segment_extent()
1417
1418 def identify_both_psm_ends(self):
1419     """
1420     Identifies coordinates for pinned boundary conditions on both ends of
1421     all Primary Supporting Members and returns list of end_coords.
1422     """
1423     symmetry = self.axis_of_symm
1424     end_coords = []
1425
1426     for member in self.longitudinal_psm_extent().values():
1427         end1_coords, end2_coords = member.end_nodes
1428         if symmetry is AOS.TRANSVERSE or symmetry is AOS.BOTH:
1429             end_coords.append(end1_coords * [1, 1, 0])
1430         else:
1431             end_coords.append(end1_coords * [1, 1, 0])
1432             end_coords.append(end2_coords * [1, 1, 0])
1433
1434     for member in self.transverse_psm_extent().values():
1435         end1_coords, end2_coords = member.end_nodes
1436         if symmetry is AOS.LONGITUDINAL or symmetry is AOS.BOTH:
1437             end_coords.append(end1_coords * [1, 1, 0])
1438         else:
1439             end_coords.append(end1_coords * [1, 1, 0])
1440             end_coords.append(end2_coords * [1, 1, 0])

```

```

1441         return end_coords
1442
1443
1444 class MeshSize:
1445     def __init__(self, mesh_extent: MeshExtent,
1446                 min_num_ebs: int,
1447                 min_num_eweb: int,
1448                 num_eaf: int,
1449                 flange_aspect_ratio: float,
1450                 plate_aspect_ratio: float,
1451                 des_plate_aspect_ratio: float):
1452         """
1453         Class for calculating finite element dimensions on the selected
1454         grillage model.
1455
1456         Final result of the following methods are distances between edge nodes
1457         of all structural elements, along both x and y axis, which will be used
1458         for all node and element generation.
1459
1460         Mesh control parameters:
1461         min_num_ebs - Minimum number of elements between stiffeners; default = 1
1462         min_num_eweb - Minimum number of elements representing the web of a
1463             primary supporting member along its height; default = 3
1464         num_eaf - Number of elements across primary supporting member flange;
1465             default = 1
1466         flange_aspect_ratio - Maximum aspect ratio value for primary supporting
1467             member flange quad elements; default = 8
1468         plate_aspect_ratio - Maximum aspect ratio value for plating and primary
1469             supporting member web quad elements; default = 3
1470         des_plate_aspect_ratio - Desirable plating aspect ratio value less than
1471             the maximum; default = 2
1472
1473         Mesh dimensions are saved into:
1474         mesh_dim_x - Final base mesh x dimensions (dim_x) for each column of
1475             plating zones on the grillage model
1476         mesh_dim_y - Final base mesh y dimensions (dim_y) for each row of
1477             plating zones on the grillage model
1478
1479         :param mesh_extent: FE mesh extents for the selected grillage model
1480             and Axis of Symmetry.
1481         """
1482         self._mesh_extent = mesh_extent
1483
1484         self._grillage = self._mesh_extent.grillage
1485         self._axis_of_symm = self._mesh_extent.axis_of_symm
1486
1487         self._min_num_ebs = min_num_ebs
1488         self._min_num_eweb = min_num_eweb
1489         self._num_eaf = num_eaf
1490         self._flange_aspect_ratio = flange_aspect_ratio
1491         self._plate_aspect_ratio = plate_aspect_ratio
1492         self._des_plate_aspect_ratio = des_plate_aspect_ratio
1493
1494         self._mesh_dim_x = {}
1495         self._mesh_dim_y = {}
1496
1497         self.start_nodes = {}
1498
1499     @property
1500     def mesh_extent(self):

```

```

1501         return self._mesh_extent
1502
1503     @property
1504     def min_num_ebs(self):
1505         return self._min_num_ebs
1506
1507     @min_num_ebs.setter
1508     def min_num_ebs(self, value):
1509         self._min_num_ebs = value
1510
1511     @property
1512     def min_num_eweb(self):
1513         return self._min_num_eweb
1514
1515     @min_num_eweb.setter
1516     def min_num_eweb(self, value):
1517         self._min_num_eweb = value
1518
1519     @property
1520     def num_eaf(self):
1521         return self._num_eaf
1522
1523     @num_eaf.setter
1524     def num_eaf(self, value):
1525         self._num_eaf = value
1526
1527     @property
1528     def flange_aspect_ratio(self):
1529         return self._flange_aspect_ratio
1530
1531     @flange_aspect_ratio.setter
1532     def flange_aspect_ratio(self, value):
1533         self._flange_aspect_ratio = value
1534
1535     @property
1536     def plate_aspect_ratio(self):
1537         return self._plate_aspect_ratio
1538
1539     @plate_aspect_ratio.setter
1540     def plate_aspect_ratio(self, value):
1541         self._plate_aspect_ratio = value
1542
1543     @property
1544     def des_plate_aspect_ratio(self):
1545         return self._des_plate_aspect_ratio
1546
1547     @property
1548     def mesh_dim_x(self):
1549         return self._mesh_dim_x
1550
1551     @mesh_dim_x.setter
1552     def mesh_dim_x(self, value):
1553         self._mesh_dim_x = value
1554
1555     @property
1556     def mesh_dim_y(self):
1557         return self._mesh_dim_y
1558
1559     @mesh_dim_y.setter
1560     def mesh_dim_y(self, value):

```

```

1561         self._mesh_dim_y = value
1562
1563     @des_plate_aspect_ratio.setter
1564     def des_plate_aspect_ratio(self, value):
1565         self._des_plate_aspect_ratio = value
1566         if value > self._plate_aspect_ratio:
1567             raise InvalidDesiredAspectRatio(value, self._plate_aspect_ratio)
1568
1569     @staticmethod
1570     def save_node_spacing(dictionary: dict, n_dims, dimension):
1571         """
1572         Method used for saving edge node spacing dimensions to a dictionary,
1573         for any number of dimensions of equal value.
1574
1575         :param dictionary: Dictionary for all node spacing (element) dimensions
1576         on a plating zone.
1577         :param n_dims: Number of dimensions to be stored in the Dictionary.
1578         :param dimension: Element dimension to be stored.
1579         """
1580         if dictionary: # If the dictionary is not empty
1581             dimension_id = len(dictionary) + 1
1582         else:
1583             dimension_id = 1
1584
1585         end = int(dimension_id + n_dims)
1586         for element in range(dimension_id, end):
1587             dictionary[element] = dimension
1588             dimension_id += 1
1589
1590     @staticmethod
1591     def find_closest_divisor(length: int, spacing: int):
1592         """
1593         Method can be used as a separate calculator for equal stiffener spacing
1594         calculation along some length L and approximate desired spacing.
1595
1596         :param length: Length L which should be divided into n equal parts, each
1597         with length x.
1598         :param spacing: Value to which length x should be closes to.
1599         :return: Closest divisor of length L, which results in a length x
1600         closest to given spacing value. If a divisor does not exist,
1601         this method returns None.
1602         """
1603         if np.mod(length, spacing) == 0:
1604             return length / spacing
1605
1606         else:
1607             i = 1
1608             res = []
1609             while i <= length:
1610                 if np.mod(length, i) == 0:
1611                     res.append(i)
1612                 i += 1
1613
1614             min_diff = spacing
1615             min_div_id = 1
1616
1617             if not res:
1618                 return None
1619             else:
1620                 for i in range(0, len(res)):

```

```

1621         if min_diff > abs((length / res[i]) - spacing):
1622             min_diff = abs((length / res[i]) - spacing)
1623             min_div_id = i
1624         n = res[min_div_id]
1625         return n
1626
1627     @staticmethod
1628     def find_largest_divisor(length, max_val):
1629         """
1630         :param length: Length L which should be divided into n equal parts,
1631             each with length x.
1632         :param max_val: Maximum value which length x can not exceed.
1633         :return: Largest divisor of length L, which results in a length x
1634             smaller or equal to the given maximum value. If a divisor does not
1635             exist, such as when length L is decimal, this method returns None.
1636         """
1637         i = 1
1638         divisors = []
1639         while i <= length:
1640             if np.mod(length, i) == 0:
1641                 divisors.append(i)
1642             i += 1
1643
1644         curr_x_max = 0 # Current maximum value of x
1645         n = None
1646
1647         if not divisors:
1648             return None
1649         else: # If a divisor exists
1650             for i in divisors:
1651                 curr_x = length / i # Current dimension x value
1652                 if curr_x_max < curr_x <= max_val:
1653                     curr_x_max = curr_x
1654                     n = i
1655             return n
1656
1657     @staticmethod
1658     def element_aspect_ratio(dim_x, dim_y):
1659         """
1660         :param dim_x: Dimension of the quad element along x axis.
1661         :param dim_y: Dimension of the quad element along y axis.
1662         :return: Aspect ratio of the quad element.
1663         """
1664         if dim_x > dim_y != 0:
1665             ar = dim_x / dim_y
1666         elif dim_x < dim_y and dim_x != 0:
1667             ar = dim_y / dim_x
1668         else:
1669             ar = 1
1670         return ar
1671
1672     @staticmethod
1673     def refine_plate_element(length, dim_limit):
1674         """
1675         :param length: Dimension which is to be equally divided.
1676         :param dim_limit: Maximum dimension allowed for the element along the
1677             given length, defined by aspect ratio or other limits.
1678         :return: Element dimension value that is less than the maximum allowed
1679             and equally divides given length.
1680         """

```



```

1681     if dim_limit == 0:
1682         return length
1683     else:
1684         n_elements = np.ceil(length / dim_limit)
1685         dim = length / n_elements
1686         return dim
1687
1688     def element_size_perp_to_stiffeners(self, plate: Plate):
1689         """
1690         :param plate: Selected plating zone.
1691         :return: Quad element dimension perpendicular to stiffener direction
1692                 based only on number of elements between stiffeners, in [mm].
1693         """
1694         stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
1695         perp_dim = stiff_spacing / self._min_num_ebs
1696         return perp_dim
1697
1698     def element_size_para_to_stiffeners(self, plate: Plate, plate_dim):
1699         """
1700         :param plate: Selected plating zone.
1701         :param plate_dim: Plating zone dimension parallel to stiffener
1702                         direction, takes into account Axis of Symmetry.
1703         :return: Quad element dimension parallel to stiffener direction, based
1704                 on quad element dimension perpendicular to stiffener direction and
1705                 desired aspect ratio.
1706         """
1707         y = self.element_size_perp_to_stiffeners(plate)
1708         des_x_val = y * self._des_plate_aspect_ratio # Desired element dim
1709         x = self.refine_plate_element(plate_dim, des_x_val)
1710         return x
1711
1712     def get_web_el_height(self, segment: Segment):
1713         """
1714         :param segment: Segment of a primary supporting member.
1715         :return: Quad element dimension along the height of a primary
1716                 supporting member.
1717         """
1718         hw = segment.beam_prop.hw
1719         dim = hw / self._min_num_eweb
1720         return dim
1721
1722     def get_flange_el_width(self, segment: Segment):
1723         """
1724         :param segment: Segment of a primary supporting member.
1725         :return: Flange quad element dimension across the width of the flange
1726                 of the selected segment (perpendicular to the segment direction)
1727                 based on the number of elements across the flange. For longitudinal
1728                 segments this method returns dimension dim_yf and for transverse
1729                 segments returns dimension dim_xf.
1730         """
1731         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1732         bf_net = TBeamProperty.bf_net(segment.beam_prop, corr_add)
1733
1734         if segment.beam_prop.beam_type is BeamType.T:
1735             return bf_net / (self._num_eaf * 2)
1736
1737         elif segment.beam_prop.beam_type is BeamType.L:
1738             return bf_net / self._num_eaf
1739
1740         elif segment.beam_prop.beam_type is BeamType.FB:

```

```

1741         return 0
1742
1743     def get_end1_max_flange_width(self, segment: Segment):
1744         beam_type = segment.beam_prop.beam_type
1745         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1746         eaf = self._num_eaf
1747         if beam_type is BeamType.T:
1748             self_bf_net = segment.beam_prop.bf_net(corr_add) / (eaf + 1)
1749         elif beam_type is BeamType.L:
1750             self_bf_net = segment.beam_prop.bf_net(corr_add) / eaf
1751         else:
1752             self_bf_net = 0
1753
1754         seg_end1 = self._grillage.get_parallel_segments(segment)[0]
1755
1756         if seg_end1:
1757             end1_type = seg_end1.beam_prop.beam_type
1758             if end1_type is BeamType.T:
1759                 end1_bf_net = seg_end1.beam_prop.bf_net(corr_add) / (eaf + 1)
1760             elif end1_type is BeamType.L:
1761                 end1_bf_net = seg_end1.beam_prop.bf_net(corr_add) / eaf
1762             else:
1763                 end1_bf_net = 0
1764         else:
1765             end1_bf_net = 0
1766
1767         bf_net = np.amax([self_bf_net, end1_bf_net])
1768         return bf_net
1769
1770     def get_end2_max_flange_width(self, segment: Segment):
1771         beam_type = segment.beam_prop.beam_type
1772         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
1773         eaf = self._num_eaf
1774         if beam_type is BeamType.T:
1775             self_bf_net = segment.beam_prop.bf_net(corr_add) / (eaf + 1)
1776         elif beam_type is BeamType.L:
1777             self_bf_net = segment.beam_prop.bf_net(corr_add) / eaf
1778         else:
1779             self_bf_net = 0
1780
1781         seg_end2 = self._grillage.get_parallel_segments(segment)[1]
1782
1783         if seg_end2:
1784             end2_type = seg_end2.beam_prop.beam_type
1785             if end2_type is BeamType.T:
1786                 end2_bf_net = seg_end2.beam_prop.bf_net(corr_add) / (eaf + 1)
1787             elif end2_type is BeamType.L:
1788                 end2_bf_net = seg_end2.beam_prop.bf_net(corr_add) / eaf
1789             else:
1790                 end2_bf_net = 0
1791         else:
1792             end2_bf_net = 0
1793
1794         bf_net = np.amax([self_bf_net, end2_bf_net])
1795         return bf_net
1796
1797     def get_flange_el_length(self, segment: Segment):
1798         """
1799         :param segment: Segment of a primary supporting member.
1800         :return: Maximum flange quad element length based on flange element

```

```

1801         width and maximum flange aspect ratio (parallel to the segment
1802         direction). For longitudinal segments this method returns dimension
1803         dim_xf, and for transverse segments returns dimension dim_yf.
1804     """
1805     if self.get_flange_el_width(segment) != 0:
1806         return self._flange_aspect_ratio * self.get_flange_el_width(segment)
1807     else:
1808         return 0
1809
1810 def get_min_fl_el_len(self, segment1: Segment, segment2: Segment):
1811     """
1812     :param segment1: First selected segment.
1813     :param segment2: Second selected segment.
1814     :return: Minimum value of two segment flange element lengths.
1815             If both segments do not have a flange, method returns 0.
1816     """
1817     dim_f1 = self.get_flange_el_length(segment1)
1818     dim_f2 = self.get_flange_el_length(segment2)
1819
1820     if dim_f1 != 0 and dim_f2 != 0:
1821         min_dim = np.minimum(dim_f1, dim_f2)
1822     elif dim_f1 != 0 and dim_f2 == 0:
1823         min_dim = dim_f1
1824     elif dim_f1 == 0 and dim_f2 != 0:
1825         min_dim = dim_f2
1826     else:
1827         min_dim = 0
1828
1829     return min_dim
1830
1831 def get_min_fl_el_len_between_psm(self, member1: PrimarySuppMem,
1832                                   member2: PrimarySuppMem):
1833     """
1834     :param member1: First selected Primary supporting member.
1835     :param member2: Second selected Primary supporting member.
1836     :return: Method identifies all segments between two adjacent primary
1837             supporting members and returns the minimum flange element length of
1838             all identified segments. If all flange element length values are 0,
1839             the el_length_list will be empty and this method will return 0.
1840     """
1841     segments_list = self._grillage.segments_between_psm(member1, member2)
1842     el_length_list = [self.get_flange_el_length(segment)
1843                       for segment in segments_list
1844                       if self.get_flange_el_length(segment) != 0]
1845
1846     if not el_length_list:
1847         return 0
1848     else:
1849         return np.amin(el_length_list)
1850
1851 def element_size_plating_zone_perp(self, plate: Plate):
1852     """
1853     :param plate: Selected plating zone.
1854     :return: Quad element dimension perpendicular to stiffener direction
1855             based on two criteria:
1856             1.) Number of elements between stiffeners
1857             2.) Maximum element dimension
1858     """
1859     y = self.element_size_perp_to_stiffeners(plate)
1860

```

```

1861     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
1862         max_dim = self.get_min_fl_el_len(plate.trans_seg1, plate.trans_seg2)
1863     else:
1864         max_dim = self.get_min_fl_el_len(plate.long_seg1, plate.long_seg2)
1865
1866     if y > max_dim != 0:
1867         stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
1868         y = self.refine_plate_element(stiff_spacing, max_dim)
1869     return y
1870
1871 def element_size_plating_zone_para(self, plate: Plate, plate_dim):
1872     """
1873     :param plate: Selected plating zone.
1874     :param plate_dim: Plating zone dimension parallel to stiffener direction.
1875     :return: Quad element dimension parallel to stiffener direction based
1876             on two criteria:
1877             1.) Element dimension: method element_size_para_to_stiffeners
1878             2.) Maximum element dimension: method get_min_flange_el_length
1879     """
1880     x = self.element_size_para_to_stiffeners(plate, plate_dim)
1881     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
1882         max_dim = self.get_min_fl_el_len(plate.long_seg1, plate.long_seg2)
1883     else:
1884         max_dim = self.get_min_fl_el_len(plate.trans_seg1, plate.trans_seg2)
1885
1886     if x > max_dim != 0:
1887         x = self.refine_plate_element(plate_dim, max_dim)
1888     return x
1889
1890 def element_size_plating_zone(self, plate: Plate, plate_dim):
1891     """
1892     Method for local consideration of base mesh dimensions dim_x and dim_y,
1893     for each plating zone individually.
1894
1895     :param plate: Selected plating zone.
1896     :param plate_dim: Plating zone dimension parallel to stiffener
1897                       direction. For MeshV1 this value should be calculated using method
1898                       get_reduced_plate_dim and for others using method
1899                       plate_dim_parallel_to_stiffeners.
1900     :return: Base mesh dimensions x and y that are below the maximum values
1901             based on plate aspect ratio and flange dimensions,
1902             considering each plating zone individually.
1903     """
1904     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
1905         dim_x = self.element_size_plating_zone_para(plate, plate_dim)
1906         dim_y = self.element_size_plating_zone_perp(plate)
1907     else:
1908         dim_x = self.element_size_plating_zone_perp(plate)
1909         dim_y = self.element_size_plating_zone_para(plate, plate_dim)
1910
1911     if self.element_aspect_ratio(dim_x, dim_y) > self._plate_aspect_ratio:
1912         dim_xf = self.get_min_fl_el_len(plate.long_seg1, plate.long_seg2)
1913         dim_yf = self.get_min_fl_el_len(plate.trans_seg1, plate.trans_seg2)
1914
1915         dim_x_limit = np.minimum(dim_xf, dim_y * self._plate_aspect_ratio)
1916         dim_y_limit = np.minimum(dim_yf, dim_x * self._plate_aspect_ratio)
1917
1918     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
1919         if dim_y > dim_x:
1920             stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000

```

```

1921         dim_y = self.refine_plate_element(stiff_spacing, dim_y_limit)
1922     else:
1923         dim_x = self.refine_plate_element(plate_dim, dim_x_limit)
1924
1925     elif plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
1926         if dim_y > dim_x:
1927             dim_y = self.refine_plate_element(plate_dim, dim_y_limit)
1928         else:
1929             stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
1930             dim_x = self.refine_plate_element(stiff_spacing, dim_x_limit)
1931
1932     return dim_x, dim_y
1933
1934 def calc_element_base_size(self):
1935     """
1936     :return: Calculates the quad element size based on stiffener spacing
1937             and maximum allowed aspect ratio for all plating zones.
1938             Returns dictionaries of x (dim_x) and y (dim_y) base dimensions
1939             for all plating zones.
1940     """
1941     mesh_dim_x = {} # Dimension x for all plating zones
1942     mesh_dim_y = {} # Dimension y for all plating zones
1943
1944     for plate in self._mesh_extent.all_plating_zones.values():
1945         parallel_dim = plate.plate_dim_parallel_to_stiffeners() * 1000
1946         plate_dim = self._mesh_extent.get_plate_dim(plate, parallel_dim)
1947         dim_x, dim_y = self.element_size_plating_zone(plate, plate_dim)
1948         mesh_dim_x[plate.id] = dim_x
1949         mesh_dim_y[plate.id] = dim_y
1950
1951     return mesh_dim_x, mesh_dim_y
1952
1953 def assign_base_dim_x(self, mesh_dim_x):
1954     """
1955     Method for global consideration of base mesh dimensions dim_x,
1956     for each column of plating zones on the grillage model.
1957
1958     :param mesh_dim_x: Input dictionary of quad element x dimensions based
1959                       on stiffener spacing and maximum allowed aspect ratio.
1960     :return: Assigns dimension x for each column of plating zones between
1961             transverse primary supporting members, identified using plating
1962             zones reference array based on Axis of Symmetry input.
1963             If there are no transverse stiffeners on the column of plating
1964             zones, a minimum value of all saved dim_x for plating zones
1965             between transverse primary supporting members will be used.
1966     """
1967     ref_array = self._mesh_extent.plating_zones_ref_array
1968     n_rows, n_columns = np.shape(ref_array)
1969     final_mesh_dim_x = {}
1970
1971     for column in range(1, n_columns + 1):
1972         plating_zone_IDs = ref_array[:, column - 1]
1973         plating_zones = [self._grillage.plating()[plate_id]
1974                          for plate_id in plating_zone_IDs]
1975
1976         x_list = [mesh_dim_x[plate.id] for plate in plating_zones]
1977         dim_x = np.amin(x_list)
1978         final_mesh_dim_x[column] = dim_x
1979
1980     for plate in plating_zones:

```

```

1981         if plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
1982             tran1 = self._grillage.transverse_members()[column]
1983             tran2 = self._grillage.transverse_members()[column + 1]
1984             max_x = self.get_min_fl_el_len_between_psm(tran1, tran2)
1985             dim_x = mesh_dim_x[plate.id]
1986             if dim_x > max_x != 0: # If dimension x exceeds the maximum
1987                 stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
1988                 dim_x = self.refine_plate_element(stiff_spacing, max_x)
1989                 final_mesh_dim_x[column] = dim_x
1990             else:
1991                 final_mesh_dim_x[column] = dim_x
1992             break # Stop after finding transverse stiffeners
1993
1994     return final_mesh_dim_x
1995
1996 def assign_base_dim_y(self, mesh_dim_y):
1997     """
1998     Method for global consideration of base mesh dimensions dim_y,
1999     for each row of plating zones on the grillage model.
2000
2001     :param mesh_dim_y: Input dictionary of quad element y dimensions based
2002     on stiffener spacing and maximum allowed aspect ratio.
2003     :return: Assigns dimension y for each row of plating zones between
2004     longitudinal primary supporting members, identified using plating
2005     zones reference array based on Axis of Symmetry input.
2006     If there are no longitudinal stiffeners on the column of plating
2007     zones, a minimum value of all saved dim_y for plating zones between
2008     longitudinal primary supporting members will be used.
2009     """
2010     ref_array = self._mesh_extent.plating_zones_ref_array
2011     n_rows, n_columns = np.shape(ref_array)
2012     final_mesh_dim_y = {}
2013
2014     for row in range(1, n_rows + 1):
2015         plating_zone_IDs = ref_array[row - 1, :]
2016         plating_zones = [self._grillage.plating()[plate_id]
2017                         for plate_id in plating_zone_IDs]
2018
2019         y_list = [mesh_dim_y[plate.id] for plate in plating_zones]
2020         dim_y = np.amin(y_list)
2021         final_mesh_dim_y[row] = dim_y
2022
2023         for plate in plating_zones:
2024             if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2025                 long1 = self._grillage.longitudinal_members()[row]
2026                 long2 = self._grillage.longitudinal_members()[row + 1]
2027                 max_y = self.get_min_fl_el_len_between_psm(long1, long2)
2028                 dim_y = mesh_dim_y[plate.id]
2029                 if dim_y > max_y != 0: # If dimension y exceeds the maximum
2030                     stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
2031                     dim_y = self.refine_plate_element(stiff_spacing, max_y)
2032                     final_mesh_dim_y[row] = dim_y
2033                 else: # If dim_y does not exceed the maximum max_y
2034                     final_mesh_dim_y[row] = dim_y
2035                 break # Stop after finding longitudinal stiffeners
2036
2037     return final_mesh_dim_y
2038
2039 def get_base_dim_x(self, plate: Plate):
2040     """

```

```

2041         :param plate: Selected plating zone.
2042         :return: Base quad element x dimension for any plating zone. Returns the
2043                 value based on longitudinal segment ID from the list of all x
2044                 dimensions: mesh_dim_x.
2045         """
2046         if self._mesh_dim_x:
2047             segment_id = plate.long_seg1.id
2048             return self._mesh_dim_x[segment_id]
2049         else:
2050             raise BaseMeshDimensionX
2051
2052     def get_base_dim_y(self, plate: Plate):
2053         """
2054         :param plate: Selected plating zone.
2055         :return: Base quad element y dimension for any plating zone. Returns the
2056                 value based on transverse segment ID from the list of all y
2057                 dimensions: mesh_dim_y.
2058         """
2059         if self._mesh_dim_y:
2060             segment_id = plate.trans_seg1.id
2061             return self._mesh_dim_y[segment_id]
2062         else:
2063             raise BaseMeshDimensionY
2064
2065     def get_flange_element_num(self, segment: Segment):
2066         """
2067         :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2068         :return: Number of elements across the flange.
2069                 Method returns 0 for FB beam type.
2070         """
2071         flange_element_width = self.get_flange_el_width(segment)
2072         if flange_element_width == 0:
2073             return 0
2074         else:
2075             return self._num_eaf
2076
2077     def transition_dim_x(self, plate: Plate):
2078         """
2079         Method for local consideration of transition mesh dimensions dim_tr_x
2080         for each plating zone individually.
2081
2082         If stiffener direction is transverse, there are transition elements
2083         next to transverse segments.
2084
2085         :param plate: Selected plating zone.
2086
2087         n_elem - Number of elements with dimension dim_x that fit inside
2088                 the remaining distance
2089         """
2090         dim_tr_x = 0
2091
2092         if plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
2093             dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2094             dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2095             stiff_offset = plate.get_equal_stiffener_offset() * 1000
2096
2097             if stiff_offset < 0:
2098                 raise NegativeRemainingDistance(plate.id)
2099
2100             n_elem = np.floor(stiff_offset / dim_x)

```

```

2101         if n_elem == 0:
2102             dim_tr_x = stiff_offset
2103         else:
2104             dim_tr_x = stiff_offset - n_elem * dim_x
2105
2106         if dim_tr_x != 0:
2107             ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_x, dim_y)
2108             if ar > self._plate_aspect_ratio and stiff_offset > dim_x:
2109                 dim_tr_x += dim_x
2110
2111         return dim_tr_x, dim_tr_x
2112
2113 def transition_dim_y(self, plate: Plate):
2114     """
2115     Method for local consideration of transition mesh dimensions dim_tr_y
2116     for each plating zone individually.
2117
2118     If stiffener direction is longitudinal, there are transition elements
2119     next to longitudinal segments.
2120
2121     :param plate: Selected plating zone.
2122
2123     n_elem - Number of elements with dimension dim_y that fit inside
2124     the remaining distance
2125     """
2126     dim_tr_y = 0
2127
2128     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2129         dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2130         dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2131         stiff_offset = plate.get_equal_stiffener_offset() * 1000
2132
2133         if stiff_offset < 0:
2134             raise NegativeRemainingDistance(plate.id)
2135
2136         n_elem = np.floor(stiff_offset / dim_y)
2137         if n_elem == 0:
2138             dim_tr_y = stiff_offset
2139         else:
2140             dim_tr_y = stiff_offset - n_elem * dim_y
2141
2142         if dim_tr_y != 0:
2143             ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_y, dim_x)
2144             if ar > self._plate_aspect_ratio and stiff_offset > dim_y:
2145                 dim_tr_y += dim_y
2146
2147         return dim_tr_y, dim_tr_y
2148
2149 def assign_transition_dim_x(self):
2150     """
2151     Method for global consideration of transition mesh dimension x, for each
2152     column of plating zones.
2153
2154     :return: Assigns transition element x dimension for each column of
2155     plating zones between transverse primary supporting members,
2156     identified using plating zones reference array based on
2157     Axis of Symmetry.
2158     """
2159     ref_array = self._mesh_extent.plating_zones_ref_array
2160     n_rows, n_columns = np.shape(ref_array)

```



```

2161     tr_el_dim_x = np.zeros((2, n_columns))
2162
2163     for column in range(1, n_columns + 1):
2164         plating_zone_IDs = ref_array[:, column - 1]
2165         plating_zones = [self._grillage.plating()[plate_id] for
2166                         plate_id in plating_zone_IDs]
2167         for plate in plating_zones:
2168             tr_dim_x1, tr_dim_x2 = self.transition_dim_x(plate)
2169             tr_el_dim_x[0, column - 1] = tr_dim_x1
2170             tr_el_dim_x[1, column - 1] = tr_dim_x2
2171             if plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
2172                 break
2173
2174     return tr_el_dim_x
2175
2176 def assign_transition_dim_y(self):
2177     """
2178     Method for global consideration of transition mesh dimension y, for
2179     each row of plating zones.
2180
2181     :return: Assigns transition element y dimension for each row of plating
2182             zones between longitudinal primary supporting members,
2183             identified using plating zones reference array based on
2184             Axis of Symmetry.
2185     """
2186     ref_array = self._mesh_extent.plating_zones_ref_array
2187     n_rows, n_columns = np.shape(ref_array)
2188     tr_el_dim_y = np.zeros((2, n_rows))
2189
2190     for row in range(1, n_rows + 1):
2191         plating_zone_IDs = ref_array[row - 1, :]
2192         plating_zones = [self._grillage.plating()[plate_id] for
2193                         plate_id in plating_zone_IDs]
2194         for plate in plating_zones:
2195             tr_dim_y1, tr_dim_y2 = self.transition_dim_y(plate)
2196             tr_el_dim_y[0, row - 1] = tr_dim_y1
2197             tr_el_dim_y[1, row - 1] = tr_dim_y2
2198             if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2199                 break
2200
2201     return tr_el_dim_y
2202
2203 def get_tr_dim_x(self, plate: Plate):
2204     """
2205     :param plate: Selected plating zone.
2206     :return: Transition quad element x dimensions for any plating zone.
2207             Returns the value based on longitudinal segment ID. First value
2208             (dim_1) represents the element closest to the first transverse
2209             segment (trans_seg_1) and the second (dim_2) represents the element
2210             closest to the second transverse segment (trans_seg_2)
2211             that define the plating zone.
2212     """
2213     segment_id = plate.long_seg1.id
2214     dim_id = segment_id - 1
2215     dim = self.assign_transition_dim_x()
2216     dim_1 = dim[0][dim_id]
2217     dim_2 = dim[1][dim_id]
2218     return dim_1, dim_2
2219
2220 def get_tr_dim_y(self, plate: Plate):

```

```

2221     """
2222     :param plate: Selected plating zone.
2223     :return: Transition quad element x dimensions for any plating zone.
2224             Returns the value based on transverse segment ID. First value
2225             (dim_1) represents the element closest to the first longitudinal
2226             segment (long_seg_1) and the second (dim_2) represents the element
2227             closest to the second longitudinal segment (long_seg_2)
2228             that define the plating zone.
2229     """
2230     segment_id = plate.trans_seg1.id
2231     dim_id = segment_id - 1
2232     dim = self.assign_transition_dim_y()
2233     dim_1 = dim[0][dim_id]
2234     dim_2 = dim[1][dim_id]
2235     return dim_1, dim_2
2236
2237 def long_split_element(self):
2238     """
2239     :return: True if a quad element between stiffeners is split in half by a
2240             longitudinal Axis of Symmetry on plating zones in long_e_split_zone
2241     """
2242     for plate in self.mesh_extent.long_e_split_zone.values():
2243         stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
2244         base_dim = self.get_base_dim_y(plate)
2245         n_elem = np.round(stiff_spacing / base_dim)
2246         if np.mod(n_elem, 2) != 0:
2247             return True
2248         else:
2249             return False
2250     else:
2251         return False
2252
2253 def tran_split_element(self):
2254     """
2255     :return: True if a quad element between stiffeners is split in half by a
2256             transverse Axis of Symmetry on plating zones in tran_e_split_zone.
2257     """
2258     for plate in self.mesh_extent.tran_e_split_zone.values():
2259         stiff_spacing = plate.get_stiffener_spacing() * 1000
2260         base_dim = self.get_base_dim_x(plate)
2261         n_elem = np.round(stiff_spacing / base_dim)
2262         if np.mod(n_elem, 2) != 0:
2263             return True
2264         else:
2265             return False
2266     else:
2267         return False
2268
2269 def get_base_element_number(self, plate: Plate):
2270     """
2271     :param plate: Selected plating zone.
2272     :return: Number of base size elements along x and y dimension of
2273             the plating zone.
2274
2275     Index reference:
2276         x - number of elements or dimension in the longitudinal direction
2277         y - number of elements or dimension in the transverse direction
2278     """
2279     L = self._mesh_extent.get_long_plate_dim(plate)
2280     B = self._mesh_extent.get_tran_plate_dim(plate)

```

```

2281
2282     dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2283     dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2284
2285     tr_el_dim_x1, tr_el_dim_x2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2286     tr_el_dim_y1, tr_el_dim_y2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2287
2288     if plate.id in self._mesh_extent.long_half_plate_zones:
2289         tr_el_dim_y2 = 0
2290
2291     elif plate.id in self._mesh_extent.tran_half_plate_zones:
2292         tr_el_dim_x2 = 0
2293
2294     elif plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2295         tr_el_dim_x2 = 0
2296         tr_el_dim_y2 = 0
2297
2298     dim_x_range = L - tr_el_dim_x1 - tr_el_dim_x2
2299     dim_y_range = B - tr_el_dim_y1 - tr_el_dim_y2
2300
2301     n_elem_x = dim_x_range / dim_x
2302     n_elem_y = dim_y_range / dim_y
2303
2304     if plate in self.mesh_extent.tran_e_split_zone.values() \
2305         and self.tran_split_element():
2306         n_dim_x = np.round(n_elem_x - 0.5)
2307     else:
2308         n_dim_x = np.round(n_elem_x) # Number of elements with dim_x
2309
2310     if plate in self.mesh_extent.long_e_split_zone.values() \
2311         and self.long_split_element():
2312         n_dim_y = np.round(n_elem_y - 0.5)
2313     else:
2314         n_dim_y = np.round(n_elem_y) # Number of elements with dim_y
2315
2316     return n_dim_x, n_dim_y
2317
2318 def get_long_split_element_num(self, plate: Plate):
2319     """
2320     :param plate: Selected plating zone.
2321     :return: Number of base size elements being split in half by
2322             longitudinal Axis of Symmetry.
2323     """
2324     if plate in self._mesh_extent.long_e_split_zone.values() \
2325         and self.long_split_element():
2326         return 1
2327     else:
2328         return 0
2329
2330 def get_tran_split_element_num(self, plate: Plate):
2331     """
2332     :param plate: Selected plating zone.
2333     :return: Number of base size elements being split in half by
2334             transverse Axis of Symmetry.
2335     """
2336     if plate in self._mesh_extent.tran_e_split_zone.values() \
2337         and self.tran_split_element():
2338         return 1
2339     else:
2340         return 0

```

```

2341
2342 def get_long_tr_element_num(self, plate: Plate, segment: Segment):
2343     """
2344     :param plate: Selected plating zone.
2345     :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2346     :return: Number of transition elements between longitudinal segment
2347             and base elements.
2348     """
2349     tr_element_dim_1, tr_element_dim_2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2350     if segment is plate.long_seg1 and tr_element_dim_1 != 0:
2351         return 1
2352     elif segment is plate.long_seg2 and tr_element_dim_2 != 0:
2353         return 1
2354     else:
2355         return 0
2356
2357 def get_tran_tr_element_num(self, plate: Plate, segment: Segment):
2358     """
2359     :param plate: Selected plating zone.
2360     :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2361     :return: Number of transition elements between transverse segment
2362             and base elements.
2363     """
2364     tr_element_dim_1, tr_element_dim_2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2365     if segment is plate.trans_seg1 and tr_element_dim_1 != 0:
2366         return 1
2367     elif segment is plate.trans_seg2 and tr_element_dim_2 != 0:
2368         return 1
2369     else:
2370         return 0
2371
2372 def plate_edge_node_spacing_x(self, plate: Plate):
2373     """
2374     :param plate: Selected plating zone.
2375     :return: Distance between plate nodes along longitudinal edges
2376             (along x axis), in order, for the selected plating zone.
2377     """
2378     base_dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2379     tr_element_dim_x1, tr_element_dim_x2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2380
2381     tr_el_num_seg_1 = self.get_tran_tr_element_num(plate, plate.trans_seg1)
2382     tr_el_num_seg_2 = self.get_tran_tr_element_num(plate, plate.trans_seg2)
2383     base_mesh_element_num = self.get_base_element_number(plate)[0]
2384     split_element_number = self.get_tran_split_element_num(plate)
2385
2386     if plate.id in self._mesh_extent.tran_half_plate_zones or \
2387         plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2388         tr_el_num_seg_2 = 0
2389
2390     x_spacing = {}
2391     self.save_node_spacing(x_spacing, tr_el_num_seg_1, tr_element_dim_x1)
2392     self.save_node_spacing(x_spacing, base_mesh_element_num, base_dim_x)
2393     self.save_node_spacing(x_spacing, split_element_number, base_dim_x / 2)
2394     self.save_node_spacing(x_spacing, tr_el_num_seg_2, tr_element_dim_x2)
2395
2396     return x_spacing
2397
2398 def plate_edge_node_spacing_y(self, plate: Plate):
2399     """
2400     :param plate: Selected plating zone.

```

```

2401         :return: Distance between plate nodes along transverse edges
2402             (along y axis), in order, for the selected plating zone.
2403         """
2404         base_dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2405         tr_element_dim_y1, tr_element_dim_y2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2406
2407         tr_el_num_seg_1 = self.get_long_tr_element_num(plate, plate.long_seg1)
2408         tr_el_num_seg_2 = self.get_long_tr_element_num(plate, plate.long_seg2)
2409         base_mesh_element_num = self.get_base_element_number(plate)[1]
2410         split_element_number = self.get_long_split_element_num(plate)
2411
2412         if plate.id in self._mesh_extent.long_half_plate_zones or \
2413            plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2414             tr_el_num_seg_2 = 0
2415
2416         y_spacing = {}
2417         self.save_node_spacing(y_spacing, tr_el_num_seg_1, tr_element_dim_y1)
2418         self.save_node_spacing(y_spacing, base_mesh_element_num, base_dim_y)
2419         self.save_node_spacing(y_spacing, split_element_number, base_dim_y / 2)
2420         self.save_node_spacing(y_spacing, tr_el_num_seg_2, tr_element_dim_y2)
2421
2422         return y_spacing
2423
2424     def opposite_flange_width(self, segment: Segment):
2425         """
2426         :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2427         :return: Maximum net flange width of both perpendicular segments
2428             connected at the intersection of primary supporting members.
2429             Returns value bf_net at both ends of the selected segment.
2430             Includes checks for beam type and flange direction at both ends.
2431         """
2432         corr_add = self._grillage.corrosion_addition()[1]
2433         end1, end2 = self._grillage.get_perpendicular_segments(segment)
2434         segment_at_end1 = end1[0]
2435         segment_at_end2 = end2[0]
2436
2437         bf_end1 = [segment.beam_prop.bf_net(corr_add) for segment in end1]
2438         bf_end2 = [segment.beam_prop.bf_net(corr_add) for segment in end2]
2439         bf_max1 = np.amax(bf_end1)
2440         bf_max2 = np.amax(bf_end2)
2441
2442         t_beam_at_end1 = [segment.beam_prop.beam_type for segment in end1 if
2443                          segment.beam_prop.beam_type is BeamType.T]
2444
2445         t_beam_at_end2 = [segment.beam_prop.beam_type for segment in end2 if
2446                          segment.beam_prop.beam_type is BeamType.T]
2447
2448         if any(t_beam_at_end1):
2449             bf_max1 = bf_max1 / 2
2450         if any(t_beam_at_end2):
2451             bf_max2 = bf_max2 / 2
2452
2453         l_beam_at_end1 = [segment.beam_prop.beam_type for segment in end1
2454                          if segment.beam_prop.beam_type is BeamType.L]
2455         l_beam_at_end2 = [segment.beam_prop.beam_type for segment in end2
2456                          if segment.beam_prop.beam_type is BeamType.L]
2457
2458         flange_dir1 = segment_at_end1.primary_supp_mem.flange_direction
2459         flange_dir2 = segment_at_end2.primary_supp_mem.flange_direction
2460         central_segment = self._grillage.central_segment(segment)

```

```

2461
2462     # End 1
2463     if flange_dir1 is FlangeDirection.INWARD \
2464         and any(l_beam_at_end1) and not t_beam_at_end1 \
2465         and segment_at_end1.primary_supp_mem.rel_dist > 0.5 \
2466         and not central_segment:
2467         bf_max1 = 0
2468
2469     if flange_dir1 is FlangeDirection.OUTWARD \
2470         and any(l_beam_at_end1) and not t_beam_at_end1 \
2471         and segment_at_end1.primary_supp_mem.rel_dist < 0.5 \
2472         and not central_segment:
2473         bf_max1 = 0
2474
2475     # End 2
2476     if flange_dir2 is FlangeDirection.INWARD \
2477         and any(l_beam_at_end2) and not t_beam_at_end2 \
2478         and segment_at_end2.primary_supp_mem.rel_dist < 0.5 \
2479         and not central_segment:
2480         bf_max2 = 0
2481
2482     if flange_dir2 is FlangeDirection.OUTWARD \
2483         and any(l_beam_at_end2) and not t_beam_at_end2 \
2484         and segment_at_end2.primary_supp_mem.rel_dist > 0.5 \
2485         and not central_segment:
2486         bf_max2 = 0
2487
2488     return bf_max1, bf_max2
2489
2490 def opposite_flange_element_num(self, segment: Segment):
2491     """
2492     :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2493     :return: Number of elements across the flange of a perpendicular
2494             segment that influences the FE mesh of the selected segment.
2495             Method returns values for both ends of the selected segment.
2496             Returns 0 for FB beam type.
2497     """
2498     bf_max1, bf_max2 = self.opposite_flange_width(segment)
2499     if bf_max1 == 0 and bf_max2 == 0:
2500         return 0, 0
2501     elif bf_max1 == 0 and bf_max2 != 0:
2502         return 0, self._num_eaf
2503     elif bf_max1 != 0 and bf_max2 == 0:
2504         return self._num_eaf, 0
2505     else:
2506         return self._num_eaf, self._num_eaf
2507
2508 def transition_dim(self, base, plate_tr, fl_width):
2509     if plate_tr == 0:
2510         if base > fl_width:
2511             flange_tr_dim = base - fl_width
2512         else:
2513             flange_tr_dim = 2 * base - fl_width
2514     else:
2515         if plate_tr > fl_width:
2516             flange_tr_dim = plate_tr - fl_width
2517         else:
2518             flange_tr_dim = plate_tr + base - fl_width
2519
2520     if flange_tr_dim != 0:

```

```

2521         ar = self.element_aspect_ratio(flange_tr_dim, fl_width)
2522         if ar > self._flange_aspect_ratio and flange_tr_dim < fl_width:
2523             flange_tr_dim += base
2524
2525     return flange_tr_dim
2526
2527 def flange_transition_dim(self, segment: Segment):
2528     """
2529     :param segment: Selected segment.
2530     :return: Transition element dimensions for any segment on both ends.
2531     """
2532     direction = segment.primary_supp_mem.direction
2533     el_width_1, el_width_2 = self.opposite_flange_width(segment)
2534     plate_list = self._grillage.segment_common_plates(segment)
2535     plate = plate_list[0]
2536
2537     if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2538         base_dim = self.get_base_dim_x(plate)
2539         plate_tr_1, plate_tr_2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2540     else:
2541         base_dim = self.get_base_dim_y(plate)
2542         plate_tr_1, plate_tr_2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2543
2544     fl_tr_1 = self.transition_dim(base_dim, plate_tr_1, el_width_1)
2545     fl_tr_2 = self.transition_dim(base_dim, plate_tr_2, el_width_2)
2546
2547     return fl_tr_1, fl_tr_2
2548
2549 def flange_base_element_num(self, segment: Segment):
2550     """
2551     :param segment: Selected segment of a primary supporting member.
2552     :return: Number of base size elements the axial direction of the
2553             selected segment.
2554
2555     Index reference:
2556         x - number of elements or dimension in the longitudinal direction
2557         y - number of elements or dimension in the transverse direction
2558     """
2559     plate_list = self._grillage.segment_common_plates(segment)
2560     plate = plate_list[0]
2561     direction = segment.primary_supp_mem.direction
2562     segment_len = segment.segment_len() * 1000
2563     fl_tr_1, fl_tr_2 = self.flange_transition_dim(segment)
2564     fl_el_width_1, fl_el_width_2 = self.opposite_flange_width(segment)
2565
2566     if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2567         base_dim = self.get_base_dim_x(plate)
2568         split_num = self.get_tran_split_element_num(plate)
2569     else:
2570         base_dim = self.get_base_dim_y(plate)
2571         split_num = self.get_long_split_element_num(plate)
2572
2573     if segment in self.mesh_extent.half_segments.values():
2574         segment_len = segment_len / 2
2575         fl_tr_2 = 0
2576         fl_el_width_2 = 0
2577
2578     base_range = segment_len - fl_el_width_1 - fl_tr_1 - fl_tr_2
2579     base_range -= fl_el_width_2 + split_num * base_dim * 0.5
2580     base_dim_num = np.round(base_range / base_dim)

```

```

2581         return base_dim_num
2582
2583     def get_flange_transition_num(self, segment: Segment):
2584         """
2585         :param segment: Selected segment.
2586         :return: Number of transition elements on the segment flange.
2587                 Returns value for both ends of the selected segment.
2588         """
2589         tr_el_dim_1, tr_el_dim_2 = self.flange_transition_dim(segment)
2590
2591         if tr_el_dim_1 == 0:
2592             tr_num_edge1 = 0
2593         else:
2594             tr_num_edge1 = 1
2595
2596         if tr_el_dim_2 == 0:
2597             tr_num_edge2 = 0
2598         else:
2599             tr_num_edge2 = 1
2600
2601         return tr_num_edge1, tr_num_edge2
2602
2603     def flange_edge_node_spacing(self, segment: Segment):
2604         pass
2605
2606     def calc_plate_start_node_ids(self):
2607         """
2608         :return: Calculates starting node ID for all meshed plating zone and
2609                 saves first node ID into start_nodes.
2610         """
2611         node_id_counter = 1
2612         for plate in self._mesh_extent.all_plating_zones.values():
2613             edge_nodes_x = self.plate_edge_node_spacing_x(plate)
2614             edge_nodes_y = self.plate_edge_node_spacing_y(plate)
2615             column_limit = len(edge_nodes_x) + 1
2616             row_limit = len(edge_nodes_y) + 1
2617             total = row_limit * column_limit
2618             self.start_nodes[plate.id] = node_id_counter
2619             node_id_counter += total
2620
2621     def calculate_mesh_dimensions(self):
2622         """
2623         :return: Calculates all element dimensions and saves them to
2624                 dictionaries mesh_dim_x, mesh_dim_y. These values need to be
2625                 calculated only once and will be used for all node and element
2626                 generation. Contains check of chosen Axis of Symmetry override.
2627         """
2628         discovered = self._mesh_extent.aos_input
2629         override = self._mesh_extent.axis_of_symm_override
2630         mc = self._mesh_extent.model_check
2631         mc.symmetry_override_check(discovered, override)
2632
2633         if override:
2634             print("Selected Axis of Symmetry override:", override.name)
2635             print("Automatic symmetry discovery would have selected:",
2636                   discovered.name)
2637         else:
2638             print("Automatically discovered grillage model symmetry:",
2639                   discovered.name)
2640

```



```

2641     self._mesh_extent.grillage_mesh_extent()
2642     base_dim_x, base_dim_y = self.calc_element_base_size()
2643     self.mesh_dim_x = self.assign_base_dim_x(base_dim_x)
2644     self.mesh_dim_y = self.assign_base_dim_y(base_dim_y)
2645     self.calc_plate_start_node_ids()
2646
2647
2648     class ElementSizeV1(MeshSize):
2649         def __init__(self, mesh_extent: MeshExtent,
2650                     min_num_ebs: int,
2651                     min_num_eweb: int,
2652                     num_eaf: int,
2653                     flange_aspect_ratio: float,
2654                     plate_aspect_ratio: float,
2655                     des_plate_aspect_ratio: float):
2656             """
2657             Class for calculating finite element dimensions
2658             specific to meshing variant V1.
2659
2660             Mesh variant V1 reflects primary supporting member flange elements
2661             onto plating and has the following limitations:
2662
2663                 1.) Flange width of a primary supporting member has to be constant.
2664                 2.) All primary supporting members need to have the same web height.
2665                 3.) Flange element overlap has to be in the same plane.
2666                 4.) Grillage plating can not be defined with any camber.
2667             """
2668             super().__init__(mesh_extent, min_num_ebs, min_num_eweb, num_eaf,
2669                             flange_aspect_ratio, plate_aspect_ratio, des_plate_aspect_ratio)
2670
2671         def get_reduced_plate_dim(self, plate: Plate):
2672             """
2673             :param plate: Selected plating zone.
2674             :return: Reduced plate dimensions based on plate stiffener orientation
2675                     and flange width for mesh variant V1.
2676             """
2677             n_eaf = self._num_eaf
2678             if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2679                 L = plate.plate_longitudinal_dim() * 1000
2680                 dim_xf1 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg1) * n_eaf
2681                 dim_xf2 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg2) * n_eaf
2682                 L_red = L - dim_xf1 - dim_xf2
2683                 return L_red
2684
2685             elif plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
2686                 B = plate.plate_transverse_dim() * 1000
2687                 dim_yf1 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg1) * n_eaf
2688                 dim_yf2 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg2) * n_eaf
2689                 B_red = B - dim_yf1 - dim_yf2
2690                 return B_red
2691
2692         def calc_element_base_size(self):
2693             """
2694             Difference in this method specific to mesh variant V1 is in plate
2695             dimension plate_dim used for calculating base mesh dimensions.
2696             If flange elements are reflected onto plating mesh,
2697             a reduced plate dimension should be used.
2698
2699             :return: Calculates the quad element size based on stiffener spacing
2700                     and maximum allowed aspect ratio for all plating zones. Returns

```

```

2701         dictionaries of x and y base dimensions for all plating zones.
2702     """
2703     mesh_dim_x = {} # Dimension x for all plating zones
2704     mesh_dim_y = {} # Dimension y for all plating zones
2705
2706     for plate in self._mesh_extent.all_plating_zones.values():
2707         reduced_dim = self.get_reduced_plate_dim(plate)
2708         plate_dim = self._mesh_extent.get_plate_dim(plate, reduced_dim)
2709         dim_x, dim_y = self.element_size_plating_zone(plate, plate_dim)
2710         mesh_dim_x[plate.id] = dim_x
2711         mesh_dim_y[plate.id] = dim_y
2712
2713     return mesh_dim_x, mesh_dim_y
2714
2715 def transition_dim_x(self, plate: Plate):
2716     """
2717     Method for local consideration of transition mesh dimensions dim_tr_x
2718     for each plating zone individually. Specific to meshing variant V1
2719
2720     If stiffener direction is transverse, there are transition elements
2721     next to transverse segments.
2722
2723     :param plate: Selected plating zone.
2724
2725     n_elem - Number of elements with dimension dim_x that fit inside
2726     the remaining distance
2727     """
2728     dim_tr_x1 = 0
2729     dim_tr_x2 = 0
2730
2731     if plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
2732         dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2733         dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2734         stiff_offset = plate.get_equal_stiffener_offset() * 1000
2735         n_eaf = self._num_eaf
2736
2737         flange_width1 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg1) * n_eaf
2738         flange_width2 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg2) * n_eaf
2739         remaining_dist1 = stiff_offset - flange_width1
2740         remaining_dist2 = stiff_offset - flange_width2
2741
2742         if remaining_dist1 < 0 or remaining_dist2 < 0:
2743             raise NegativeRemainingDistance(plate.id)
2744
2745         n_elem1 = np.floor(remaining_dist1 / dim_x)
2746         n_elem2 = np.floor(remaining_dist2 / dim_x)
2747
2748         if n_elem1 == 0:
2749             dim_tr_x1 = stiff_offset - flange_width1
2750         else:
2751             dim_tr_x1 = stiff_offset - n_elem1 * dim_x - flange_width1
2752
2753         if n_elem2 == 0:
2754             dim_tr_x2 = stiff_offset - flange_width2
2755         else:
2756             dim_tr_x2 = stiff_offset - n_elem2 * dim_x - flange_width2
2757
2758         if dim_tr_x1 != 0:
2759             ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_x1, dim_y)
2760

```

```

2761         if ar > self._plate_aspect_ratio and remaining_dist1 > dim_x:
2762             dim_tr_x1 += dim_x
2763
2764         if dim_tr_x2 != 0:
2765             ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_x2, dim_y)
2766             if ar > self._plate_aspect_ratio and remaining_dist2 > dim_x:
2767                 dim_tr_x2 += dim_x
2768
2769         return dim_tr_x1, dim_tr_x2
2770
2771 def transition_dim_y(self, plate: Plate):
2772     """
2773     Method for local consideration of transition mesh dimensions dim_tr_y
2774     for each plating zone individually. Specific to meshing variant V1.
2775
2776     If stiffener direction is longitudinal, there are transition elements
2777     next to longitudinal segments.
2778
2779     :param plate: Selected plating zone.
2780
2781     n_elem - Number of elements with dimension dim_y that fit inside
2782     the remaining distance
2783     """
2784     dim_tr_y1 = 0
2785     dim_tr_y2 = 0
2786
2787     if plate.stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2788         dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2789         dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2790         stiff_offset = plate.get_equal_stiffener_offset() * 1000
2791         n_eaf = self._num_eaf
2792
2793         flange_width1 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg1) * n_eaf
2794         flange_width2 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg2) * n_eaf
2795         remaining_dist1 = stiff_offset - flange_width1
2796         remaining_dist2 = stiff_offset - flange_width2
2797
2798         if remaining_dist1 < 0 or remaining_dist2 < 0:
2799             raise NegativeRemainingDistance(plate.id)
2800
2801         n_elem1 = np.floor(remaining_dist1 / dim_y)
2802         n_elem2 = np.floor(remaining_dist2 / dim_y)
2803
2804         if n_elem1 == 0:
2805             dim_tr_y1 = stiff_offset - flange_width1
2806         else:
2807             dim_tr_y1 = stiff_offset - n_elem1 * dim_y - flange_width1
2808
2809         if n_elem2 == 0:
2810             dim_tr_y2 = stiff_offset - flange_width2
2811         else:
2812             dim_tr_y2 = stiff_offset - n_elem2 * dim_y - flange_width2
2813
2814         if dim_tr_y1 != 0:
2815             ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_y1, dim_x)
2816             if ar > self._plate_aspect_ratio and remaining_dist1 > dim_y:
2817                 dim_tr_y1 += dim_y
2818
2819         if dim_tr_y2 != 0:

```

```

2821         ar = self.element_aspect_ratio(dim_tr_y2, dim_x)
2822         if ar > self._plate_aspect_ratio and remaining_dist2 > dim_y:
2823             dim_tr_y2 += dim_y
2824
2825     return dim_tr_y1, dim_tr_y2
2826
2827 def get_base_element_number(self, plate: Plate):
2828     """
2829     :param plate: Selected plating zone.
2830     :return: Number of base size elements along x and y dimension of
2831             the plating zone.
2832
2833     Index reference:
2834         x - number of elements or dimension in the longitudinal direction
2835         y - number of elements or dimension in the transverse direction
2836     """
2837     L = self._mesh_extent.get_long_plate_dim(plate)
2838     B = self._mesh_extent.get_tran_plate_dim(plate)
2839     n_eaf = self._num_eaf
2840     dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2841     dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2842
2843     tr_el_dim_x1, tr_el_dim_x2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2844     tr_el_dim_y1, tr_el_dim_y2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2845
2846     fl_dim_x1 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg1) * n_eaf
2847     fl_dim_x2 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg2) * n_eaf
2848     fl_dim_y1 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg1) * n_eaf
2849     fl_dim_y2 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg2) * n_eaf
2850
2851     if plate.id in self._mesh_extent.long_half_plate_zones:
2852         fl_dim_y2 = 0
2853         tr_el_dim_y2 = 0
2854
2855     elif plate.id in self._mesh_extent.tran_half_plate_zones:
2856         fl_dim_x2 = 0
2857         tr_el_dim_x2 = 0
2858
2859     elif plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2860         fl_dim_x2 = 0
2861         tr_el_dim_x2 = 0
2862         fl_dim_y2 = 0
2863         tr_el_dim_y2 = 0
2864
2865     dim_x_range = L - tr_el_dim_x1 - tr_el_dim_x2 - fl_dim_x1 - fl_dim_x2
2866     dim_y_range = B - tr_el_dim_y1 - tr_el_dim_y2 - fl_dim_y1 - fl_dim_y2
2867
2868     n_elem_x = dim_x_range / dim_x
2869     n_elem_y = dim_y_range / dim_y
2870
2871     if plate in self.mesh_extent.tran_e_split_zone.values() \
2872         and self.tran_split_element():
2873         n_dim_x = np.round(n_elem_x - 0.5)
2874     else:
2875         n_dim_x = np.round(n_elem_x) # Number of elements with dim_x
2876
2877     if plate in self.mesh_extent.long_e_split_zone.values() \
2878         and self.long_split_element():
2879         n_dim_y = np.round(n_elem_y - 0.5)
2880     else:

```

```

2881         n_dim_y = np.round(n_elem_y) # Number of elements with dim_y
2882
2883     return n_dim_x, n_dim_y
2884
2885 def plate_edge_node_spacing_x(self, plate: Plate):
2886     """
2887     :param plate: Selected plating zone.
2888     :return: Distance between plate nodes along longitudinal edges
2889             (along x axis), in order, for the selected plating zone.
2890     """
2891     fl_dim_x1 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg1)
2892     fl_dim_x2 = self.get_flange_el_width(plate.trans_seg2)
2893     base_dim_x = self.get_base_dim_x(plate)
2894     tr_element_dim_x1, tr_element_dim_x2 = self.get_tr_dim_x(plate)
2895
2896     tr_el_num_seg_1 = self.get_tran_tr_element_num(plate, plate.trans_seg1)
2897     tr_el_num_seg_2 = self.get_tran_tr_element_num(plate, plate.trans_seg2)
2898     flange_el_num_tran_seg1 = self.get_flange_element_num(plate.trans_seg1)
2899     flange_el_num_tran_seg2 = self.get_flange_element_num(plate.trans_seg2)
2900     base_mesh_element_num = self.get_base_element_number(plate)[0]
2901     split_element_number = self.get_tran_split_element_num(plate)
2902
2903     if plate.id in self._mesh_extent.tran_half_plate_zones or \
2904         plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2905         flange_el_num_tran_seg2 = 0
2906         tr_el_num_seg_2 = 0
2907
2908     x_spacing = {}
2909     self.save_node_spacing(x_spacing, flange_el_num_tran_seg1, fl_dim_x1)
2910     self.save_node_spacing(x_spacing, tr_el_num_seg_1, tr_element_dim_x1)
2911     self.save_node_spacing(x_spacing, base_mesh_element_num, base_dim_x)
2912     self.save_node_spacing(x_spacing, split_element_number, base_dim_x / 2)
2913     self.save_node_spacing(x_spacing, tr_el_num_seg_2, tr_element_dim_x2)
2914     self.save_node_spacing(x_spacing, flange_el_num_tran_seg2, fl_dim_x2)
2915
2916     return x_spacing
2917
2918 def plate_edge_node_spacing_y(self, plate: Plate):
2919     """
2920     :param plate: Selected plating zone.
2921     :return: Distance between plate nodes along transverse edges
2922             (along y axis), in order, for the selected plating zone.
2923     """
2924     fl_dim_y1 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg1)
2925     fl_dim_y2 = self.get_flange_el_width(plate.long_seg2)
2926     base_dim_y = self.get_base_dim_y(plate)
2927     tr_element_dim_y1, tr_element_dim_y2 = self.get_tr_dim_y(plate)
2928
2929     tr_el_num_seg_1 = self.get_long_tr_element_num(plate, plate.long_seg1)
2930     tr_el_num_seg_2 = self.get_long_tr_element_num(plate, plate.long_seg2)
2931     flange_el_num_long_seg1 = self.get_flange_element_num(plate.long_seg1)
2932     flange_el_num_long_seg2 = self.get_flange_element_num(plate.long_seg2)
2933     base_mesh_element_num = self.get_base_element_number(plate)[1]
2934     split_element_number = self.get_long_split_element_num(plate)
2935
2936     if plate.id in self._mesh_extent.long_half_plate_zones or \
2937         plate.id in self._mesh_extent.quarter_plate_zone:
2938         flange_el_num_long_seg2 = 0
2939         tr_el_num_seg_2 = 0
2940

```

```

2941     y_spacing = {}
2942
2943     self.save_node_spacing(y_spacing, flange_el_num_long_seg1, fl_dim_y1)
2944     self.save_node_spacing(y_spacing, tr_el_num_seg_1, tr_element_dim_y1)
2945     self.save_node_spacing(y_spacing, base_mesh_element_num, base_dim_y)
2946     self.save_node_spacing(y_spacing, split_element_number, base_dim_y / 2)
2947     self.save_node_spacing(y_spacing, tr_el_num_seg_2, tr_element_dim_y2)
2948     self.save_node_spacing(y_spacing, flange_el_num_long_seg2, fl_dim_y2)
2949
2950     return y_spacing
2951
2952
2953 class ElementSizeV2(MeshSize):
2954     def __init__(self, mesh_extent: MeshExtent,
2955                 min_num_ebs: int,
2956                 min_num_eweb: int,
2957                 num_eaf: int,
2958                 flange_aspect_ratio: float,
2959                 plate_aspect_ratio: float,
2960                 des_plate_aspect_ratio: float):
2961         """
2962         Class for calculating finite element dimensions
2963         specific to meshing variant V2.
2964
2965         Mesh variant V2 has a more uniform plating mesh with transition plate
2966         elements between edges of plating zones and base mesh elements.
2967         Allows for different number of edge nodes along the top and bottom row
2968         of segment web nodes by creating a transition mesh on the segment web
2969         using both quad and triangle elements. Variant is not suitable for
2970         fine mesh generation because of element size limitations.
2971
2972         Mesh variant V2 has the following limitations:
2973
2974             1.) All primary supporting members need to have the same web height.
2975             2.) Flange element overlap has to be in the same plane.
2976             3.) Grillage plating can not be defined with any camber.
2977             4.) Value of num_eaf can not be greater than 1.
2978             5.) Limitation on finite element size
2979         """
2980         super().__init__(mesh_extent, min_num_ebs, min_num_eweb, num_eaf,
2981                         flange_aspect_ratio, plate_aspect_ratio, des_plate_aspect_ratio)
2982
2983     def flange_edge_node_spacing(self, segment: Segment):
2984         """
2985         :param segment: Selected segmenet.
2986         :return: Distance between segment nodes in the axial direction of the
2987                 selected segment, in order in the direction of global csy axis.
2988         """
2989         bf_max1, bf_max2 = self.opposite_flange_width(segment)
2990         tr_dim_1, tr_dim_2 = self.flange_transition_dim(segment)
2991         fl_el_num1, fl_el_num2 = self.opposite_flange_element_num(segment)
2992         tr_num_1, tr_num_2 = self.get_flange_transition_num(segment)
2993         direction = segment.primary_supp_mem.direction
2994         plate_list = self._grillage.segment_common_plates(segment)
2995         plate = plate_list[0]
2996         base_el_num = self.flange_base_element_num(segment)
2997
2998         if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
2999             base_dim = self.get_base_dim_x(plate)
3000             split_element_number = self.get_tran_split_element_num(plate)

```

```

3001     else:
3002         base_dim = self.get_base_dim_y(plate)
3003         split_element_number = self.get_long_split_element_num(plate)
3004
3005     if segment in self.mesh_extent.half_segments.values():
3006         fl_el_num2 = 0
3007         tr_num_2 = 0
3008
3009     spacing = {}
3010     self.save_node_spacing(spacing, fl_el_num1, bf_max1)
3011     self.save_node_spacing(spacing, tr_num_1, tr_dim_1)
3012     self.save_node_spacing(spacing, base_el_num, base_dim)
3013     self.save_node_spacing(spacing, split_element_number, base_dim / 2)
3014     self.save_node_spacing(spacing, tr_num_2, tr_dim_2)
3015     self.save_node_spacing(spacing, fl_el_num2, bf_max2)
3016     return spacing
3017
3018
3019 class PlateMesh:
3020     def __init__(self, mesh_size: MeshSize, plate: Plate):
3021         """
3022         Class for generating FE mesh on a selected plating zone.
3023
3024         :param mesh_size: Selected input mesh size for plate zone mesh generation.
3025         :param plate: Selected plate for generating Node and Element objects.
3026             of the selected plating zone based on Axis Of Symmetry.
3027         :return: Determines node coordinates and generates finite element Node
3028             and Element objects on the selected plating zone. Returns last node
3029             and element ID, to continue node and element numeration.
3030         """
3031         self._mesh_size = mesh_size
3032         self._plate = plate
3033
3034         self._edge_nodes_x = self._mesh_size.plate_edge_node_spacing_x(plate)
3035         self._edge_nodes_y = self._mesh_size.plate_edge_node_spacing_y(plate)
3036
3037     def get_mesh_limits(self):
3038         """
3039         :return: Row and column limit values for generating plate nodes and
3040             elements, based on which Axis of Symmetry splits the plating zone.
3041
3042         row_limit - Number of node rows on the entire plating zone
3043         column_limit - Number of node columns on the entire plating zone
3044         """
3045         row_limit = len(self._edge_nodes_y) + 1
3046         column_limit = len(self._edge_nodes_x) + 1
3047         return row_limit, column_limit
3048
3049     def get_plate_element_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
3050         """
3051         :return: Quad element GeoFEM Plate property ID used for plating.
3052         """
3053         plate_prop_id = self._plate.plate_prop.id
3054         fem_prop_id = fem.plate_property_IDs[plate_prop_id]
3055         return fem_prop_id
3056
3057     def get_stiffener_beam_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
3058         """
3059         :return: Beam element GeoFEM property ID used for stiffeners.
3060         """

```

```

3061     beam_prop_id = self._plate.stiff_layout.beam_prop.id
3062     fem_prop_id = fem.stiff_beam_prop_IDs[beam_prop_id]
3063     return fem_prop_id
3064
3065     def get_half_stiffener_beam_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
3066         """
3067         :return: Beam element GeoFEM property ID used for stiffeners located on
3068                 Axis Of Symmetry.
3069         """
3070         beam_prop_id = self._plate.stiff_layout.beam_prop.id
3071         fem_prop_id = fem.half_stiff_beam_prop_IDs[beam_prop_id]
3072         return fem_prop_id
3073
3074     @staticmethod
3075     def reference_node_ID_array(start_id, row_limit, column_limit):
3076         """
3077         :param start_id:
3078         :param row_limit:
3079         :param column_limit:
3080         :return: 2D array of node IDs arranged to represent relative placement
3081                 of nodes on the plating zone. Used as a reference for quad element
3082                 generation.
3083         """
3084         total = row_limit * column_limit # Total number of nodes
3085         id_list = np.arange(start_id, start_id + total, 1)
3086         node_id_array = np.reshape(id_list, [row_limit, column_limit])
3087         return node_id_array
3088
3089     def generate_plate_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM):
3090         """
3091         :return: Generates nodes on the entire plating zone and returns last
3092                 node ID to continue node numeration on other plating zones.
3093                 Overlapping nodes along the edges of the plating zone are saved
3094                 into a separate dictionary for node overlap identification.
3095
3096         row - Row of nodes along x axis.
3097         column - Column of nodes along y axis.
3098         spacing_vector - Node coordinates in the local coordinate system.
3099         """
3100         ref_node1 = Segment.get_segment_node1(self._plate.long_seg1)
3101         ref_node2 = Segment.get_segment_node2(self._plate.long_seg1)
3102         ref_vector = np.subtract(ref_node2, ref_node1)
3103         unit_ref_vector = ref_vector / np.linalg.norm(ref_vector)
3104         normal_vector = np.array((0, 0, 1)) # Vector normal to the plating
3105         perp_vector = np.cross(normal_vector, unit_ref_vector)
3106
3107         spacing_vector_x = np.zeros(3)
3108         spacing_vector_y = np.zeros(3)
3109         dim_y_index = 1
3110         row_limit, column_limit = self.get_mesh_limits()
3111
3112         for row in range(0, row_limit):
3113             dim_x_index = 1
3114             if row > 0:
3115                 dim_y = self._edge_nodes_y[dim_y_index]
3116                 spacing_vector_y += dim_y * perp_vector
3117                 dim_y_index += 1
3118             else:
3119                 spacing_vector_y = np.zeros(3)
3120

```



```

3121         for column in range(0, column_limit):
3122             if column > 0:
3123                 dim_x = self._edge_nodes_x[dim_x_index]
3124                 spacing_vector_x += dim_x * unit_ref_vector
3125                 dim_x_index += 1
3126             else:
3127                 spacing_vector_x = np.zeros(3)
3128
3129             spacing_vector = spacing_vector_x + spacing_vector_y
3130             node_coords = spacing_vector + ref_node1
3131
3132             node = fem.add_node(node_coords)
3133             if row == 0 or row == row_limit - 1:
3134                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3135             if column == 0 or column == column_limit - 1:
3136                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3137
3138     def generate_plate_elements(self, fem: GeoGrillageFEM):
3139         """
3140         :return: Generates elements on the entire plating zone and returns last
3141                 element ID to continue element numeration on other plating zones.
3142
3143         row_limit - Row of elements along x axis.
3144         column_limit - Column of elements along y axis.
3145         """
3146         row_limit, column_limit = self.get_mesh_limits()
3147         start_id = self._mesh_size.start_nodes[self._plate.id]
3148         node_id_array = self.reference_node_ID_array(start_id, row_limit, column_limit)
3149         fem_prop_id = self.get_plate_element_property(fem)
3150
3151         id_el_nodes = [None] * 4
3152         for row in range(0, row_limit - 1):
3153             for column in range(0, column_limit - 1):
3154                 id_el_nodes[0] = node_id_array[row, column]
3155                 id_el_nodes[1] = node_id_array[row, column + 1]
3156                 id_el_nodes[2] = node_id_array[row + 1, column + 1]
3157                 id_el_nodes[3] = node_id_array[row + 1, column]
3158
3159                 elem = fem.add_quad_element(fem_prop_id, id_el_nodes)
3160                 fem.add_to_plate_elements(elem)
3161
3162     def identify_beam_nodes(self):
3163         """
3164         :return: Method identifies rows or columns of nodes, depending on
3165                 stiffener orientation, where ordinary stiffeners are located in
3166                 the reference node ID array. Returns a list of row or column
3167                 indexes in the reference node ID array for beam element generation.
3168         """
3169         stiff_num = self._plate.get_stiffener_number()
3170         stiff_spacing = self._plate.get_stiffener_spacing() * 1000
3171         stiff_offset = self._plate.get_equal_stiffener_offset() * 1000
3172         id_list = []
3173         dist = 0
3174         stiff_counter = 0
3175         spacing = stiff_spacing
3176         if self._plate.stiff_dir is BeamDirection.TRANSVERSE:
3177             edge_nodes = self._edge_nodes_x.items()
3178         else:
3179             edge_nodes = self._edge_nodes_y.items()
3180

```

```

3181     for item in edge_nodes:
3182         key, val = item
3183         dist += val
3184         if np.isclose(dist, stiff_offset):
3185             id_list.append(key)
3186             stiff_counter += 1
3187         if np.isclose(dist, stiff_offset + spacing):
3188             if stiff_counter == stiff_num:
3189                 break
3190             spacing += stiff_spacing
3191             id_list.append(key)
3192             stiff_counter += 1
3193
3194     return id_list
3195
3196 def generate_beam_elements(self, fem: GeoGrillageFEM):
3197     """
3198     :return: Generates beam elements of ordinary stiffeners between nodes
3199             identified using method identify_beam_nodes. Returns last beam
3200             element ID to continue beam element numeration on other plating
3201             zones.
3202     """
3203     row_limit, column_limit = self.get_mesh_limits()
3204     start_id = self._mesh_size.start_nodes[self._plate.id]
3205     node_id_array = self.reference_node_ID_array(start_id, row_limit, column_limit)
3206     stiff_dir = self._plate.stiff_dir
3207     prop_id = self.get_stiffener_beam_property(fem)
3208     aos_on_stiff = self._mesh_size.mesh_extent.aos_on_stiffener(self._plate)
3209     node_id_index_list = self.identify_beam_nodes()
3210     id_el_nodes = [None] * 2
3211     dir_vector = np.array([0, 0, -1])
3212
3213     if stiff_dir is BeamDirection.LONGITUDINAL:
3214         for index in range(0, len(node_id_index_list)):
3215             if index == len(node_id_index_list) - 1 and aos_on_stiff:
3216                 prop_id = self.get_half_stiffener_beam_property(fem)
3217
3218                 for i in range(0, column_limit - 1):
3219                     id_el_nodes[0] = node_id_array[node_id_index_list[index], i]
3220                     id_el_nodes[1] = node_id_array[node_id_index_list[index], i + 1]
3221                     fem.add_beam_element(prop_id, id_el_nodes, dir_vector)
3222     else:
3223         for index in range(0, len(node_id_index_list)):
3224             if index == len(node_id_index_list) - 1 and aos_on_stiff:
3225                 prop_id = self.get_half_stiffener_beam_property(fem)
3226
3227                 for i in range(0, row_limit - 1):
3228                     id_el_nodes[0] = node_id_array[i, node_id_index_list[index]]
3229                     id_el_nodes[1] = node_id_array[i + 1, node_id_index_list[index]]
3230                     fem.add_beam_element(prop_id, id_el_nodes, dir_vector)
3231
3232 def generate_mesh(self, fem: GeoGrillageFEM):
3233     """
3234     :return: Generates all nodes and elements on the selected plating zone.
3235     """
3236     self.generate_plate_nodes(fem)
3237     self.generate_plate_elements(fem)
3238     self.generate_beam_elements(fem)
3239
3240

```

```

3241 class SegmentMesh:
3242     def __init__(self, mesh_size: MeshSize, segment: Segment,
3243                 start_n_id, start_e_id):
3244         """
3245         Class for generating FE mesh on a selected segment.
3246
3247         :param mesh_size: Selected input mesh size for segment mesh generation.
3248         :param segment: Selected segment for generating Nodes and Elements.
3249         :param start_n_id: Starting node ID which allows continued numeration.
3250         :param start_e_id: Starting element ID which allows continued numeration.
3251         :return: Determines node coordinates and generates finite element Node
3252                 and Element objects on the selected segment. Returns last node and
3253                 element ID, to continue node and element numbering.
3254
3255         Class contains the following data:
3256
3257         edge_plate_nodes - Distances between nodes, at the point of connection
3258                 of primary supporting member web with plating, along the length
3259                 of the selected segment.
3260         edge_flange_nodes - Distances between nodes, at the point of connection
3261                 of primary supporting member web with its flange, along the length
3262                 of the selected segment.
3263         edge_nodes_z - Distances between nodes, in order along z axis
3264
3265         web_node_ref_array - Reference array for generating web nodes.
3266         """
3267         self._mesh_size = mesh_size
3268         self._mesh_extent = self._mesh_size.mesh_extent
3269         self._segment = segment
3270         self._start_node_id = start_n_id
3271         self._start_element_id = start_e_id
3272
3273         self._edge_plate_nodes = {}
3274         self._edge_flange_nodes = self._mesh_size.flange_edge_node_spacing(segment)
3275         self._edge_nodes_z = {}
3276
3277     def get_plate_edge_nodes(self):
3278         """
3279         :return: Identifies a plating zone the segment defines and gets
3280                 distances between edge nodes in the appropriate direction, at the
3281                 connection of segment web and plating zone.
3282                 Loads identified dimensions into dictionary edge_plate_nodes,
3283                 which are necessary for web node generation.
3284                 This method is the first step of generating any segment nodes.
3285         """
3286         direction = self._segment.primary_supp_mem.direction
3287         for plate in self._mesh_extent.all_plating_zones.values():
3288             segment_defines_plate = plate.test_plate_segment(self._segment)
3289             if segment_defines_plate:
3290                 if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
3291                     edge_nodes = self._mesh_size.plate_edge_node_spacing_x(plate)
3292                 else:
3293                     edge_nodes = self._mesh_size.plate_edge_node_spacing_y(plate)
3294                 self._edge_plate_nodes = edge_nodes
3295                 break
3296
3297     def get_inward_flange_vector(self):
3298         """
3299         :return: Inward flange direction unit vector, based on Primary
3300                 supporting member direction and relative distance.

```

```

3301         """
3302         direction = self._segment.primary_supp_mem.direction
3303         rel_dist = self._segment.primary_supp_mem.rel_dist
3304
3305         if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
3306             if rel_dist < 0.5:
3307                 return np.array((0, 1, 0))
3308             else:
3309                 return np.array((0, -1, 0))
3310
3311         if direction is BeamDirection.TRANSVERSE:
3312             if rel_dist < 0.5:
3313                 return np.array((1, 0, 0))
3314             else:
3315                 return np.array((-1, 0, 0))
3316
3317     def get_outward_flange_vector(self):
3318         """
3319         :return: Outward flange direction unit vector, based on Primary
3320                 supporting member direction and relative distance.
3321         """
3322         direction = self._segment.primary_supp_mem.direction
3323         rel_dist = self._segment.primary_supp_mem.rel_dist
3324
3325         if direction is BeamDirection.LONGITUDINAL:
3326             if rel_dist < 0.5:
3327                 return np.array((0, -1, 0))
3328             else:
3329                 return np.array((0, 1, 0))
3330
3331         if direction is BeamDirection.TRANSVERSE:
3332             if rel_dist < 0.5:
3333                 return np.array((-1, 0, 0))
3334             else:
3335                 return np.array((1, 0, 0))
3336
3337     def get_web_element_property_id(self, fem: GeoGrillageFEM):
3338         """
3339         :return: Quad element plate property ID used for primary supporting
3340                 member segment web elements.
3341         """
3342         beam_prop_id = self._segment.beam_prop.id
3343         if self._mesh_extent.aos_on_segment(self._segment):
3344             fem_prop_id = fem.half_web_property_IDs[beam_prop_id]
3345         else:
3346             fem_prop_id = fem.web_property_IDs[beam_prop_id]
3347         return fem_prop_id
3348
3349     def get_flange_element_property_id(self, fem: GeoGrillageFEM):
3350         """
3351         :return: Quad element plate property ID used for primary supporting
3352                 member segment flange elements.
3353         """
3354         beam_prop_id = self._segment.beam_prop.id
3355         fem_prop_id = fem.flange_property_IDs[beam_prop_id]
3356         return fem_prop_id
3357
3358     def reference_web_node_ID_array(self):
3359         """
3360         :return: 2D array of node IDs arranged to represent relative placement

```

```

3361         of nodes on the primary supporting member segment web. Used as a
3362         reference for quad element generation.
3363         Version 1 assumes equal number of nodes in each row and quad
3364         elements with edges parallel to the global coordinate axis.
3365
3366         row_limit - Number of web nodes along global z axis.
3367         column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3368         total - Total number of web nodes.
3369         """
3370         column_limit = len(self._edge_plate_nodes) + 1
3371         row_limit = self._mesh_size.min_num_eweb + 1
3372         total = row_limit * column_limit
3373         id_list = np.arange(self._start_node_id, self._start_node_id + total, 1)
3374         web_node_id_array = np.reshape(id_list, [row_limit, column_limit])
3375         return web_node_id_array
3376
3377     def plate_node_row_number(self):
3378         """
3379         :return: Number of node rows with plate edge spacing along the web.
3380         """
3381         eweb = self._mesh_size.min_num_eweb
3382         if eweb <= 2:
3383             p_row_limit = 1
3384         else:
3385             p_row_limit = eweb - 1
3386         return p_row_limit
3387
3388     def flange_node_row_number(self):
3389         """
3390         :return: Number of node rows with flange edge spacing along the web.
3391         """
3392         eweb = self._mesh_size.min_num_eweb
3393         if eweb == 1:
3394             f_row_limit = 1
3395         else:
3396             f_row_limit = 2
3397         return f_row_limit
3398
3399     def reference_web_node_ID_list(self):
3400         """
3401         :return: List of node IDs arranged to represent relative placement
3402                 of nodes on the primary supporting member segment web. Used as a
3403                 reference for quad element generation. For MeshVariantV2.
3404
3405         row_limit - Number of web nodes along global z axis.
3406         column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3407         total - Total number of web nodes.
3408         """
3409         web_node_id_list = []
3410         p_column_limit = len(self._edge_plate_nodes) + 1           # Plate col limit
3411         f_column_limit = len(self._edge_flange_nodes) + 1         # Flange col limit
3412         p_row_limit = self.plate_node_row_number()                 # Plate row limit
3413         f_row_limit = self.flange_node_row_number()                 # Flange row limit
3414
3415         start_id = self._start_node_id
3416         for p_row in range(1, p_row_limit + 1):
3417             id_list = np.arange(start_id, start_id + p_column_limit, 1)
3418             start_id += p_column_limit
3419             web_node_id_list.append(id_list)
3420

```

```

3421     for f_row in range(1, f_row_limit + 1):
3422         id_list = np.arange(start_id, start_id + f_column_limit, 1)
3423         start_id += f_column_limit
3424         web_node_id_list.append(id_list)
3425
3426     return web_node_id_list
3427
3428 def generate_web_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM) -> int:
3429     pass
3430
3431 def generate_web_elements(self, fem: GeoGrillageFEM) -> int:
3432     pass
3433
3434 def ref_flange_node_ID_array(self, flange_start_node):
3435     """
3436     :return: 2D array of node IDs arranged to represent relative placement
3437             of nodes on the primary supporting member segment flange of L beam
3438             type. Used as a reference for quad element generation.
3439             Method uses common nodes at the connection of web and flange.
3440
3441             last_web_node_row - List of common node IDs at the connection.
3442             row_limit - Number of nodes in the direction of flange width.
3443             column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3444             total - Total number of flange nodes, excluding the middle row.
3445     """
3446
3447     web_node_id_list = self.reference_web_node_ID_list()
3448     last_web_node_row = web_node_id_list[-1]
3449
3450     column_limit = len(self._edge_flange_nodes) + 1
3451     row_limit = self._mesh_size.num_eaf + 1
3452     total = column_limit * (row_limit - 1)
3453     id_list = np.arange(flange_start_node, flange_start_node + total, 1)
3454     id_array = np.reshape(id_list, [row_limit - 1, column_limit])
3455     flange_node_id_array = np.insert(id_array, 0, last_web_node_row, axis=0)
3456     return flange_node_id_array
3457
3458 def generate_flange_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM,
3459                          direction: FlangeDirection, start_node_id) -> int:
3460     pass
3461
3462 def generate_flange_elements(self, fem: GeoGrillageFEM, flange_start_node,
3463                             start_element_id):
3464     element_id = start_element_id
3465     node_id_arr = self.ref_flange_node_ID_array(flange_start_node)
3466     row_limit, column_limit = np.shape(node_id_arr)
3467     flange_id_array = self.ref_flange_node_ID_array(flange_start_node)
3468     fem_prop_id = self.get_flange_element_property_id(fem)
3469     id_el_nodes = [None] * 4
3470
3471     for row in range(0, row_limit - 1):
3472         for column in range(0, column_limit - 1):
3473             id_el_nodes[0] = flange_id_array[row, column]
3474             id_el_nodes[1] = flange_id_array[row, column + 1]
3475             id_el_nodes[2] = flange_id_array[row + 1, column + 1]
3476             id_el_nodes[3] = flange_id_array[row + 1, column]
3477             elem = fem.add_quad_element(fem_prop_id, id_el_nodes)
3478             fem.add_element_to_element_overlaps(elem)
3479             element_id += 1
3480     return element_id

```

```

3481
3482 def generate_mesh(self, fem: GeoGrillageFEM):
3483     """
3484     :return: Generates all nodes and elements on a segment of a primary
3485             supporting member. Returns last node and element ID to continue
3486             numeration on other segments.
3487     """
3488     nodes = self._start_node_id
3489     elements = self._start_element_id
3490
3491     self.get_plate_edge_nodes()
3492     beam_type = self._segment.beam_prop.beam_type
3493     flange_dir = self._segment.primary_supp_mem.flange_direction
3494
3495     if beam_type is BeamType.T:
3496         web_nodes = self.generate_web_nodes(fem)
3497         web_elements = self.generate_web_elements(fem)
3498         direction = FlangeDirection.INWARD
3499         flange_nodes = self.generate_flange_nodes(fem, direction, web_nodes)
3500         elements = self.generate_flange_elements(fem, web_nodes, web_elements)
3501
3502         if not self._mesh_extent.aos_on_segment(self._segment):
3503             direction = FlangeDirection.OUTWARD
3504             nodes = self.generate_flange_nodes(fem, direction, flange_nodes)
3505             elements = self.generate_flange_elements(fem, flange_nodes, elements)
3506         else:
3507             nodes = flange_nodes
3508
3509     elif beam_type is BeamType.L:
3510         web_nodes = self.generate_web_nodes(fem)
3511         elements = self.generate_web_elements(fem)
3512         nodes = self.generate_flange_nodes(fem, flange_dir, web_nodes)
3513         elements = self.generate_flange_elements(fem, web_nodes, elements)
3514
3515     elif beam_type is BeamType.FB:
3516         nodes = self.generate_web_nodes(fem)
3517         elements = self.generate_web_elements(fem)
3518
3519     return nodes, elements
3520
3521 class SegmentMeshV1(SegmentMesh):
3522     def __init__(self, mesh_size: MeshSize, segment: Segment,
3523                start_n_id, start_e_id):
3524         """
3525         Class for segment mesh generation specific to meshing variant V1.
3526
3527         Distances between flange nodes are equal to plate edge node distances
3528         on meshing variant V1.
3529         """
3530         super().__init__(mesh_size, segment, start_n_id, start_e_id)
3531         self._mesh_size = mesh_size
3532         self._segment = segment
3533         self._start_node_id = start_n_id          # Starting node ID
3534         self._start_element_id = start_e_id      # Starting element ID
3535
3536     def generate_web_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM):
3537         """
3538         :return: Generates nodes on the web of one segment of a primary
3539                 supporting member and returns last node ID to continue node
3540

```

```

3541         numeration on other segments.
3542
3543     row_limit - Number of web nodes along global z axis.
3544     column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3545     dim_z - Vertical dimension of every web element.
3546     ref_node1 - Reference node 1 coordinates in [mm], origin of the local csy.
3547     ref_vector - Reference vector in the direction of the local csy.
3548     perpendicular_vector - Vector opposite of global z axis.
3549     long_spacing_vector - Longitudinal vector in the direction of PSM.
3550     position_vector - Node position vector in the local coordinate system.
3551     """
3552     row_limit = self._mesh_size.min_num_eweb + 1
3553     column_limit = int(len(self._edge_plate_nodes) + 1)
3554     dim_z = self._mesh_size.get_web_el_height(self._segment)
3555     mesh_dim = self._edge_plate_nodes
3556     eaf = self._mesh_size.num_eaf
3557
3558     node_id = self._start_node_id
3559     ref_node1 = Segment.get_segment_node1(self._segment)
3560     ref_node2 = Segment.get_segment_node2(self._segment)
3561     ref_vector = np.subtract(ref_node2, ref_node1)
3562     unit_ref_vector = ref_vector / np.linalg.norm(ref_vector)
3563     perpendicular_vector = np.array((0, 0, -1))
3564     long_spacing_vector = np.zeros(3)
3565
3566     for row in range(0, row_limit):
3567         vertical_spacing_vector = perpendicular_vector * dim_z * row
3568         long_dim_index = 1
3569         for column in range(0, column_limit):
3570             if column > 0:
3571                 long_mesh_dim = mesh_dim[long_dim_index]
3572                 long_spacing_vector += long_mesh_dim * unit_ref_vector
3573                 long_dim_index += 1
3574             else:
3575                 long_spacing_vector = np.zeros(3)
3576
3577         position_vector = long_spacing_vector + vertical_spacing_vector
3578         node_coords = position_vector + ref_node1
3579         node = fem.add_node(node_coords)
3580
3581         if row == 0:
3582             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3583         if row == row_limit - 1 and column <= eaf:
3584             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3585         if row == row_limit - 1 and column >= column_limit - eaf - 1:
3586             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3587         if column == 0 or column == column_limit - 1:
3588             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3589         node_id += 1
3590
3591     return node_id
3592
3593     def ref_flange_node_ID_array(self, flange_start_node):
3594         """
3595         :return: 2D array of node IDs arranged to represent relative placement
3596                 of nodes on the primary supporting member segment flange of L beam
3597                 type. Used as a reference for quad element generation.
3598                 Method uses common nodes at the connection of web and flange.
3599
3600     last_web_node_row - List of common node IDs at the connection.

```



```

3601     row_limit - Number of nodes in the direction of flange width.
3602     column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3603     total - Total number of flange nodes, excluding the middle row.
3604     """
3605     web_node_id_array = self.reference_web_node_ID_array()
3606     last_web_node_row = web_node_id_array[-1, :]
3607     column_limit = len(self._edge_plate_nodes) + 1
3608     n_eaf = self._mesh_size.num_eaf
3609     row_limit = n_eaf + 1
3610     total = column_limit * (row_limit - 1)
3611
3612     id_list = np.arange(flange_start_node, flange_start_node + total, 1)
3613     id_array = np.reshape(id_list, [row_limit - 1, column_limit])
3614     flange_node_id_array = np.insert(id_array, n_eaf, last_web_node_row, axis=0)
3615     return flange_node_id_array
3616
3617 def generate_flange_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM,
3618                          direction: FlangeDirection, flange_start_node):
3619     """
3620     :param fem: Grillage FEM model.
3621     :param direction: Selected flange direction for node generation.
3622     :param flange_start_node: Start flange node for continued node
3623         generation after web nodes.
3624     :return: Generates nodes on one side of the flange of one segment of a
3625         primary supporting member. Returns last node ID to continue node
3626         numeration on other segments.
3627
3628     row_limit - Number of flange nodes across the width
3629     column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3630     mesh_dim - Distances between nodes at the connection of web and flange.
3631     ref_node1 - Reference node 1 coordinates in [mm], origin of the local csy.
3632     ref_vector - Reference vector in the direction of the local csy.
3633     perpendicular_vector - Vector opposite of global z axis.
3634     long_spacing_vector - Longitudinal vector in the direction of PSM.
3635     position_vector - Node position vector in the local coordinate system.
3636     """
3637
3638     if direction is FlangeDirection.INWARD:
3639         flange_unit_vector = self.get_inward_flange_vector()
3640     else:
3641         flange_unit_vector = self.get_outward_flange_vector()
3642     ref_array = self.ref_flange_node_ID_array(flange_start_node)
3643     row_limit, column_limit = np.shape(ref_array)
3644     row_limit -= 1
3645     eaf = self._mesh_size.num_eaf
3646     edge_nodes = self._edge_plate_nodes
3647
3648     ref_node1 = Segment.get_segment_node1(self._segment)
3649     ref_node2 = Segment.get_segment_node2(self._segment)
3650     ref_vector = np.subtract(ref_node2, ref_node1)
3651     unit_ref_vector = ref_vector / np.linalg.norm(ref_vector)
3652
3653     width_spacing_vector = np.zeros(3)
3654     long_spacing_vector = np.zeros(3)
3655
3656     fl_el_width = self._mesh_size.get_flange_el_width(self._segment)
3657     z_start_offset = ref_node1 * np.array((1, 1, 0))
3658     width_offset = flange_unit_vector * fl_el_width * eaf
3659     start_node = z_start_offset + width_offset
3660     node_id = flange_start_node

```

```

3661     for row in range(0, row_limit):
3662         if row > 0:
3663             width_spacing_vector -= flange_unit_vector * fl_el_width
3664         else:
3665             width_spacing_vector = np.zeros(3)
3666
3667         dim_index = 1
3668         for column in range(0, column_limit):
3669             if column > 0:
3670                 long_spacing_vector += edge_nodes[dim_index] * unit_ref_vector
3671                 dim_index += 1
3672             else:
3673                 long_spacing_vector = np.zeros(3)
3674
3675             position_vector = long_spacing_vector + width_spacing_vector
3676             node_coords = position_vector + start_node
3677
3678             node = fem.add_node(node_coords)
3679             if column >= (column_limit - eaf - 1):
3680                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3681             if column <= eaf:
3682                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3683             node_id += 1
3684
3685     return node_id
3686
3687 def generate_web_elements(self, fem: GeoGrillageFEM):
3688     """
3689     :return: Generates elements on the entire segment web and returns last
3690             element ID to continue element numeration on other segments.
3691
3692     row_limit - Row of elements along x axis.
3693     column_limit - Column of elements along y axis.
3694     """
3695     column_limit = len(self._edge_plate_nodes) + 1
3696     element_id = fem.id_element_count
3697     node_id_array = self.reference_web_node_ID_array()
3698     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
3699     id_el_nodes = [None] * 4
3700     for row in range(0, self._mesh_size.min_num_eweb):
3701         for column in range(0, column_limit - 1):
3702             id_el_nodes[0] = node_id_array[row, column]
3703             id_el_nodes[1] = node_id_array[row, column + 1]
3704             id_el_nodes[2] = node_id_array[row + 1, column + 1]
3705             id_el_nodes[3] = node_id_array[row + 1, column]
3706             fem.add_quad_element(fem_prop_id, id_el_nodes)
3707             element_id += 1
3708
3709     return element_id
3710
3711
3712 class SegmentMeshV2(SegmentMesh):
3713     def __init__(self, mesh_size: MeshSize, segment: Segment,
3714                 start_n_id, start_e_id):
3715         """
3716         Class for segment mesh generation specific to meshing variant V2.
3717
3718         Distances between flange and plate edge nodes do not have to be equal.
3719         Transition mesh on the segment web uses both deformed quad elements and
3720         triangle elements.

```

```

3721     """
3722     super().__init__(mesh_size, segment, start_n_id, start_e_id)
3723     self._mesh_size = mesh_size
3724     self._segment = segment
3725     self._start_node_id = start_n_id
3726     self._start_element_id = start_e_id
3727
3728     def identify_num_of_tris(self, segment: Segment):
3729         """
3730         :param segment: Selected segment.
3731         :return: Number of triangles at the start and end of transition row.
3732
3733         Number of triangles depends on the beam type of segments in the
3734         perpendicular direction to the segment being meshed.
3735         """
3736         num_end1, num_end2 = self._mesh_size.opposite_flange_element_num(segment)
3737         n_tri1 = num_end1
3738         n_tri2 = num_end2
3739
3740         plate_edge_nodes = self._edge_plate_nodes
3741         flange_edge_nodes = self._edge_flange_nodes
3742         if len(plate_edge_nodes) > 4:
3743             model_check = self._mesh_extent.model_check
3744             model_check.mesh_V2_tr_check(plate_edge_nodes, flange_edge_nodes)
3745
3746         p1_end1 = plate_edge_nodes[1]
3747         p1_end2 = plate_edge_nodes[len(plate_edge_nodes)]
3748         f1_end1 = flange_edge_nodes[1]
3749         f1_end2 = flange_edge_nodes[len(flange_edge_nodes)]
3750
3751         # No triangle element if first element dimensions are equal
3752         if np.isclose(p1_end1, f1_end1) or f1_end1 > p1_end1:
3753             n_tri1 = 0
3754         if np.isclose(p1_end2, f1_end2) or f1_end2 > p1_end2:
3755             n_tri2 = 0
3756
3757         # No triangle no.2 if only half of the segment is to be meshed
3758         if segment in self._mesh_size.mesh_extent.half_segments.values():
3759             n_tri2 = 0
3760
3761         p2_end1 = plate_edge_nodes[2]
3762         p2_end2 = plate_edge_nodes[len(plate_edge_nodes) - 1]
3763         f2_end1 = flange_edge_nodes[2]
3764         f2_end2 = flange_edge_nodes[len(flange_edge_nodes) - 1]
3765
3766         plate_end1 = p1_end1 + p2_end1
3767         plate_end2 = p1_end2 + p2_end2
3768         flange_end1 = f1_end1 + f2_end1
3769         flange_end2 = f1_end2 + f2_end2
3770
3771         # No triangle element if the sum of first two element dims are equal
3772         if np.isclose(plate_end1, flange_end1):
3773             n_tri1 = 0
3774         if np.isclose(plate_end2, flange_end2):
3775             n_tri2 = 0
3776
3777         return n_tri1, n_tri2
3778
3779     def generate_web_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM):
3780         """

```

```

3781 :return: Generates nodes on the web of one segment of a primary
3782         supporting member and returns last node ID to continue node
3783         numeration on other segments.
3784
3785 row_limit - Number of web nodes along global z axis.
3786 column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3787 dim_z - Vertical dimension of every web element.
3788 ref_node1 - Reference node 1 coordinates in [mm], origin of the local csy.
3789 ref_vector - Reference vector in the direction of the local csy.
3790 perpendicular_vector - Vector opposite of global z axis.
3791 long_spacing_vector - Longitudinal vector in the direction of PSM.
3792 position_vector - Node position vector in the local coordinate system.
3793 """
3794 plate_edge_nodes = self._edge_plate_nodes      # Distances between plate nodes
3795 flange_edge_nodes = self._edge_flange_nodes    # Distances between flange nodes
3796 p_row_limit = self.plate_node_row_number()     # Plate row limit
3797 f_row_limit = self.flange_node_row_number()    # Flange row limit
3798 p_column_limit = int(len(plate_edge_nodes) + 1) # Plate col limit
3799 f_column_limit = int(len(flange_edge_nodes) + 1) # Flange col limit
3800 dim_z = self._mesh_size.get_web_el_height(self._segment)
3801 node_id = self._start_node_id
3802 eaf = self._mesh_size.num_eaf
3803 ref_node1 = Segment.get_segment_node1(self._segment)
3804 ref_node2 = Segment.get_segment_node2(self._segment)
3805 ref_vector = np.subtract(ref_node2, ref_node1)
3806 unit_ref_vector = ref_vector / np.linalg.norm(ref_vector)
3807 perpendicular_vector = np.array((0, 0, -1))
3808 long_spacing_vector = np.zeros(3)
3809
3810 for row in range(0, p_row_limit):
3811     vertical_spacing_vector = perpendicular_vector * dim_z * row
3812     long_dim_index = 1
3813     for column in range(0, p_column_limit):
3814         if column > 0:
3815             long_mesh_dim = plate_edge_nodes[long_dim_index]
3816             long_spacing_vector += long_mesh_dim * unit_ref_vector
3817             long_dim_index += 1
3818         else:
3819             long_spacing_vector = np.zeros(3)
3820
3821     position_vector = long_spacing_vector + vertical_spacing_vector
3822     node_coords = position_vector + ref_node1
3823
3824     node = fem.add_node(node_coords)
3825     if row == 0:
3826         fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3827     if column >= (p_column_limit - eaf):
3828         fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3829     if column <= eaf - 1:
3830         fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3831
3832     node_id += 1
3833
3834 for row in range(p_row_limit, p_row_limit + f_row_limit):
3835     vertical_spacing_vector = perpendicular_vector * dim_z * row
3836     long_dim_index = 1
3837     for column in range(0, f_column_limit):
3838         if column > 0:
3839             long_mesh_dim = flange_edge_nodes[long_dim_index]
3840             long_spacing_vector += long_mesh_dim * unit_ref_vector

```

```

3841         long_dim_index += 1
3842     else:
3843         long_spacing_vector = np.zeros(3)
3844
3845         position_vector = long_spacing_vector + vertical_spacing_vector
3846         node_coords = position_vector + ref_node1
3847
3848         node = fem.add_node(node_coords)
3849
3850         if column >= (f_column_limit - eaf - 1):
3851             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3852         if column <= eaf + 1:
3853             fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3854
3855         node_id += 1
3856
3857     return node_id
3858
3859 def generate_flange_nodes(self, fem: GeoGrillageFEM,
3860                          direction: FlangeDirection, flange_start_node):
3861     """
3862     :param fem: Grillage FEM model.
3863     :param direction: Selected flange direction for node generation.
3864     :param flange_start_node: Start flange node for continued node
3865         generation after web nodes.
3866     :return: Generates nodes on one side of the flange of one segment of a
3867         primary supporting member. Returns last node ID to continue node
3868         numeration on other segments.
3869
3870     row_limit - Number of flange nodes across the width
3871     column_limit - Number of nodes along the local longitudinal segment axis.
3872     mesh_dim - Distances between nodes at the connection of web and flange.
3873     ref_node1 - Reference node 1 coordinates in [mm], origin of the local csy.
3874     ref_vector - Reference vector in the direction of the local csy.
3875     perpendicular_vector - Vector opposite of global z axis.
3876     long_spacing_vector - Longitudinal vector in the direction of PSM.
3877     position_vector - Node position vector in the local coordinate system.
3878     """
3879
3880     if direction is FlangeDirection.INWARD:
3881         flange_unit_vector = self.get_inward_flange_vector()
3882     else:
3883         flange_unit_vector = self.get_outward_flange_vector()
3884     ref_array = self.ref_flange_node_ID_array(flange_start_node)
3885
3886     row_limit, column_limit = np.shape(ref_array)
3887     row_limit -= 1
3888     eaf = self._mesh_size.num_eaf
3889     mesh_dim = self._edge_flange_nodes
3890
3891     ref_node1 = Segment.get_segment_node1(self._segment)
3892     ref_node2 = Segment.get_segment_node2(self._segment)
3893     ref_vector = np.subtract(ref_node2, ref_node1)
3894     unit_ref_vector = ref_vector / np.linalg.norm(ref_vector)
3895
3896     long_spacing_vector = np.zeros(3)
3897
3898     fl_el_dim = self._mesh_size.get_flange_el_width(self._segment)
3899     fl_el_dim_end1 = self._mesh_size.get_end1_max_flange_width(self._segment)
3900     fl_el_dim_end2 = self._mesh_size.get_end2_max_flange_width(self._segment)

```

```

3901     z_start_offset = ref_node1 * np.array((1, 1, 0))
3902     start_node = z_start_offset + flange_unit_vector * fl_el_dim
3903     half_segments = self._mesh_size.mesh_extent.half_segments.values()
3904     node_id = flange_start_node
3905
3906     for row in range(0, row_limit):
3907         dim_index = 1
3908         for column in range(0, column_limit):
3909             if row > 0:
3910                 width_spacing_vector = flange_unit_vector * fl_el_dim
3911             else:
3912                 width_spacing_vector = np.zeros(3)
3913
3914             if column > 0:
3915                 long_spacing_vector += mesh_dim[dim_index] * unit_ref_vector
3916                 dim_index += 1
3917             else:
3918                 long_spacing_vector = np.zeros(3)
3919
3920             if column < 2:
3921                 width_spacing_vector = flange_unit_vector * \
3922                     (fl_el_dim_end1 - fl_el_dim)
3923
3924             elif column > column_limit - 3 \
3925                 and self._segment not in half_segments:
3926                 width_spacing_vector = flange_unit_vector * \
3927                     (fl_el_dim_end2 - fl_el_dim)
3928
3929             position_vector = long_spacing_vector + width_spacing_vector
3930             node_coords = position_vector + start_node
3931             node = fem.add_node(node_coords)
3932
3933             if column >= (column_limit - eaf - 1):
3934                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3935             if column <= eaf + 1:
3936                 fem.add_node_to_node_overlaps(node)
3937
3938             node_id += 1
3939
3940     return node_id
3941
3942 def top_web_element_row(self, fem: GeoGrillageFEM, start_element_id):
3943     """
3944     :param fem: Grillage FEM model.
3945     :param start_element_id: Starting element ID for the row.
3946     :return: Generates quad elements on the top row.
3947     """
3948     plate_edge_nodes = self._edge_plate_nodes
3949     ref_node_list = self.reference_web_node_ID_list()
3950     p_row_limit = self.plate_node_row_number()
3951     element_id = start_element_id
3952     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
3953     range_end = len(plate_edge_nodes)
3954     for row in range(0, p_row_limit - 1):
3955         local_id = 0
3956         for quad_id in range(local_id, range_end):
3957             node1 = ref_node_list[row][local_id]
3958             node2 = ref_node_list[row][local_id + 1]
3959             node3 = ref_node_list[row + 1][local_id + 1]
3960             node4 = ref_node_list[row + 1][local_id]

```

```

3961         node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
3962         fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
3963
3964         element_id += 1
3965         local_id += 1
3966     return element_id
3967
3968 def add_first_quad_to_row(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, l_id, num):
3969     """
3970     :param fem: Grillage FEM model.
3971     :param row1: Input node ID list, upper row of nodes.
3972     :param row2: Input node ID list, lower row of nodes.
3973     :param l_id: Local ID of the element in the transition row.
3974     :param num: Number of quad elements to be generated.
3975     """
3976     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
3977     for quad_id in range(l_id, l_id + num):
3978         node1 = row1[quad_id]
3979         node2 = row1[quad_id + 1]
3980         node3 = row2[quad_id + 1]
3981         node4 = row2[quad_id]
3982         node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
3983         fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
3984
3985 def add_first_tria_to_row(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, local_id):
3986     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
3987     node1 = row1[local_id]
3988     node2 = row2[local_id + 1]
3989     node3 = row2[local_id]
3990     node_id_list = [node1, node2, node3]
3991     fem.add_tria_element(fem_prop_id, node_id_list)
3992
3993 def add_second_tria_to_row(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, local_id):
3994     # Triangle at ref node 2 (right) for n_tria1 == 1:
3995     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
3996     node1 = row1[local_id - 1]
3997     node2 = row2[local_id + 1]
3998     node3 = row2[local_id]
3999     node_id_list = [node1, node2, node3]
4000     fem.add_tria_element(fem_prop_id, node_id_list)
4001
4002 def add_quad_after_tria(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, local_id, el_num):
4003     # Central (non deformed) quad elements after a first tria element
4004     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
4005     for quad_id in range(local_id, local_id + el_num):
4006         node1 = row1[quad_id - 1]
4007         node2 = row1[quad_id]
4008         node3 = row2[quad_id + 1]
4009         node4 = row2[quad_id]
4010         node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
4011         fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
4012
4013 def add_last_quad_to_row(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, local_id, el_num):
4014     # Last element: deformed quad for n_tria1 == 1
4015     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
4016     for quad_id in range(local_id, local_id + el_num):
4017         node1 = row1[local_id - 2]
4018         node2 = row1[local_id - 1]
4019         node3 = row2[local_id + 1]
4020         node4 = row2[local_id]

```

```

4021         node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
4022         fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
4023
4024     def add_def_quad_end2(self, fem: GeoGrillageFEM, row1, row2, local_id, el_num):
4025         # Last element: deformed quad for
4026         fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
4027         for quad_id in range(local_id, local_id + el_num):
4028             node1 = row1[local_id - 1]
4029             node2 = row1[local_id]
4030             node3 = row2[local_id + 1]
4031             node4 = row2[local_id]
4032             node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
4033             fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
4034
4035     def tr_web_element_row(self, fem: GeoGrillageFEM, start_element_id):
4036         """
4037         :param fem: Grillage FEM model.
4038         :param start_element_id: Starting element ID for the row.
4039         :return: Generates elements on the transition row using quads and tris.
4040
4041         Method generates elements on the segment transition web row.
4042
4043         flange_edge_nodes - input distances between flange nodes.
4044         p_row_limit - number of node rows with plate edge node spacing.
4045         ref_node_list - list of nodes on the selected segment for each row.
4046         tr_row1 - input node ID list, upper row of nodes.
4047         tr_row2 - input node ID list, lower row of nodes.
4048         n_quad - number of quad elements at the plating.
4049         n_tri1, n_tri2 - number of triangle elements at edge1 and edge2
4050         n_elem - total number of elements in transition row.
4051         n_nd_quad - total number of non deformed quad elements.
4052         """
4053         flange_edge_nodes = self._edge_flange_nodes
4054         p_row_limit = self.plate_node_row_number()
4055         ref_node_list = self.reference_web_node_ID_list()
4056
4057         tr_row1 = ref_node_list[p_row_limit - 1]
4058         tr_row2 = ref_node_list[p_row_limit]
4059
4060         n_tri1, n_tri2 = self.identify_num_of_tris(self._segment)
4061         n_elem = len(flange_edge_nodes)
4062         n_nd_quad = n_elem - 2 * n_tri1 - 2 * n_tri2
4063         end_id = start_element_id + n_elem - 1
4064         local_id = 0
4065
4066         if n_tri1 == 1:
4067             self.add_first_quad_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id, 1)
4068             local_id += 1
4069             self.add_first_tria_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id)
4070             local_id += 1
4071             self.add_quad_after_tria(fem, tr_row1, tr_row2, local_id, n_nd_quad)
4072         else:
4073             self.add_first_quad_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id, n_nd_quad)
4074
4075         if n_tri2 == 1:
4076             local_id += n_nd_quad
4077             if n_tri1 == 1:
4078                 self.add_second_tria_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id)
4079                 local_id += 1
4080                 self.add_last_quad_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id, 1)

```



```

4081         else:
4082             self.add_first_tria_to_row(fem, tr_row1, tr_row2, local_id)
4083             local_id += 1
4084             self.add_def_quad_end2(fem, tr_row1, tr_row2, local_id, 1)
4085
4086     return end_id
4087
4088 def bot_web_element_row(self, fem: GeoGrillageFEM, start_element_id):
4089     """
4090     :param fem: Grillage FEM model.
4091     :param start_element_id: Starting element ID for the row.
4092     :return: Generates quad elements on the bottom row.
4093     """
4094     flange_edge_nodes = self._edge_flange_nodes
4095     ref_node_list = self.reference_web_node_ID_list()
4096     p_row_limit = self.plate_node_row_number()           # Plate row limit
4097     f_row_limit = self.flange_node_row_number()         # Flange row limit
4098     element_id = start_element_id
4099     range_end = len(flange_edge_nodes)
4100     fem_prop_id = self.get_web_element_property_id(fem)
4101
4102     for row in range(p_row_limit, p_row_limit + f_row_limit - 1):
4103         local_id = 0
4104         for quad_id in range(local_id, range_end):
4105             node1 = ref_node_list[row][local_id]
4106             node2 = ref_node_list[row][local_id + 1]
4107             node3 = ref_node_list[row + 1][local_id + 1]
4108             node4 = ref_node_list[row + 1][local_id]
4109             node_id_list = [node1, node2, node3, node4]
4110             fem.add_quad_element(fem_prop_id, node_id_list)
4111             element_id += 1
4112             local_id += 1
4113     return element_id
4114
4115 def generate_web_elements(self, fem: GeoGrillageFEM):
4116     """
4117     Method for generating web elements one row at a time, using a combination
4118     of quad and triangle elements.
4119
4120     If there are 3 or more rows of elements, the transition row will always
4121     be the second row from the flange.
4122     If there are 2 rows of elements, the transition row is on top.
4123     If there is 1 row of elements, only the transition row exists.
4124
4125     :return: Generates elements on the entire segment web and returns last
4126             element ID to continue element numeration on other segments.
4127     """
4128     if self._mesh_size.min_num_eweb == 1:
4129         end_id = self.tr_web_element_row(fem, self._start_element_id)
4130
4131     elif self._mesh_size.min_num_eweb == 2:
4132         end_id = self.tr_web_element_row(fem, self._start_element_id)
4133         end_id = self.bot_web_element_row(fem, end_id)
4134
4135     else:
4136         end_id = self.top_web_element_row(fem, self._start_element_id)
4137         for row in range(0, self._mesh_size.min_num_eweb - 3):
4138             end_id = self.top_web_element_row(fem, end_id)
4139         end_id = self.tr_web_element_row(fem, end_id)
4140         end_id = self.bot_web_element_row(fem, end_id)

```

```

4141
4142     return end_id
4143
4144
4145 class GrillageMesh:
4146     def __init__(self, grillage: Grillage, axis_of_symm_override: AOS = None):
4147         """
4148         Class for generating FE mesh on the entire grillage model.
4149
4150         :param grillage: Input Grillage model.
4151         :param axis_of_symm_override: Selected Axis of Symmetry override.
4152         """
4153         self._grillage = grillage
4154         self.mesh_extent = MeshExtent(self._grillage, axis_of_symm_override)
4155
4156     def generate_FEM_property(self, fem: GeoGrillageFEM):
4157         self.mesh_extent.generate_FEM_material(fem)
4158         self.mesh_extent.generate_FEM_plate_property(fem)
4159         self.mesh_extent.generate_FEM_beam_property(fem)
4160         self.mesh_extent.generate_half_FEM_beam_property(fem)
4161
4162     def generate_plate_mesh(self, size: MeshSize, fem: GeoGrillageFEM):
4163         for plate in self.mesh_extent.full_plate_zones.values():
4164             pzm = PlateMesh(size, plate)
4165             pzm.generate_mesh(fem)
4166
4167         for plate in self.mesh_extent.long_half_plate_zones.values():
4168             pzm = PlateMesh(size, plate)
4169             pzm.generate_mesh(fem)
4170
4171         for plate in self.mesh_extent.tran_half_plate_zones.values():
4172             pzm = PlateMesh(size, plate)
4173             pzm.generate_mesh(fem)
4174
4175         for plate in self.mesh_extent.quarter_plate_zone.values():
4176             pzm = PlateMesh(size, plate)
4177             pzm.generate_mesh(fem)
4178
4179     def generate_psm_mesh(self, size: MeshSize, fem: GeoGrillageFEM):
4180         pass
4181
4182     def vertical_bc_node_group(self, fem: GeoGrillageFEM):
4183         """
4184         Adds all nodes at the ends of primary supporting members to nodal group
4185         for pinned boundary conditions. Group ID = 1
4186         """
4187         nodes_dict = fem.nodes.values()
4188         end_nodes = self.mesh_extent.identify_both_psm_ends()
4189         coords = [node.p for node in nodes_dict]
4190         id_list = [node.id for node in nodes_dict]
4191         coords_1 = np.expand_dims(coords, 0)
4192         coords_2 = np.expand_dims(end_nodes, 1)
4193         boolean_array = np.isclose(coords_1, coords_2, rtol=1e-3).all(-1)
4194
4195         pinned_boundary_nodes = {}
4196         index_list = np.where(boolean_array)[1]
4197         for index in index_list:
4198             node_id = id_list[index]
4199             node = fem.nodes[node_id]
4200             pinned_boundary_nodes[node.id] = node

```

```

4201
4202     group_id = 1
4203     fem.add_node_group(group_id, pinned_boundary_nodes)
4204
4205 @staticmethod
4206 def origin_bc_node(fem: GeoGrillageFEM):
4207     """
4208     Identifies node at origin and adds it to group for
4209     translation boundary conditions along x and y axis. Group ID: 2
4210     """
4211     nodes_dict = fem.nodes.values()
4212     coords = [node.p for node in nodes_dict]
4213     id_list = [node.id for node in nodes_dict]
4214     coords_1 = np.expand_dims(coords, 0)
4215     coords_2 = np.array([0.0, 0.0, 0.0])
4216     boolean_array = np.isclose(coords_1, coords_2).all(-1)
4217     index_list = np.where(boolean_array)[1]
4218
4219     translation_node = {}
4220     node_id = id_list[index_list[0]]
4221     node = fem.nodes[node_id]
4222     translation_node[node.id] = node
4223
4224     group_id = 2
4225     fem.add_node_group(group_id, translation_node)
4226
4227 @staticmethod
4228 def long_symm_bc_node_group(fem: GeoGrillageFEM):
4229     """
4230     :return: Dictionary of all nodes on the longitudinal Axis of Symmetry
4231             for symmetry boundary conditions. Group ID = 4
4232     """
4233     nodes_dict = fem.nodes.values()
4234     y_coords = [node.p[1] for node in nodes_dict]
4235     id_list = [node.id for node in nodes_dict]
4236
4237     y_max = np.max(y_coords)
4238     boolean_array = np.isclose(y_coords, y_max, rtol=1e-2)
4239     node_index = np.where(boolean_array)
4240     node_index = np.concatenate(node_index)
4241
4242     long_symm_nodes = {}
4243     for index in range(0, len(node_index)):
4244         node_id = id_list[node_index[index]]
4245         node = fem.nodes[node_id]
4246         long_symm_nodes[node.id] = node
4247
4248     group_id = 4
4249     fem.add_node_group(group_id, long_symm_nodes)
4250
4251 @staticmethod
4252 def tran_symm_bc_node_group(fem: GeoGrillageFEM):
4253     """
4254     :return: Dictionary of all nodes on the transverse Axis of Symmetry
4255             for symmetry boundary conditions. Group ID = 5
4256     """
4257     nodes_dict = fem.nodes.values()
4258     x_coords = [node.p[0] for node in nodes_dict]
4259     id_list = [node.id for node in nodes_dict]
4260

```

```

4261     x_max = np.max(x_coords)
4262     boolean_array = np.isclose(x_coords, x_max, rtol=1e-2)
4263     node_index = np.where(boolean_array)
4264     node_index = np.concatenate(node_index)
4265
4266     tran_symm_nodes = {}
4267     for index in range(0, len(node_index)):
4268         node_id = id_list[node_index[index]]
4269         node = fem.nodes[node_id]
4270         tran_symm_nodes[node.id] = node
4271
4272     group_id = 5
4273     fem.add_node_group(group_id, tran_symm_nodes)
4274
4275     def generate_pinned_bc(self, fem: GeoGrillageFEM, symmetry: AOS):
4276         """
4277         Method generates nodal groups and boundary conditions on the ends
4278         of Primary Supporting Members based on Axis of Symmetry.
4279         """
4280         self.vertical_bc_node_group(fem)
4281         bc_id = 1
4282         lc_id = 1
4283         dof = [3]          # z axis translation
4284         dof_val = [0.0]
4285         nodal_group = 1
4286         fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4287
4288         self.origin_bc_node(fem)
4289         if symmetry is AOS.LONGITUDINAL:
4290             bc_id = 2
4291             dof = [1]          # x axis translation
4292             dof_val = [0.0]
4293             nodal_group = 2
4294             fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4295
4296         elif symmetry is AOS.TRANSVERSE:
4297             bc_id = 2
4298             dof = [2]          # y axis translation
4299             dof_val = [0.0]
4300             nodal_group = 2
4301             fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4302
4303         elif symmetry is AOS.NONE:
4304             bc_id = 2
4305             dof = [1, 2]          # x and y axis translation
4306             dof_val = [0.0, 0.0]
4307             nodal_group = 2
4308             fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4309
4310     def generate_symm_bc(self, fem: GeoGrillageFEM, symmetry: AOS):
4311         """
4312         Method generates nodal groups and symmetry boundary conditions based on
4313         Axis of Symmetry.
4314         """
4315         lc_id = 1
4316
4317         if symmetry is AOS.LONGITUDINAL:
4318             self.long_symm_bc_node_group(fem)
4319             bc_id = 4
4320             nodal_group = 4

```

```

4321         dof = [2, 4, 6]      # y axis translation, x and z axis rotation
4322         dof_val = [0.0, 0.0, 0.0]
4323         fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4324
4325     elif symmetry is AOS.TRANSVERSE:
4326         self.tran_symm_bc_node_group(fem)
4327         bc_id = 4
4328         nodal_group = 5
4329         dof = [1, 5, 6]      # x axis translation, y and z axis rotation
4330         dof_val = [0.0, 0.0, 0.0]
4331         fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4332
4333     elif symmetry is AOS.BOTH:
4334         self.long_symm_bc_node_group(fem)
4335         self.tran_symm_bc_node_group(fem)
4336
4337         bc_id = 4
4338         nodal_group = 4
4339         dof = [2, 4, 6]      # y axis translation, x and z axis rotation
4340         dof_val = [0.0, 0.0, 0.0]
4341         fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4342
4343         bc_id = 5
4344         nodal_group = 5
4345         dof = [1, 5, 6]      # x axis translation, y and z axis rotation
4346         dof_val = [0.0, 0.0, 0.0]
4347         fem.add_boundary_condition(bc_id, lc_id, dof_val, dof, nodal_group)
4348
4349     @staticmethod
4350     def generate_pressure_load(fem: GeoGrillageFEM, pressure):
4351         lc_id = 1
4352         fem.addLoadCase(lc_id, "Pressure Load Case")
4353         group_id = 6
4354         fem.add_element_group(group_id, fem.plate_elements)
4355         fem.add_pressure_load(1, lc_id, pressure, group_id)
4356
4357     def generate_loadcase(self, fem: GeoGrillageFEM, symmetry, pressure):
4358         self.generate_pinned_bc(fem, symmetry)
4359         self.generate_symm_bc(fem, symmetry)
4360         self.generate_pressure_load(fem, pressure)
4361
4362     @staticmethod
4363     def generate_self_weight(fem: GeoGrillageFEM, gravity):
4364         lc_id = 1
4365         fem.add_self_weight(2, lc_id, gravity)
4366
4367     def generate_grillage_mesh(self, name, ebs, eweb, eaf, far, par, dpar):
4368         pass
4369
4370
4371     class MeshVariantV1(GrillageMesh):
4372         def __init__(self, grillage: Grillage, axis_of_symm_override: AOS = None):
4373             super().__init__(grillage, axis_of_symm_override)
4374
4375         def generate_psm_mesh(self, size: MeshSize, fem: GeoGrillageFEM):
4376             self.mesh_extent.model_check.same_flange_width_test()
4377
4378             n_id = fem.id_node_count
4379             e_id = fem.id_element_count
4380

```

```

4381     for segment in self.mesh_extent.full_segments.values():
4382         sm = SegmentMeshV1(size, segment, n_id, e_id)
4383         n_id, e_id = sm.generate_mesh(fem)
4384
4385     for segment in self.mesh_extent.half_segments.values():
4386         sm = SegmentMeshV1(size, segment, n_id, e_id)
4387         n_id, e_id = sm.generate_mesh(fem)
4388
4389     def generate_grillage_mesh(self, name, ebs, eweb, eaf, far, par, dpar):
4390         """
4391         :param name: Mesh name.
4392         :param ebs: Number of elements between stiffeners.
4393         :param eweb: Number of elements representing the web of a primary
4394             supporting member along its height.
4395         :param eaf: Number of elements across primary supporting member flange.
4396         :param far: Maximum PSM flange aspect ratio.
4397         :param par: Maximum plate and PSM web aspect ratio.
4398         :param dpar: Desired plating aspect ratio, less than the maximum.
4399         :return: GeoGrillageFEM object.
4400         """
4401         fem = GeoGrillageFEM(name)
4402         size = ElementSizeV1(self.mesh_extent, ebs, eweb, eaf, far, par, dpar)
4403         size.calculate_mesh_dimensions()
4404         self.generate_FEM_property(fem)
4405         self.generate_plate_mesh(size, fem)
4406         self.generate_psm_mesh(size, fem)
4407         fem.merge_coincident_nodes()
4408         fem.merge_coincident_elements()
4409
4410         print("Mesh V1 generation complete.")
4411         return fem
4412
4413
4414     class MeshVariantV2(GrillageMesh):
4415         def __init__(self, grillage: Grillage, axis_of_symm_override: AOS = None):
4416             super().__init__(grillage, axis_of_symm_override)
4417
4418         def generate_psm_mesh(self, size: MeshSize, fem: GeoGrillageFEM):
4419             n_id = fem.id_node_count
4420             e_id = fem.id_element_count
4421
4422             for segment in self.mesh_extent.full_segments.values():
4423                 sm = SegmentMeshV2(size, segment, n_id, e_id)
4424                 n_id, e_id = sm.generate_mesh(fem)
4425
4426             for segment in self.mesh_extent.half_segments.values():
4427                 sm = SegmentMeshV2(size, segment, n_id, e_id)
4428                 n_id, e_id = sm.generate_mesh(fem)
4429
4430         def generate_grillage_mesh(self, name, ebs, eweb, eaf, far, par, dpar):
4431             """
4432             :param name: Mesh name.
4433             :param ebs: Number of elements between stiffeners.
4434             :param eweb: Number of elements representing the web of a primary
4435                 supporting member along its height.
4436             :param eaf: Number of elements across primary supporting member flange.
4437             :param far: Maximum PSM flange aspect ratio.
4438             :param par: Maximum plate and PSM web aspect ratio.
4439             :param dpar: Desired plating aspect ratio, less than the maximum.
4440             :return: GeoGrillageFEM object.

```

```
4441     """
4442     fem = GeoGrillageFEM(name)
4443     size = ElementSizeV2(self.mesh_extent, ebs, eweb, eaf, far, par, dpar)
4444     size.calculate_mesh_dimensions()
4445     self.generate_FEM_property(fem)
4446     self.generate_plate_mesh(size, fem)
4447     self.generate_psm_mesh(size, fem)
4448     fem.merge_coincident_nodes()
4449     fem.merge_coincident_elements()
4450
4451     print("Mesh V2 generation complete.")
4452     return fem
4453
```

PRILOG V

Programski kod modula grillage_fem.py


```

1 import itertools
2 from femdir.geofem import *
3 from timeit import default_timer as timer
4
5
6 class GeoGrillageFEM (GeoFEM):
7     def __init__(self, name=''):
8         """
9         Class for generating GeoFEM grillage FEM model.
10
11         plate_elements - All quad elements of the grillage plating.
12         initial_node_overlaps - Dictionary of nodes with expected overlaps.
13         flange_element_overlaps - Dictionary of elements with expected overlaps.
14
15         Conversion dictionaries for Grillage model properties [key] into GeoFEM
16         properties [value]:
17
18         plate_property_IDs - Model Plate properties into GeoFEM PlateProperty
19         stiff_beam_prop_IDs - Model stiffener BeamProperty into GeoFEM Beam property
20         half_stiff_beam_prop_IDs - Model stiffener BeamProperty with half original
21         stiffness for beams on Axis Of Symmetry into GeoFEM Beam property.
22         web_prop_IDs - Model BeamProperty into GeoFEM PlateProperty
23         flange_prop_IDs - Model BeamProperty into GeoFEM PlateProperty
24         half_web_property_IDs - Model BeamProperty into GeoFEM PlateProperty,
25         for Segments on AOS with half web thickness.
26         """
27         super().__init__(name)
28         self.plate_elements = {}
29         self.initial_node_overlaps = {}
30         self.flange_element_overlaps = {}
31
32         self.plate_property_IDs = {}
33         self.stiff_beam_prop_IDs = {}
34         self.half_stiff_beam_prop_IDs = {}
35         self.web_property_IDs = {}
36         self.flange_property_IDs = {}
37         self.half_web_property_IDs = {}
38
39         self.id_node_count = 1
40         self.id_element_count = 1
41         self.id_prop_count = 1
42
43     def add_node(self, node_coords):
44         """
45         Add generated node to FEM model.
46         :param node_coords:
47         """
48         node = Node(self.id_node_count, node_coords)
49         self.addNode(node)
50         self.id_node_count += 1
51         return node
52
53     def add_node_to_node_overlaps(self, node):
54         """
55         :param node:
56         :return: Add edge nodes to FEM model overlaps dictionary.
57         """
58         self.initial_node_overlaps[node.id] = node
59
60     def add_element_to_element_overlaps(self, element):

```

```

61         """
62         :param element:
63         :return: Add flange elements to FEM model overlaps dictionary.
64         """
65         self.flange_element_overlaps[element.id] = element
66
67     def add_to_plate_elements(self, element):
68         """
69         :param element:
70         :return: Add plate elements to FEM model plate elements dictionary.
71         """
72         self.plate_elements[element.id] = element
73
74     def add_element(self, elem: Element, idProp, nodeIds):
75         """
76         Add generated element to FEM model.
77         :param elem:
78         :param idProp: Element property ID.
79         :param nodeIds: Node ID list.
80         """
81         elem.init(self.id_element_count)
82         elem.property = self.getProperty(idProp)
83         for idNod in nodeIds:
84             node = self.getNode(idNod)
85             elem.addNode(node)
86         self.addElement(elem)
87         self.id_element_count += 1
88         return elem
89
90     def add_quad_element(self, idProp, nodeIds):
91         """
92         Add generated quad element to FEM model.
93         :param idProp:
94         :param nodeIds:
95         """
96         elem = QuadElement()
97         self.add_element(elem, idProp, nodeIds)
98         return elem
99
100    def add_tria_element(self, idProp, nodeIds):
101        """
102        Add generated triangle element to FEM model.
103        :param idProp:
104        :param nodeIds:
105        """
106        elem = TriaElement()
107        self.add_element(elem, idProp, nodeIds)
108        return elem
109
110    def add_beam_element(self, idProp, nodeIds, vect_orient):
111        """
112        Add generated beam element to FEM model.
113        :param idProp:
114        :param nodeIds:
115        :param vect_orient:
116        """
117        elem = BeamElementShipStructure()
118        dir_vector = BeamOrientationVector(vect_orient)
119        elem.set_beam_orientation(dir_vector)
120        self.add_element(elem, idProp, nodeIds)

```

```

121     return elem
122
123     def add_material(self, material_property):
124         """
125         :param material_property: Grillage model MaterialProperty object.
126         :return: Add materials from grillage model.
127             E - modulus of elasticity, [N/mm2]
128             v - Poisson's ratio
129             ro - material density, [kg/m3]
130             Reh - yield strength, [N/mm2]
131         """
132         gfe_material = Material()
133         gfe_material.init(material_property.id, material_property.name)
134         gfe_material.E = material_property.E
135         gfe_material.ni = material_property.v
136         gfe_material.rho = material_property.ro
137         gfe_material.ReH = material_property.Reh
138         self.addMaterial(gfe_material)
139
140     def add_property(self, prop):
141         prop.id = self.id_prop_count
142         self.addProperty(prop)
143         self.id_prop_count += 1
144         return prop
145
146     def add_plate_property(self, prop_id, tp, mat):
147         prop = PlateProperty()
148         prop.init(id, 'Plate_property_' + str(prop_id))
149         prop.tp = tp
150         prop.material = mat
151         self.addProperty(prop)
152
153     def add_T_beam_property(self, name, hw, tw, bf, tf, mat):
154         prop = T_Profile_BeamProperty()
155         prop.init(id, name)
156         prop.hw = hw
157         prop.tw = tw
158         prop.bf = bf
159         prop.tf = tf
160         prop.material = mat
161         self.addProperty(prop)
162
163     def add_half_T_beam_property(self, name, hw, tw, bf, tf, mat):
164         prop = Half_T_Profile_BeamProperty()
165         prop.init(id, name)
166         prop.hw = hw
167         prop.tw = tw
168         prop.bf = bf
169         prop.tf = tf
170         prop.material = mat
171         self.addProperty(prop)
172
173     def add_L_beam_property(self, name, hw, tw, bf, tf, mat):
174         prop = L_Profile_BeamProperty()
175         prop.init(id, name)
176         prop.hw = hw
177         prop.tw = tw
178         prop.bf = bf
179         prop.tf = tf
180         prop.material = mat

```

```

181         self.add_property(prop)
182
183     def add_half_L_beam_property(self, name, hw, tw, bf, tf, mat):
184         prop = Half_L_Profile_BeamProperty()
185         prop.init(id, name)
186         prop.hw = hw
187         prop.tw = tw
188         prop.bf = bf
189         prop.tf = tf
190         prop.material = mat
191         self.add_property(prop)
192
193     def add_FB_beam_property(self, name, hw, tw, mat):
194         prop = FB_Profile_BeamProperty()
195         prop.init(id, name)
196         prop.hw = hw
197         prop.tw = tw
198         prop.material = mat
199         self.add_property(prop)
200
201     def add_half_FB_beam_property(self, name, hw, tw, mat):
202         prop = Half_FB_Profile_BeamProperty()
203         prop.init(id, name)
204         prop.hw = hw
205         prop.tw = tw
206         prop.material = mat
207         self.add_property(prop)
208
209     def add_Hat_beam_property(self, name, h, t, bf, fi, mat):
210         prop = Hat_Profile_BeamProperty()
211         prop.init(id, name)
212         prop.h = h
213         prop.t = t
214         prop.bf = bf
215         prop.fi = fi
216         prop.material = mat
217         self.add_property(prop)
218
219     def add_half_Hat_beam_property(self, name, h, t, bf, fi, mat):
220         prop = Half_Hat_Profile_BeamProperty()
221         prop.init(id, name)
222         prop.h = h
223         prop.t = t
224         prop.bf = bf
225         prop.fi = fi
226         prop.material = mat
227         self.add_property(prop)
228
229     def add_Bulb_beam_property(self, name, hw_ekv, tw_ekv, bf_ekv, tf_ekv, mat):
230         prop = Bulb_Profile_BeamProperty()
231         prop.init(id, name)
232         prop.hw_ekv = hw_ekv
233         prop.tw_ekv = tw_ekv
234         prop.bf_ekv = bf_ekv
235         prop.tf_ekv = tf_ekv
236         prop.material = mat
237         self.add_property(prop)
238
239     def add_half_Bulb_beam_property(self, name, hw_ekv, tw_ekv, bf_ekv, tf_ekv, mat):
240         prop = Half_Bulb_Profile_BeamProperty()

```

```

241     prop.init(id, name)
242     prop.hw_ekv = hw_ekv
243     prop.tw_ekv = tw_ekv
244     prop.bf_ekv = bf_ekv
245     prop.tf_ekv = tf_ekv
246     prop.material = mat
247     self.add_property(prop)
248
249     @staticmethod
250     def check_node_overlap(nodes_dict):
251         """
252         :return: Identifies coincident nodes in nodes_dict and returns
253                 overlap_list, where the first element are unique coordinates of
254                 overlapped nodes and the rest are overlapped geofementity Nodes.
255         """
256         overlap_list = []
257         for node in nodes_dict.values():
258             duplicate_coords = False
259             for row in overlap_list:
260                 if np.allclose(node.p, row[0]):
261                     row.append(node)
262                     duplicate_coords = True
263                     break
264             if duplicate_coords is False:
265                 overlap_list.append([node.p, node])
266         return overlap_list
267
268     def check_node_overlap_np(self, nodes_dict):
269         """
270         :return: Identifies coincident nodes in nodes_dict and returns
271                 overlap_list, where the first element are unique coordinates of
272                 overlapped nodes and the rest are overlapped geofementity Node
273                 objects. Optimized version with NumPy functions.
274         """
275         print("Starting coincident node check...")
276         start = timer()
277
278         coords = [node.p for node in nodes_dict.values()]
279         id_list = [node.id for node in nodes_dict.values()]
280
281         coords_1 = np.expand_dims(coords, 0)
282         coords_2 = np.expand_dims(coords, 1)
283         # Relative node merge tolerance = 0.1mm
284         boolean_array = np.isclose(coords_1, coords_2, rtol=1e-3).all(-1)
285         boolean_array = np.tril(boolean_array)
286         np.fill_diagonal(boolean_array, False)
287         coincident_pairs = np.where(boolean_array)
288         x_index, y_index = coincident_pairs
289         n_overlaps = len(x_index)
290
291         overlap_list = []
292         for index in range(0, n_overlaps):
293             node_1_id = id_list[int(x_index[index])]
294             node_2_id = id_list[int(y_index[index])]
295             node1 = self.nodes[node_1_id]
296             node2 = self.nodes[node_2_id]
297
298             duplicate_coords = False
299             for row in overlap_list:
300                 if np.allclose(node1.p, row[0], rtol=1e-3):

```

```

301         if node1 not in row[1:]:
302             row.append(node1)
303         if node2 not in row[1:]:
304             row.append(node2)
305         duplicate_coords = True
306         break
307
308     if duplicate_coords is False:
309         overlap_list.append([node1.p, node1, node2])
310
311 end = timer()
312 print("Coincident node identification complete, found",
313       len(overlap_list), "unique coordinates in", end - start, "s")
314
315 return overlap_list
316
317 def full_model_node_overlap_check(self):
318     print("Starting full model coincident node check...")
319     nodes_dict = self.nodes.values()
320     coords = [node.p for node in nodes_dict]
321
322     coords_1 = np.expand_dims(coords, 0)
323     coords_2 = np.expand_dims(coords, 1)
324     # Relative node merge tolerance = 0.1mm
325     boolean_array = np.isclose(coords_1, coords_2, rtol=1e-3).all(-1)
326     boolean_array = np.tril(boolean_array)
327     np.fill_diagonal(boolean_array, False)
328     x_index, y_index = np.where(boolean_array)
329     n_overlaps = len(x_index)
330
331     if n_overlaps > 1:
332         print("Full model coincident node identification complete. "
333               "Node overlaps detected. Total overlaps:", n_overlaps)
334     else:
335         print("Full model coincident node identification complete."
336               " No node overlaps found.")
337
338 @staticmethod
339 def sorted_coincident_nodes(overlap_list):
340     """
341     Method sorts coincident nodes into remaining nodes and to delete nodes.
342
343     :return: merge_nodes dictionary of nodes to be deleted (key) and
344             replaced with (value), delete_list of all nodes to be deleted.
345     """
346     overlap_counter = 0
347     merge_nodes = {}
348     delete_list = []
349     for row in overlap_list:
350         for node_to_delete in row[2:]:
351             merge_nodes[node_to_delete] = row[1] # First node remains
352             delete_list.append(node_to_delete)
353             # print("Coordinates:", row[0], "nodes:",
354                   #       [node.id for node in row[1:]])
355             overlap_counter += len(row[1:])
356
357     print("Total coincident nodes:", overlap_counter)
358
359     return merge_nodes, delete_list
360

```

```

361 def merge_coincident_nodes(self):
362     nodes_dict = self.initial_node_overlaps
363     overlap_list = self.check_node_overlap_np(nodes_dict)
364     merge_nodes, delete_list = self.sorted_coincident_nodes(overlap_list)
365
366     start = timer()
367
368     # Change overlapped nodes for all elements
369     for element in self.elements.values():
370         local_node_id = 0
371         for node in element.nodes:
372             if node in delete_list:
373                 element.nodes[local_node_id] = merge_nodes[node]
374                 local_node_id += 1
375
376     # Delete overlapped nodes
377     for node in delete_list:
378         del self.nodes[node.id]
379
380     end = timer()
381     print("Node merge complete, deleted", len(delete_list),
382           "nodes in", end - start, "s")
383     print("Total number of nodes:", self.num_nodes)
384     print("Total number of elements before merge:", self.num_elements)
385
386     @staticmethod
387     def check_element_overlap(element_dict):
388         overlap_list = []
389         element_combos = itertools.combinations(element_dict.values(), 2)
390         for elements in element_combos:
391             element_1, element_2 = elements
392             nodes1 = [node.id for node in element_1.nodes]
393             nodes2 = [node.id for node in element_2.nodes]
394
395             if set(nodes1) == set(nodes2):
396                 overlap_list.append(elements)
397
398         return overlap_list
399
400     def merge_coincident_elements(self):
401         element_dict = self.flange_element_overlaps
402         overlapped_elements = self.check_element_overlap(element_dict)
403         for elements in overlapped_elements:
404             element_1, element_2 = elements
405
406             tp_e1 = self.properties[element_1.prop_id].tp
407             tp_e2 = self.properties[element_2.prop_id].tp
408
409             if tp_e2 > tp_e1:
410                 del self.elements[element_1.id]
411             else:
412                 del self.elements[element_2.id]
413
414         print("Total number of elements after merge:", self.num_elements)
415
416     def add_node_group(self, group_id: int, nodes: Dict):
417         group = NodeGroup()
418         group.init(group_id, "Node_group_" + str(group_id))
419         for node in nodes.values():
420             group.add_item(node)

```

```

421     self.addGroup(group_id, group)
422
423     def add_element_group(self, group_id: int, elements: Dict):
424         group = ElementGroup()
425         group.init(group_id, "Element_group_" + str(group_id))
426         for element in elements.values():
427             group.add_item(element)
428         self.addGroup(group_id, group)
429
430     def add_boundary_condition(self, bc_id: int, lc_id: int, values: List[float],
431                               dof: List[int], set_id: int):
432         """
433         :param bc_id: Boundary condition ID
434         :param lc_id: Load case ID
435         :param values: Value for the DoF: 1 or 0; list of same length as dof
436         :param dof: Degrees of Freedom: [wx=1, wy=2, wz=3, rx=4, ry=5, rz=6]
437         :param set_id: GeoFEM nodal group ID
438         """
439         group = self.getGroup(set_id)
440         bc = GroupNodalBC(bc_id, group, values, dof)
441         self.addBoundaryCondition(bc)
442         self.addBoundaryConditionToLoadcase(lc_id, bc)
443
444     def add_pressure_load(self, load_id: int, lc_id: int, pressure: float,
445                           set_id: int):
446         """
447         :param load_id: Pressure load ID
448         :param lc_id: Load case ID
449         :param pressure: External pressure
450         :param set_id: GeoFEM element group ID
451         :return:
452         """
453         group = self.getGroup(set_id)
454         pressure_load = GroupPressureLoad(load_id, group, pressure, flip=True)
455         self.addLoad(pressure_load)
456         self.addLoadToLoadcase(lc_id, pressure_load)
457
458     def add_self_weight(self, load_id: int, lc_id: int, gravity_val):
459         self_weight = AccelerationLoad(load_id, gravity_val)
460         self.addLoad(self_weight)
461         self.addLoadToLoadcase(lc_id, self_weight)
462

```