

Statička analiza pomorske fiksne rešetkaste strukture

Orlović, Robert

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:540278>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Robert Orlović

Zagreb, 2023. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Student:

Robert Orlović

Zagreb, 2023. godina.

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

Zahvaljujem se svima koji su bili uz mene za vrijeme mog školovanja.

Robert Orlović



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Robert Orlović** JMBAG: 0035205961

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Statička analiza pomorske fiksne rešetkaste platforme**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Static analysis of offshore jacket structure**

Opis zadatka:

Pomorski fiksni objekt rešetkastog tipa (eng. offshore jacket structure) uobičajeno se koristi za eksploataciju ugljikovodika s morskih nalazišta koja se nalaze na malim dubinama. U ovom diplomskom radu provest će se statička analiza ovakvog tipa objekta za rad na zadanoj pomorskoj lokaciji.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Prema odabranim pravilima za gradnju pomorskih objekata, definirati projektne kriterije za navedeni objekt koji se moraju uzeti u obzir kod provedbe statičke analize.
2. Definirati različite kombinacije opterećenja za koja je potrebno provesti analizu. Navedene kombinacije trebaju sadržavati opterećenja iz okoliša tj. djelovanje vjetra, valova i morske struje. U obzir također uzeti i opterećenja uslijed težine objekta i težine procesnih postrojenja.
3. Provesti statičku analizu konstrukcije objekta koristeći metodu konačnih elementa za definirane kombinacije opterećenja te provesti provjeru nastanka tipičnih oštećenja za ovakav tip konstrukcije.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Čatipović

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Čatipović

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Fiksna rešetkasta konstrukcija.....	1
2. PROJEKTNI ZAHTJEVI PO PRAVILIMA AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE I NJIHOVO DEFINIRANJE	3
2.1. American petroleum institute	3
2.2. Planiranje platforme	3
2.3. Operativno razmatranje platforme	3
2.3.1. Funkcija.....	3
2.3.2. Lokacija.....	3
2.3.3. Orijehtacija	4
2.3.4. Morska dubina.....	4
2.3.5. Elevacija paluba	4
2.3.6. Konduktori	4
2.3.7. Raspored opreme.....	4
2.3.8. Opskrba platforme.....	4
2.4. Razmatranje okoliša platforme.....	5
2.4.1. Općenita meteorološka i oceanografska razmatranja.....	5
2.4.2. Djelovanje vjetra	5
2.4.3. Djelovanje valova.....	6
2.4.4. Djelovanje morske struje.....	7
2.5. Vrste opterećenja i njihovo određivanje.....	7
2.5.1. Opterećenja uzrokovana vlastitom težinom	7
2.5.2. Promjenjiva opterećenja	7
2.5.3. Okolišna opterećenja	8
2.5.4. Opterećenja prilikom gradnje.....	8
2.5.5. Opterećenja prilikom premještanja konstrukcije.....	8
2.5.6. Dinamička opterećenja	8
2.6. Opterećenja zavisna o uvjetima.....	8
2.7. Projektna opterećenja	9
2.7.1. Valovi	9

2.7.1.1.	Postupak proračuna opterećenja vala na konstrukciju.....	10
2.7.1.2.	Prividni valni period	11
2.7.1.3.	Dvodimenzajska kinematika vala.....	11
2.7.1.4.	Kinematički koeficijent vala	12
2.7.1.5.	Faktor zaklanjanja morske struje.....	13
2.7.1.6.	Kombinacija kinematike vala i morske struje	13
2.7.1.7.	Obraštanje.....	14
2.7.1.8.	Koeficijent otpora i inercije	15
2.7.1.9.	Faktor utjecaja konduktora.....	15
2.7.1.10.	Hidrodinamčke sile za dodatke	16
2.7.1.11.	Morisonova jednadžba	16
2.7.1.12.	Globalne sile na strukturu.....	17
2.7.2.	Vjetar.....	17
2.7.3.	Morska struja.....	18
3.	STOKESOV VAL	19
3.1.	STOKESOVA NELINEARNA VALNA TEORIJA PETOG REDA	19
4.	MORISONOVA JEDNADŽBA	20
4.1.	Definicije i pretpostavke	20
4.2.	Sile inercije.....	20
4.3.	Sile otpora	21
4.4.	Koeficijenti otpora i inercije	22
5.	PROJEKTIRANJE STRUKTURE	24
5.1.	Dozvoljena naprezanja za cilindrične elemente	24
5.1.1.	Aksijalno vlačno naprezanje	24
5.1.2.	Aksijalno tlačno naprezanje	24
5.1.2.1.	Globalno izvijanje	24
5.1.2.2.	Lokalno izvijanje	25
5.1.3.	Savijanje	26
5.1.4.	Smično naprezanje	26
5.1.5.	Torzijsko naprezanje	27
5.1.6.	Kombinirano naprezanje za cilindrične elemente	27

5.2.	Provjera spojeva	28
5.2.1.	Klasifikacija spojeva	28
5.2.2.	Jednostavni spojevi	30
5.2.3.	Osnovni kapacitet spoja	31
5.2.4.	Faktor čvrstoće Q_f i faktor opterećenja nosivog elementa Q_u	32
5.2.4.1.	Faktor čvrstoće O_u	32
5.2.4.2.	Faktor opterećenja nosivog elementa O_f	33
5.2.5.	Provjera čvrstoće	34
5.2.6.	Oštećeni spojevi	34
6.	MODELIRANJE FIKSNE REŠETKASTE PLATFORME.....	35
6.1.	SACS.....	35
6.2.	Precede	36
6.3.	Modeliranje geometrije	36
6.4.	Modeliranje opterećenja.....	46
6.4.1.	Opterećenja vlastite težine i promjenjiva opterećenja.....	46
6.4.2.	Okolišna opterećenja	47
6.4.3.	Kombinacije opterećenja.....	48
6.4.4.	Suma globalnih sila i momenata	50
7.	PRIKAZ REZULTATA	51
7.1.	Kombinirano opterećenje elemenata	51
7.2.	provjera spojeva	54
8.	ZAKLJUČAK.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Fiksna rešetkasta konstrukcija, [5]	2
Slika 2.1	Područje prihvatljivosti linearne valne teorije, Stream funkcije i Stokes V. reda, [6]	12
Slika 2.2	Definiranje obraštaja	14
Slika 2.3	Zavisnost faktora utjecaja konduktora s obzirom na omjer udaljenosti konduktora i njihovog promjera, [6].....	16
Slika 5.1	Primjer klasifikacije spojeva s obzirom na karakteristike spoja	29
Slika 5.2	Terminologija spojeva.....	30
Slika 6.1	Odnosi između SACS modula.....	35
Slika 6.2	Prikaz sučelja SACS modula Precede	37
Slika 6.3	Prikaz sučelja SACS modula precede	38
Slika 6.4	prikaz sučelja SACS modula Precede	39
Slika 6.5	Grafički prikaz platforme nakon definiranja nogu i konduktora.....	40
Slika 6.6	Sučelje u Precedu za unos svojstva materijala	41
Slika 6.7	Tlocrt platforme na elevaciji od 21 metar ispod morske površine	42
Slika 6.8	Tlocrt platforme na elevaciji od 2 metra iznad morske površine	42
Slika 6.9	Prikaz platforme nakon dodavanja dijagonalnih elemenata	43
Slika 6.10	Geometrijski potpuno definirana platforma	45
Slika 7.1	Grafički prikaz maksimalnog kombiniranog naprezanja	52
Slika 7.2	Grafički prikaz spojeva najvećeg kombiniranog naprezanja (crvena boja)	56

POPIS TABLICA

Tablica 2.1	Faktor blokiranja morske struje u zavisnosti o broju nogu	13
Tablica 2.2	Preporučeni koeficijenti za okomiti smjer nailaska vjetra, [6].....	18
Tablica 5.1	Geometrijski parametri spoja	30
Tablica 5.2	Izračunavanje vrijednosti O_u za aksijalne slučajeve	32
Tablica 5.3	Koeficijenti C_1, C_2, C_3 zavisni o opterećenju.....	34
Tablica 6.1	Opterećenja vlastite težine platforme	46
Tablica 6.2	Promjenjiva opterećenja platforme	46
Tablica 6.3	Sile uzgona na platformu.....	47
Tablica 6.4	Svojstva okolišnog opterećenja za operativne uvjete.....	47
Tablica 6.5	Svojstva okolišnog opterećenja za ekstremne uvjete	48
Tablica 6.6	Kombinacija opterećenja u operativnim uvjetima	49
Tablica 6.7	Kombinacija opterećenja u ekstremnim uvjetima.....	49
Tablica 6.8	Suma globalnih sila i momenata na strukturu	50
Tablica 7.1	Elementi s kombiniranim opterećenjem većim od 0.5.....	53
Tablica 7.2	Spojevi s najvećim kombiniranim opterećenjem	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T_{app}	s	prividni valni period
λ	m	valna duljina
T	s	valni period
U_c	m/s	brzina morske struje u smjeru gibanja vala
d	m	dubina mora
H	m	visina vala
H_b	m	visina lomljenja vala
g	m/s ²	gravitacijsko ubrzanje
η	m	elevacija vala
z	m	elevacija morske struje
z'	m	elevacija trenutnog profila morske struje
e	-	relativna hrapavost obraštaja
k	m	visina obraslih organizama
D_o	m	promjer cilindra s obraštajem
ρ_v	Kg/m ³	gustoća vode
C_s	-	koeficijent otpora
C_M	-	koeficijent inercije
U_{mo}	m/s	horizontalna brzina valne čestice na razini morske površine
S	m	udaljenost središta dviju konduktorskih cijevi
D	m	promjer cilindričnog elementa konstrukcije
F_w	kN	sila na objekt uzrokovana vjetrom
ρ_z	Kg/m ³	gustoća zraka
C_s	-	koeficijent oblika
A_p	m ²	izložena projicirana površina platforme
P_d	N/m ²	hidrodinamički tlak
V_{x0}	m/s ²	brzina strujanja u smjeru osi x
ϕ	m ² /s	potencijal brzine
dF_{x0}	kN/m	diferencijalna inercijska sila
a_{x0}	m/s ²	ubrzanje strujanja u smjeru osi x
dF_{xd}	kN/m	diferencijalna sila otpora
v_n	m/s	brzina strujanja u smjeru vektora n
a_n	m/s ²	ubrzanje strujanja u smjeru vektora n
r	m	vektor položaja u globalnom koordinatnom sustavu
F_n	kN	hidrodinamička sila u smjeru vektora n
t	s	vrijeme
Re	-	Reynoldsov broj
$V_{x,max}$	m/s	maksimum horizontalne komponente brzine vodene čestice

$V_{z,max}$	m/s	maksimum vertikalne komponente brzine vodene čestice
KC	-	Keulegan-Carpenterov broj
F_y	kN/m ²	granica razvlačenja
F_t	kN/m ²	dozvoljeno vlačno naprezanje
K	-	faktor efektivne duljine
E	kN/m ²	Youngov modul elastičnosti
l	m	euljina elementa
r_t	m ³	radijus tromosti
F_a	kN/m ²	aksijalno tlačno naprezanje
F_{xe}	kN/m ²	elastično lokalno izvijanje
C_e	-	koeficijent kritičkog elastičnog izvijanja
F_{xe}	kN/m ²	neelastično lokalno izvijanje
F_b	kN/m ²	dopušteno naprezanje savijanja
f_v	kN/m ²	najveće smično naprezanje
V	kN	smična sila
A	m ²	poprečni presjek
F_v	kN/m ²	dopušteno smično naprezanje
f_t	kN/m ²	najveća torzijska naprezanja
M_t	kNm	moment torzije
I_p	m ⁴	polarni moment tromosti
f_{td}	kN/m ²	dopušteno torzijsko naprezanje
F_{bx}	kN/m ²	tlačno ili vlačno naprezanje u ravnini
F_{by}	kN/m ²	tlačno ili vlačno naprezanje van ravnini
$F_{e'}$	kN/m ²	Eulerovo naprezanje podijeljeno s faktorom sigurnosti
C_m	-	redukcijski faktor
P_a	kN	dozvoljeni kapacitet aksijalnog opterećenja za poprečni veznik
M_a	kNm	dozvoljeni kapacitet savojnog momenta za poprečni veznik
FS	-	faktor sigurnosti
Q_u	-	faktor čvrstoće
Q_f	-	faktor prisutnosti opterećenja u nosivom elementu
F_{yc}	kN/m ²	granica popuštanja za nosivi element na spoju
Q_g	-	faktor razmaka
M_p	kNm	moment plastične defirmacije nosivog elementa
P_y	kN	granica popuštanja nosivog elementa prilikom aksijalnog opterećenja
P_C	kN	rezultanta nazivnog aksijalnog opterećenja u nosivom elementu
M_C	kNm	rezultanta nazivnog momenta savijanja u nosivom elementu

SAŽETAK

Unutar ovoga diplomskog rada provedena je statička analiza fiksne rešetkaste strukture. Analiza je provedena za operativne i ekstremne uvjete za 12 smjerova nailaska okolišnih opterećenja. Uz okolišna opterećenja razmatrana su opterećenja vlastitih težina, opterećenja opreme i ostalog procesnog postrojenja. Od okolišnih opterećenja razmatrani su valovi, morska struja i vjetar. Nakon modeliranja strukture i formiranja kombinacija opterećenja za ekstremne i operativne uvjete, provedena je statička analiza fiksne rešetkaste platforme. Za valnu teoriju korištena je Stokesova nelinearna teorija petoga reda, a za izračun hidrodinamičkih sila morske struje i valova korištena je Morisonova jednačnja. Statička analiza je provedena u programskom paketu SACS Offshore Structure Ultimate, koji se bazira na metodi konačnih elementa. Za provjeru strukturnog integriteta elemenata i spojeva korištena su pravila izdana od American Petroleum Institute (API) „Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 22nd ed.“. Struktura je zadovoljila sve kriterije provjere unutar statičkih analiza.

Ključne riječi: Statička analiza fiksne rešetkaste strukture, metoda konačnih elemenata, valna opterećenja, Morisonova jednačnja, provjera spojeva, kombinirano opterećenje

SUMMARY

Within this thesis, a static analysis of a jacket structure was carried out. The analysis was carried out for operational and extreme conditions for 12 directions of encountering environmental loads. With environmental loads, self weight loads, equipment loads and other process plant loads were considered. Environmental load considerations include waves, sea currents and wind. After modeling the structure and forming a combination of loads for extreme and operational conditions, a static analysis of the fixed jacket platform was performed. Stokes' fifth-order nonlinear theory was used for the wave theory, and Morison's equation was used to calculate the hydrodynamic forces of the sea current and waves. The analysis was carried out in the SACS Offshore Structure Ultimate software package, which is based on the finite element method. To check the structural integrity of elements and connections, the rules issued by the American Petroleum Institute (API) "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 22nd ed." were used. The structure met the criteria of all checks within the static analysis.

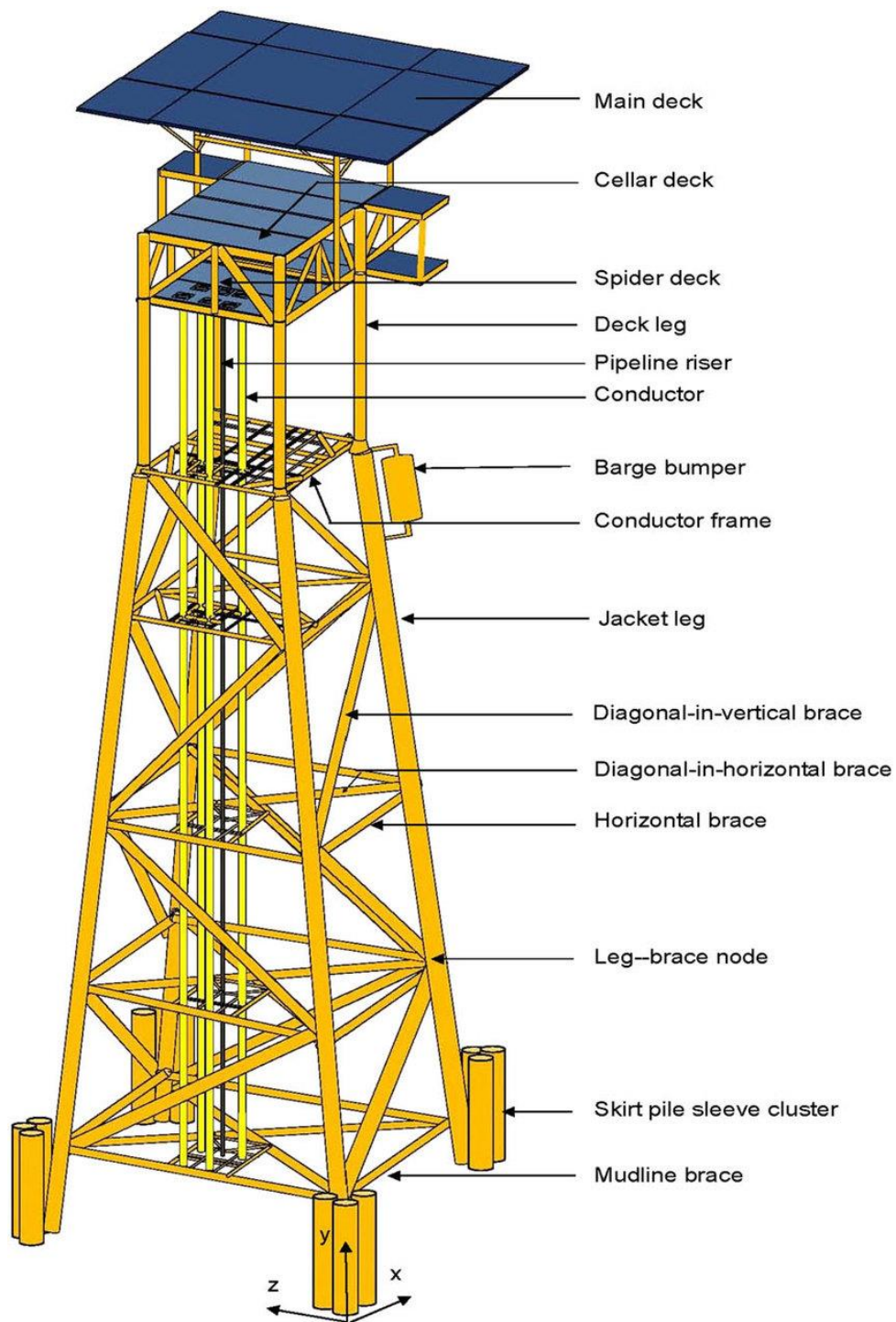
Keywords: Static analysis of jacket structure, finite element method, wave loads, Morison's equation, joint check, combined load

1. UVOD

Nakon detekcije nafte i plina ispod morskoga dna, krajem 19. stoljeća počeo je razvoj i projektiranje i naftnih platformi, [1]. Naftne platforme služe za istraživanje, crpljenje, preradu i privremeno spremanje nafte i zemljinog plina. Zavisno o prilikama i izvedbama platformi, naftne platforme se učvršćuju na morsko dno, a ako nije moguće vezanje za morsko dno platforme održavaju svoje mjesto rabeći sidra ili koriste propulzijske sustave, [2]. Tehnički gledano, projektiranje i izgradnja platforme je kombinacija projektiranje čelične konstrukcije i luke. Samo ograničeni broj inženjerskih fakulteta se usredotočuje na konstruiranje odobalnih struktura što uključuje i fiksne platforme, [3]. Postoji više vrsta naftnih platformi, a u ovom radu će se razmatrati te projektirati fiksna rešetkasta platforma (eng. jacket platform).

1.1. Fiksna rešetkasta konstrukcija

Rešetkasta konstrukcija je fiksna platforma u obliku prostornog okvira koja je sastavljena od nosača kružnog presjeka. Nosači su povezani s pilotima, koji prolaze kroz vertikalne nosače (noge platforme) te su vezani čvrsto na morsko dno. Najvažniji dio strukture su palube na kojima se nalaze procesna postrojenja, oprema potrebna za izvršavanje projektnih zadataka i stambene nastambe. Postoje razne izvedbe rešetkaste konstrukcije, u ovom radu izrađena je s dvije palube, podrumaska platforma(eng. celldeck) i glavna paluba (eng. maindeck). Ovakav oblik i primjena naftnih platformi je zabilježena u Meksičkom zaljevu, a koristimo ih u plitkim morima od nekoliko metara i prikladne su do 400 metara dubine, [4].



Slika 1.1 Fiksna rešetkasta konstrukcija, [5]

2. PROJEKTNI ZAHTJEVI PO PRAVILIMA AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE I NJIHOVO DEFINIRANJE

2.1. American petroleum institute

American Petroleum Institute (API) je vodeći svjetski institut za postavljanje standarda industrije nafte i plina. Uključuje standarde poput sprječavanje izlivanja ugljikovodika i zaštite okoliša, standarde za opremu i učinkovito upravljanje tehnološkom vodom te smjernice i preporučene prakse za siguran rad platformi. API standardi i prakse su također uključeni u propise za naftu i prirodni plin i ti se standardi naftne industrije najčešće citiraju od strane međunarodnih regulatora. Pravila objedinjuju sve zahtjeve i kriterije od proizvodnih do okolišnih opterećenja koja bi mogla utjecati na projekt platforme. U ovom radu i proračunu koristi API 2A-WSD, 22nd edition[6]. Ova publikacija služi kao vodič za izgradnju novih platformi i za premještanje postojećih, koje se koriste za bušenje, istraživanje i skladištenje ugljikovodika u morskim područjima. Konstrukcijski kriteriji uključuju sve operativne zahtjeve i podatke o okolišu koji bi mogli utjecati na konstrukciju platforme.

2.2. Planiranje platforme

Adekvatno planiranje treba napraviti prije nego što se započne sa projektiranjem kako bi se dobila funkcionalna i ekonomična rešetkasta platforma. Preliminarno planiranje mora uključiti sve operativne zahtjeve i okolišne uvijete koji bi mogli utjecati na konstrukciju platforme, [6].

2.3. Operativno razmatranje platforme

2.3.1. Funkcija

Funkcija platforme za koju treba biti projektirana obično se kategorizira kao bušenje, proizvodnja, skladištenje materijala, stambeni prostor ili njihova kombinacija. Potrebno je pažljivo razmotriti i prostorno projektirati palubu kako bi radni prostor i razmak između opreme bio po svim pravilima, API-ja, [6].

2.3.2. Lokacija

Lokacija platforme mora biti specificirana prije nego je konstrukcijski završimo. Okolišni uvjeti variraju s obzirom na geografsku lokaciju kao što su valna visina, vjetar, morska struja, valni period, plima i oseka, [6].

2.3.3. Orijehtacija

Orijehtacija platforme odnosi se na njenu zakrenutost u odnosu na geografski sjever te se koristi za definiranje smjerova vjetrova, morske struje i valova u operativnim i ekstremnim stanjima okoliša, [6].

2.3.4. Morska dubina

Informacija o dubina morske vode i morskim mijenama nam je izrazito važna kako bi što preciznije mogli utvrditi maksimalni gaz za pristajanje brodova za ukrcaj ugljikovodika. Navedena dubina bitna je i za definiranje elevacije paluba i bokobrana te za definiranje anti-korozivne zaštite razmatrane konstrukcije, [6].

2.3.5. Elevacija paluba

Jake sile i prekretni momenti nastaju kada valovi udaraju u donju palubu i opremu platforme. Visinu donje palube treba postaviti na način da se osigura odgovarajući razmak iznad projektne ekstremne visine vala, [6].

2.3.6. Konduktori

Konduktori su cjevasti elementi koji povezuju naftnu bušotinu s opremom potrebnom za izvlačenje ugljikovodika. Izloženi konduktori dodaju okolišne sile na platformu i zahtijevaju potporu. Broj konduktora i njihova veličina se određuje u preliminarnoj fazi projekta. Konduktorske cijevi najčešće ne sudjeluju u proračunu čvrstoće palube, [6].

2.3.7. Raspored opreme

Podatci o težini opreme za bušenje i procesiranje ugljikovodika potrebni su u razvojnoj fazi projekta. Koncentrirana opterećenja visokih iznosa trebaju biti raspoređena na platformi u skladu s konstrukcijskim rješenjima za podupiranje takvih opterećenja, [6].

2.3.8. Opskrba platforme

Planovi za opskrbu posade svakodnevnim potrepštinama te materijalima koji su potrebni za rad procesnih postrojenja potrebno je razviti na početku konstruiranja platforme zajedno s vrstom i veličinom opskrbnih plovila i sustavom sidrenja. Potrebno je odrediti broj i kapacitet palubnih dizalica koje prebacuju materijal na odgovarajuću lokaciju, [6].

2.4. Razmatranje okoliša platforme

2.4.1. Općenita meteorološka i oceanografska razmatranja

Prilikom definiranja meteoroloških i oceanografskih uvjeta koju utječu na platformu, potrebno se konzultirati sa stručnjacima. Izmjerene podatke ili modelom generirane podatke potrebno je statistički analizirati kako bi se razvili opisi normalnih i ekstremnih uvjeta okoliša.

Podjela vremenskih uvjeta okoliša je:

- Normalni okolišni uvjeti
 - Uvjeti koji su očekivani i često se javljaju u životnom vijeku platforme.
- Ekstremni uvjeti
 - Uvjeti koji se rijetko pojavljuju u životnom vijeku platforme.

Navedeni uvjeti koriste se za definiranje projektnih opterećenja razmatrane platforme, [6].

2.4.2. Djelovanje vjetra

Sile koje uzrokuje vjetar djeluje na strukturu iznad površine mora, također na svu opremu, dizalice i palubne kućice koje se nalaze na platformi.

Brzina vjetra se može klasificirati kao:

- Udare koji su u trajanju manje od jedne minute
- Konstantni vjetar koji je u trajanju od jedne minute ili duži period

Podaci o brzini vjetra prilagođuju se standardiziranoj nadmorskoj visini od deset metara iznad srednje razine mora, s vremenom usrednjavanja od jednoga sata. Podaci o vjetru se prilagođavaju prema nadmorskoj visini pomoću standardnih profila i faktora udara vjetra. U ovome radu korišten je standardni profil vjetra AP08.

Sljedeće parametre potrebno je uzeti u obzir prilikom određivanja odgovarajućih brzina vjetra.

Za normalne uvjete, [6]:

- Učestalost pojavljivanja trajnih brzina vjetra iz različitih smjerova za svaki mjesec ili godišnje doba.
- Postojanost trajnih brzina vjetra iznad određenih iznosa za svaki mjesec ili godišnje doba.
- Mogućnosti brzina udara sa trajnom brzinom vjetra.

Za ekstremne uvjete:

- Mjesto mjerenja, datum mjerenja, smjer, veličinu izmjerenih udara i trajnu brzinu vjetra.
- Predviđeni broj slučajeva ekstremnih uvjeta za projektni životni vijek konstrukcije.

2.4.3. Djelovanje valova

Valovi koje nastaju zbog normalnih i tangencijalnih sila vjetra najčešći su izvor okolišnih opterećenja na platformu. To su valovi nepravilnog oblika, variraju u visini i duljini i mogu pristupiti platformi iz jednog, ali i više smjerova istovremeno. Zbog takvih uvjeta nije jednostavno odrediti intenzitet i raspodjelu sila valova na platformu. U područjima gdje oceanografski uvjeti nisu dovoljno poznati, razvoj projektnih parametara o valovima mora uključiti sljedeće korake, [6]:

- Prikupljanje svih potrebnih meteoroloških podataka.
- Definiranje površinskih polja vjetra.
- Predviđanje općeg stanja mora korištenjem analitičkog modela na učestalim olujnim mjestima.
- Definicija ekstremnijih stanja mora u skladu s geografskim ograničenjima.
- Ocrtavanje batimetrijskih učinaka na stanja mora.
- Uvođenje probabilističkih tehnika za predviđanje stanja mora na lokaciji platforme u odnosu na različite vremenske baze.
- Definiranje parametara projektnog vala za procjenu strukturnog integriteta platforme.

U područjima gdje su oceanografski uvjeti dobro poznati prethodni niz zahtjeva za nedovoljno poznate uvjete može biti skraćen za poznate značajke.

Za normalne uvjete:

- Za svaki mjesec i godišnje doba vjerojatnost pojave i prosječnu postojanost različitih stanja mora.
- Brzinu vjetra, morsku struju, plimu i oseku koji se pojavljuju simultano s izmjerenim stanjima mora.

Za ekstremne uvjete:

- Mogući raspon i distribucija valnih perioda povezanih s ekstremnim valnim visinama.
- Predviđena distribucija ostalih valnih visina, spektar energije valova koji obuhvaća ekstremnu visinu vala.
- Plime, morske struje i vjetar koji se pojavljuju simultano s izmjerenim ekstremnim stanjem mora.
- Mjesto i datum na kojima su zabilježena ekstremna stanja mora.

2.4.4. Djelovanje morske struje

Morske struje su važan čimbenik pri konstrukciji fiksne rešetkaste platforme.

One utječu na:

- Lokaciju i orijentaciju pristaništa brodova i bokobrana.
- Ukupno okolišno opterećenje koje djeluje na platformu.

Gdje je moguće, pristanište brodova i bokobrane trebalo bi postaviti na mjesto gdje se brod može prihvatiti za platformu dok se morska struja ide u suprotnom smjeru.

Najčešće kategorije morskih struja su:

- Morska struja uzrokovana plimom i osekom.
- Cirkulacijske morske struje.
- Morske struje uzrokovane olujom.

Suma vektora ovih triju morskih struja je ukupna morska struja, a brzina i smjer na određenim morskim dubinama je profil morske struje. Konstrukcija platforme mora biti projektirana za slučajeve kada djeluje morska struja u kombinaciji s ekstremnim stanjima mora, [6].

2.5. Vrste opterećenja i njihovo određivanje

Slijedeća opterećenja te dinamički učinci koji iz njih proizlaze trebaju se uzeti u obzir pri projektiranju rešetkaste konstrukcije.

2.5.1. Opterećenja uzrokovana vlastitom težinom

Opterećenja uzrokovana vlastitom težinom su nepromjenjiva u bilo kojoj vrsti operacije koja se provodi na platformi. U njih se ubrajaju, [6]:

- Težina rešetkaste platforme (bez djelovanja uzgona), uključujući težinu pilota, balasta i taloga.
- Težinu opreme i dodatne pomoćne strukture koje se nalaze na platformi.
- Hidrostatičke sile koje djeluju na strukturu ispod mirne razine vodene površine uključujući vanjski tlak i uzgon

2.5.2. Promjenjiva opterećenja

Promjenjiva opterećenja su ona koja nastaju prilikom obavljanja raznih procesa na platformi, te se mijenjaju zavisno o potrebi rada platforme.

U promjenjiva opterećenja uključujemo, [6]:

- Težinu opreme za bušenje i proizvodnju koja se može dodati ili ukloniti s palube.

- Težinu stambenih prostorija, heliodroma i druge opreme potrebne posadi, opreme za spašavanje, ronilačke opreme i pomoćne opreme koja se može dodati ili ukloniti s platforme.
- Težinu potrošnog materijala i tekućina u spremnicima za skladištenje.
- Sile koje djeluju na konstrukciju uslijed eksploatacije platforme.
- Sile koje djeluju na konstrukciju prilikom uporabe palubnih dizalica.

2.5.3. Okolišna opterećenja

Opterećenja okoliša su opterećenja koja na platformu nameću prirodni fenomeni uključujući vjetar, morske struje, valove, potrese te snijeg, led i pomicanje zemlje. Opterećenja okoliša također uključuje promjene hidrostatskog tlaka i uzgona uzrokovane promjenama razine mora uslijed valova i plime. Opterećenja okoliša treba predvidjeti iz svih mogućih smjerova osim ako postoje mjerenja ili ranije stečena iskustva koja bi rezultirali razumnijim pretpostavkama, [6].

2.5.4. Opterećenja prilikom gradnje

Opterećenja tijekom gradnje rešetkaste platforme rezultat su izrade, zaostalih naprezanja transporta i instalacije, definirana su prema pravilima API-a.

2.5.5. Opterećenja prilikom premještanja konstrukcije

Opterećenja do kojih dolazi tijekom transporta, premještanja platforme na novu lokaciju, instalacije, nadogradnje i uklanjanja konstrukcije moraju se uzeti u obzir kao i prethodno navedena opterećenja prilikom gradnje prema pravilima API-a.

2.5.6. Dinamička opterećenja

Dinamička opterećenja su sva opterećenja nametnuta platformi cikličke prirode ili su rezultat udara na konstrukciju. Valovi, vjetar, rad strojeva i potres su najčešći uzročnici dinamičkih opterećenja. Udar na konstrukciju može biti uzrokovan teglenicom ili brodom u manevrima pristajanja uz platformu.

2.6. Opterećenja zavisna o uvjetima

Okolišna opterećenja je suma svih sila na konstrukciju prema odabranom projektnom slučaju. Ovisno da li se razmatraju operativna svojstva platforme u normalnim vremenskim uvjetima ili sigurnost konstrukcije u ekstremnim vremenskim uvjetima.

Projektna opterećenja uzimaju u obzir okolišna opterećenja u kombinaciji s opterećenjima vlastite težine i promjenjivih opterećenja na slijedeće načine:

- Operativna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najvećih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa normalnim radnim uvjetima platforme.
- Operativna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najmanjih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa normalnim radnim uvjetima platforme
- Projektna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najvećih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa ekstremnim vremenskim uvjetima
- Projektna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najmanjih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa ekstremnim vremenskim uvjetima

Okolišna opterećenja, izuzev potresa, kombiniraju se sa vjerojatnošću njihovog istodobnog pojavljivanja prilikom proučavanja određenog slučaja opterećenja, odnosno moguće da se istodobno pojavljuje vjetar najveće dokumentirane brzine i valovi najveće značajne visine. Opterećenje nastalo potresom trebalo bi se proučavati zasebno bez kombinacije s okolišnim opterećenjima.

Operativni okolišni uvjeti i opterećenja trebali bi predstavljati umjereno opasne uvijete za platformu. Oni ne bi trebali biti nužno ograničavajući faktor za prestanak rada platforme te ako se i prekorače platforma bi trebala nastaviti s radom. Za ovu razinu opterećenja preporuča se povratni period od jedne do pet godina, [6].

2.7. Projektna opterećenja

2.7.1. Valovi

Opterećenja uzrokovana valovima su dinamičke prirode, ali opterećenje se može adekvatno prikazati njihovim statičkim ekvivalentima. To je dopušteno u slučajevima gdje dubina mora nije pretjerano izražena. U slučajevima gdje su velike projektne dubine ili je platforma fleksibilnije prirode, statička analiza možda neće dovoljno dobro zamijeniti dinamičke pojave i sile na struktura. Za takve platforme preporuča se korištenje dinamičke analize. Rešetkaste

konstrukcije se najčešće koriste na malim dubinama te su konstrukcije dovoljno krute da se gotovo u svim slučajevima može koristiti statička analiza, [6].

2.7.1.1. Postupak proračuna opterećenja vala na konstrukciju

Redoslijed koraka u proračunu determinističkih statičkih valnih sila na fiksnoj platformi, [6]:

1. Određuje se prividni valni period, uzimajući u obzir Dopplerov efekt morske struje na val.
2. Kinematika dvodimenzionalnog vala određena je iz odgovarajuće teorije vala za određenu visinu vala, dubinu morske vode i prividni valni period.
3. Horizontalne komponente brzina i ubrzanja čestica vala smanjene su kinematičkim faktorom, koji uzima u obzir širenje valova.
4. Efektivni lokalni profil morske struje određuje se množenjem profila morske struje s faktorom zaklanjanja morske struje uslijed okolne konstrukcije.
5. Efektivni lokalni profil struje kombinira se vektorski s kinematikom vala kako bi se odredile lokalne brzine i ubrzanja fluida za daljnje uvrštavanje u Morisonovu jednadžbu.
6. Dimenzije elemenata su povećane kako bi se uračunao obraštaj.
7. Koeficijenti otpora i inercije određuju se kao funkcije parametara vala i morske struje te geometrije, hrapavosti te dimenzija i orijentacije strukture.
8. Prilikom proračuna sile vala u obzir se uzima i koeficijent zaklanjanja konduktora.
9. Razvija se hidrodinamički modeli za podizače (eng. risere) i priključke.
10. Lokalne sile valova/morskih struja izračunaju se za sve elemente platforme, konduktore i podizače pomoću Morisonove jednadžbe.
11. Globalna sila se izračunava kao vektorski zbroj svih lokalnih sila.

2.7.1.2. *Prividni valni period*

Morska struja koja se kreće u smjeru napredovanja vala produljuje valnu duljinu, dok kretanje morske struje koja djeluje u suprotnom smjeru napredovanja vala skraćuje. Za dobivanje prividnog valnog perioda T_{app} u slučaju proizvoljnih profila morske struje potrebno je iterativno riješiti 3 nelinearne jednadžbe koje su 1989. razvili Kirbi i Chen[7]:

$$\frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{T_{app}} + V_1 \quad (2.1)$$

$$T_{app}^2 = \frac{2\pi\lambda}{g \cdot \tanh 2\pi d/\lambda} \quad (2.2)$$

$$V_1 = \frac{4\pi/\lambda}{\sinh 4\pi d/\lambda} \int_{-d}^0 U_c(z) \cosh \left[\frac{4\pi z + d}{\lambda} \right] dz \quad (2.3)$$

gdje su:

λ – valna duljina

T -valni period

T_{app} – prividni valni period

$U_c(z)$ – komponenta brzine morske struje na dubini z u smjeru napredovanja vala

d – dubina mora

2.7.1.3. *Dvodimenzijaska kinematika vala*

Postoji više raznih valnih teorija kojima se opisuje kinematika ravninskog vala čime se deterministički određuju valna opterećenja njime uzrokovana. Sve valne teorije daju približna rješenja na iste diferencijalne jednadžbe i rubne uvjete. Svaka od tih valnih teorija proračunavaju simetričan val s obzirom na valni brijeg koji propagira i ne mijenja svoj oblik. Razlikuju se po različitim funkcijskim formulacijama do reda kojim zadovoljavaju kinematičke i dinamičke rubne uvjete na površini vala. U mnogim slučajevima Stokesova nelinearna teorija petog reda će dati prihvatljivu točnost. Na slici 2.1 prikazano je područje prihvatljivosti Stokesove nelinearne teorije petoga reda, [6]

Na slici su korišteni slijedeći parametri:

H – valna visina,

H_b – visina lomljenja vala,

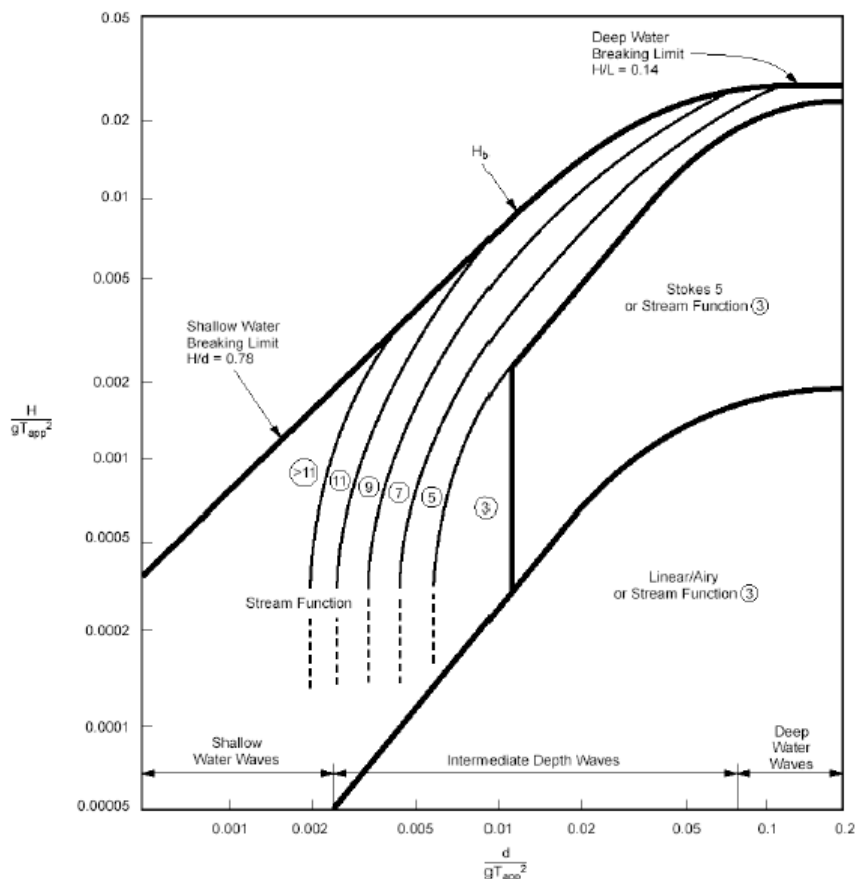
d – dubina vode,

g – gravitacija,

T_{app} – valni period,

$H/g \cdot T_{app}^2$ – bezdimenzionalna valna strmina,

$d/g \cdot T_{app}^2$ – bezdimenzionalna relativna dubina.



Slika 2.1 Područje prihvatljivosti linearne valne teorije, Stream funkcije i Stokes V. reda, [6]

2.7.1.4. Kinematički koeficijent vala

Kinematika vala za pravilne dvodimenzionalne valove za stokesovu nelinearnu teoriju petoga reda, izračunava se s pretpostavkom da svi valovi propagiraju u istom smjeru, dok se realni fluid (morska površina) sastoji od kratkih i strmijih valova. Svaki morski val se može prikazati kao suma harmonijskih valova različitih značajki, tako da morsku površinu možemo zamisliti kao superpoziciju valova. Takvo širenje valova u različitim smjerovima rezultira manjim vršnim silama nego predviđenim idealiziranim slučajem propagiranja valova u istom smjeru. Prilikom računanja metodom projektnog vala uzimamo u obzir smanjenje horizontalnih

komponenti brzine i ubrzanja stokesovog nelinearnog vala petoga reda. Kinematički koeficijent se može odrediti pomoću oceanografskih mjerenja na nekom području, [6]

2.7.1.5. Faktor zaklanjanja morske struje

Brzina morske struje u blizini platforme umanjena je zbog zaklanjanja. Prisutnost strukture platforme ometa prirodni tok morske struje te dio toka ide oko strukture, a ne kroz nju. Zbog toga dolazi do smanjenja brzine morske struje unutar strukture. Budući da se globalna opterećenja određuju zbrajanjem lokalnih opterećenja iz Morisonove jednadžbe, potrebno je koristiti odgovarajuću lokalnu brzinu. U Tablici 4.2 su dani približni iskustveni i empirijski faktori za tipične fiksne rešetkaste platforme u zavisnosti o broju nogu platforme.[6]

Tablica 2.1 Faktor blokiranja morske struje u zavisnosti o broju nogu

broj nogu	pravac	faktor
3	svi	0.90
4	na kraju	0.80
	dijagonalno	0.85
	široka strana	0.80
6	na kraju	0.75
	dijagonalno	0.85
	široka strana	0.80
8	na kraju	0.70
	dijagonalno	0.85
	široka strana	0.80

2.7.1.6. Kombinacija kinematike vala i morske struje

Kinematika vala koja je prilagođena s kinematičkim koeficijentom vala, vektorski se kombinira s profilom morske struje koji je korigiran za faktor blokiranja strujanja morske struje. Profil morske struje zavisna o dubini mora potrebno je prilagoditi elevaciji slobodne površine uzrokovane morskim valom. Profil morske struje potrebno je izdužiti ili sabiti zavisno o položaju morskog vala u datom trenutku. Postoje dvije metode izduživanja morske struje, a to su linearno i nelinearno izduživanje. Nelinearno izduživanje smatra se točnijim za većinu se primjena koristi se linearno izduživanje morskog profila gdje su odnosi definirani jednadžbom 2.1, [6]:

$$(z' + d) = (z + d) \cdot d / (d + \eta) \quad (2.4)$$

Gdje su:

d – dubina mora,

η – elevacija vala,

z – elevacija morske struje,

z' – elevacija trenutnog profila morske struje.

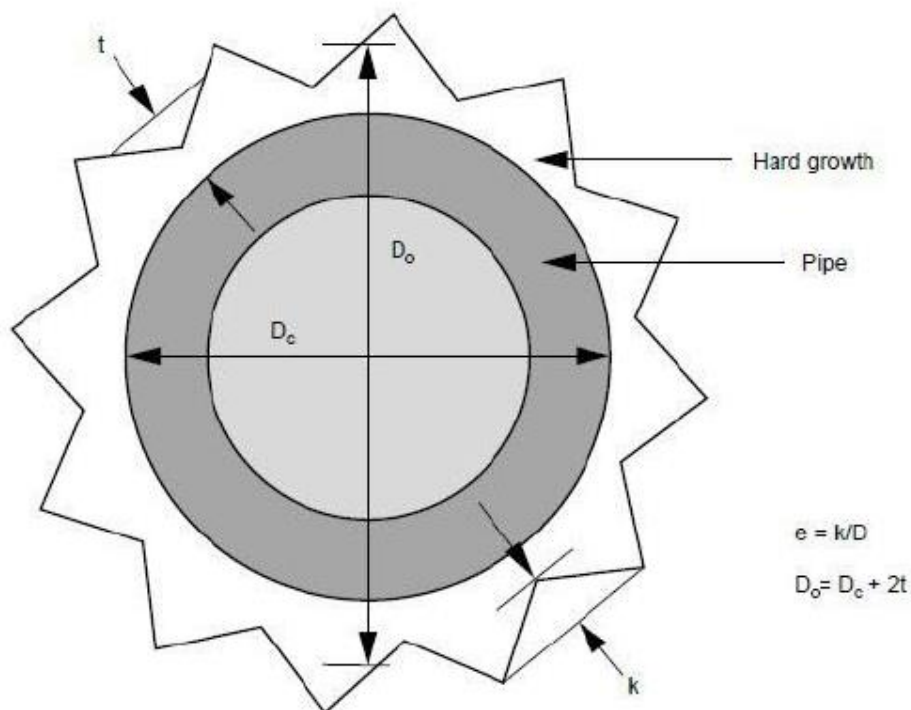
2.7.1.7. *Obraštanje*

Površinu poprečnog presjeka svih strukturnih elemenata, konduktora, podizača i dodataka potrebno je povećati kako bi se uzeo u obzir obraštaj. Također, za elemente s kružnim poprečnim presjekom potrebno je klasificirati kao glatke ili hrapave zavisno o količini obraštaja. Dodatni parametar koji utječe na koeficijent otpora elementa je relativna hrapavost koja se računa prema jednadžbi:

$$e = k/D_o \quad (2.5)$$

Gdje je k visina obraslih organizama, [6].

Slika 8 prikazuje na koji se način definira obrštanje i hrapavost poprečnog presjeka elementa.



Slika 2.2 Definiranje obraštaja

2.7.1.8. Koeficijent otpora i inercije

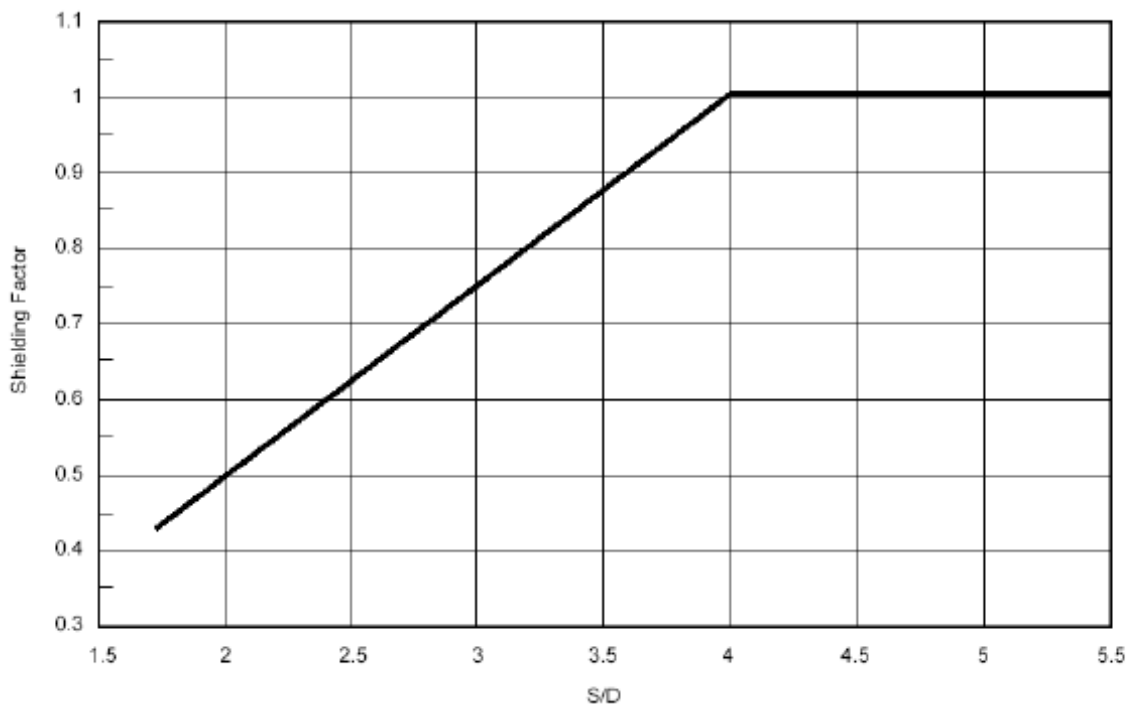
Globalne sile na platformu za uobičajene projektne slučajeve se mogu izračunati prema slijedećim danim koeficijentima otpora i inercije koji su zavisni o hrapavosti površine cilindra:

- Vrijednosti za glatke cilindre: $C_D = 0.65$, $C_M = 1.6$
- Vrijednost za hrapave cilindre: $C_D = 1.05$, $C_M = 1.2$

Ove vrijednosti koeficijenata su prikladne za morske struje koje su ujednačene po čitavom profilu i zanemarivih valova ili za slučaj velikih valova za koje vrijedi $U_{mo} T_{app}/D > 30$ gdje je U_{mo} horizontalna brzina valne čestice na razini morske površine u olujnim uvjetima, izračunata prema kinematici dvodimenzijskih harmonijskih valova, T_{app} je prividni valni period a D je promjer noge platforme na razini morske površine. Za sve ostale slučajeve detaljniji proračuni propisani su pravilima API-a, [6].

2.7.1.9. Faktor utjecaja konduktora

Faktor utjecaja konduktora zavisan je o rasporedu konduktorskih cijevi i njihovom broju. Ako su konduktorske cijevi blisko postavljene, sile na njih mogu biti smanjenje radi hidrodinamičkog otpora strujanju zbog međusobnog zaklanjanja. Iz tog razloga se uvodi faktor smanjenja sile vala, koji se primjenjuje na koeficijente otpora i inercije za konduktorske cijev, a može se odrediti iz slike 2.2, gdje S označava udaljenost središta dviju konduktorskih cijevi u smjeru nailaska valova, a D je promjer konduktora uključujući i obraštanje. Faktor utjecaja na konduktore se može opravdano koristiti u slučaju stacionarnog strujanja ili u slučaju ekstremnih valova, [6].



Slika 2.3 Zavisnost faktora utjecaja konduktora s obzirom na omjer udaljenosti konduktora i njihovog promjera, [6]

2.7.1.10. Hidrodinamičke sile za dodatke

Dodatke na platformu kao što su prihvati za brodove, bokobrani, ljestve, stubište, anode potrebno je razmotriti i provesti kroz hidrodinamički model strukture. Zavisno o broju dodataka, mogu značajno utjecati na globalne valne sile. Za dodatke kao što su pristanište čamaca, sile valova uvelike ovise o smjeru. Dodatne smjernice o modeliranju dodataka dane su u pravilima API-a, [6].

2.7.1.11. Morisonova jednadžba

Za izračunavanje hidrodinamičkih sila koje se pojavljuju na vitka tijela poput dugačkih cilindara, koji se često koriste kao temeljni konstrukcijski elementi struktura objekata morske tehnike koristi se Morisonova jednadžba o kojoj će se detaljnije objasniti u zasebnom poglavlju.[6]

2.7.1.12. Globalne sile na strukturu

Ukupna horizontalna sila i prekretni moment se određuju vektorskim zbrajanjem svih lokalnih inercijskih sila i sila otpora na strukturu uslijed djelovanja valova i morske struje, sila vjetra na strukturu platforme koja se nalazi iznad morske površine te na nastambe i ostalu opremu na palubi platforme. Valni brijeg bi trebao biti postavljen na strukturu na način da ta pozicija rezultira najvećim horizontalnim silama i prekretnim momentom. Prekretni moment i horizontalne sile ne moraju se pojaviti istodobno, tj. na različitim pozicijama valnog brijega može doći do maksimalne horizontalne sile i prekretnog momenta. Također najveća lokalna naprezanja ne moraju se podudarati s pozicijom vala gdje dolazi do najveće globalne sile, [6].

2.7.2. Vjetar

Opterećenja uslijed djelovanja vjetra trebaju se odrediti prema analizi podataka o vjetru u skladu prema navedenim propisima u poglavlju 2.4.2. Kao i kod opterećenja valovima, opterećenja vjetrom su dinamičke prirode, ali neke platforme na opterećenje vjetra imaju uglavnom statički odziv. Za konvencionalne fiksne platforme u relativno plitkoj vodi, vjetrovi doprinose obično s manje od 10% u ukupnom opterećenju. Trajne brzine vjetra treba koristiti za globalno opterećenje platforme, a udare vjetra za projektiranje pojedinačnih konstrukcijskih elemenata. U dubljim vodama, zbog fleksibilnosti strukture, opterećenje vjetrom može biti značajnije. Dinamička analiza je obavezna ako se pokaže da polje vjetrova sadrži energiju na frekvenciji bliskoj prirodnoj frekvenciji konstrukcije platforme.

Brzina i smjer vjetra variraju u vremenu i prostoru. Srednja vrijednost i standardna devijacija brzine uzete u trajanju od jednog sata ne variraju horizontalno, ali se mijenjaju s visinom. Unutar dugih trajanja puhanja vjetra, postoje kratkotrajni udari tj. naleti vjetra. Stoga je vrijednost brzine vjetra smisljena samo ako je određena svojom visinom i trajanjem. Profili vjetra koji se stvaraju za vrijeme oluje i dalje su predmet istraživanja.

Sila na objekt uzrokovana vjetrom određuje se prema izrazu

$$F_w = \frac{\rho_z}{2} * u_w^2 C_S A_p \quad (2.6)$$

gdje su:

ρ_z – gustoća zraka,

u – brzina vjetra,

C_S – koeficijent oblika

A_p – izložena projicirana površina objekta.

Ako nemamo dostupne podatke za koeficijent oblika, preporuča se korištenje koeficijenata oblika za okomiti smjer nailaska vjetra danih u tablici 2.2, [6]:

Tablica 2.2 Preporučeni koeficijenti za okomiti smjer nailaska vjetra, [6]

Nosači	1.5
Stranice nastambi	1.5
Cilindrični presjeci	0.5
Ukupna projicirana površina platforme	1

2.7.3. Morska struja

Kako je i opisano u poglavlju 2.4.4. morska struja je vektorski zbroj strujanja plime, cirkulacije mora i morskih struja generiranih olujom. Važnost morskih struja i njihovih opterećenja na konstrukciju variraju s lokacijom na moru. Morske struje uzrokovane plimom i osekom su u dubljim morima u većini slučajeva slabe i često zanemarive. Općenito su snažnije u plitkim i širokim morima, ali ne rijetko prelaze brzinu od 0.3 m/s. Cirkulacijske morske struje imaju veću brzinu te su relativno postojanije. Primjer takve morske struje je Gofska struja na Atlantskom oceanu, gdje se na površini pojavljuje brzina strujanja od 1 do 2 m/s. Iako su relativno stabilne, cirkulacijske morske struje mogu vijugati ili se odvojiti od glavne cirkulacijske morske struje. Struje generirane olujom su uzrokovane puhanjem vjetra i gradijentom atmosferskog tlaka tijekom oluje. Brzine olujnih morskih struja su vrlo kompleksne funkcije s parametrima kao što su jačina oluje, meteoroloških karakteristika, konfiguracija obale (ako postoji) i gustoća mora. Brzina morske struje generirane olujom može se grubo procijeniti kao 2-3% brzine vjetra u trajanju od jednoga sata, a što je oluja bliže plicoj vodi brzina struje se može značajno povećati. Profil morske struje i smjer određuju kvalificirani oceanografi, [6].

3. STOKESOV VAL

U dinamici fluida Stokesov val je nelinearan i periodičan površinski val u neviskoznom fluidu. Stokesova valna teorija je od izravne praktične koristi te se koristi u projektiranju odobalnih objekata i pučanskih objekata kako bi se odredila kinematika valova. Kinematika vala je potrebna kako bi se odredila valna opterećenja na konstrukciju. Stokesova teorija je proširenje linearnog valnog proračuna, koji pretpostavlja da su amplitude valova male i da se valovi opisuju linearnim jednadžbama. Stokesova teorija petog reda uzima u obzir izraze višeg reda nelinearnosti kako bi pružila precizniji opis valnih fenomena

3.1. Stokesova nelinearna valna teorija petog reda

Stokesov nelinearni val petog reda dan je jednadžbom 3.1 potencijala brzine,[8]

$$\phi = \frac{\lambda^2}{2\pi T} \sum_{n=1}^5 \phi'_n \cosh \left[2\pi n \left(\frac{z+d}{\lambda} \right) \right] \sin \left[2\pi n \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \right] \quad (3.1)$$

gdje je T:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{gX \tanh \left(2\pi \frac{d}{\lambda} \right) [1 + \lambda_k^2 C_1 + \lambda_k^2 C_2]}} \quad (3.2)$$

Konstante ϕ'_n , λ_k , C_1 , C_2 su poznate funkcije od H , L i d .

4. MORISONOVA JEDNADŽBA

U hidrodinamici vitkih tijela, poput dugih cilindara kružnog poprečnog presjeka, koji se najčešće koriste kao strukturni elementi naftnih platformi, za izračunavanje hidrodinamičke sile na elemente koristi se Morisonova jednadžba. Jednadžba se sastoji od dva člana, a to su inercijske sile i sile otpora.

4.1. Definicije i pretpostavke

Jedan od temeljnih uvjeta za korištenje Morisonove jednadžbe je da promjer vitkog cilindra D mora biti višestruko manji od duljine vala λ . Minimalni omjer promjera cilindra i duljine vala D/λ mora biti manji od $1/5$. Izrazi se odnose na jediničnu duljinu cilindra, iz čega slijedi da će dobivena sila predstavljati silu po duljini te će se za dobivanje ukupne sile provesti integracija po duljini cilindra. Zbog nepostojanja prostornih promjena u strujanju okolnog fluida u blizini cilindra, moguće je opisivanje strujanja cijelog područja opisivanjem samo jednog infinitezimalnog djela koja je uzeta u osi cilindra. Strujanje oko diferencijalnog segmenta cilindra promatrati će se ravninski. Ovom jednadžbom određuju se komponente sile u smjeru okomito na os cilindra. Desni koordinatni sustav koji je korišten ima ishodište na razini mirne vodene površine i pozitivan smjer osi z je usmjeren prema gore, a os x usmjerena je prema smjeru napredovanja vala. Strujanje oko cilindra odgovara potencijalnom strujanju.

4.2. Sile inercije

Morison po kome je jednadžba dobila ime, je u jednadžbi umjesto prisutnosti cilindra na njegovom mjestu zamislio „rupu“ u polju tlakova strujanja, ali pri tome je zanemario činjenicu da je stjenka cilindra nepropusna te je promatrao strujanje nepromijenjeno kao da cilindra nema. Sila koja djeluje na stjenku diferencijalnog presjeka cilindra dC u smjeru napredovanja vala tj. u smjeru jediničnog vektora i zbog djelovanja polja hidrodinamičkog tlaka p_d , može se jednostavno dobiti integriranjem tlaka po obodu cilindra C

$$dF_{x0} = - \int_0^{2\pi} p_d n i dC dz = - \int_0^{2\pi} p_d \cos\theta r d\theta dz \quad (4.1)$$

Kako je fizikalno nemoguće da fluid prolazi kroz stjenke cilindra, na obodu presjeka cilindra mora se uspostaviti polje dodatnog tlaka čija sila djeluje na razmicanje fluida oko stjenka cilindra, pri čemu se mijenja polje brzine koje djeluje sad u suprotnom smjeru od normalne

komponente neporemećene brzine. Problem se može razmotriti na način kao da cilindar slobodno giba ubrzanjem jednakog ubrzanju fluida ali suprotnog smjera $-a_{x0}(0,0,z;t)$. U tom slučaju ne postoji prolaz tekućine kroz stjenku cilindra. Sila koja djeluje na uronjeno tijelo prisiljavajući ga na gibanje s ubrzanjem $-a_{x0}(0,0,z;t)$ jednaka je:

$$dF_{x0} = -a_{x0}(0,0,z;t) \cdot dm \quad (4.2)$$

U navedenoj jednadžbi dm je dodatna masa ekvivalentna masi volumena tekućine. Kako se diferencijalni presjek u stvarnosti ne giba, Morison je zaključio da sila u gornjoj jednadžbi predstavlja reakciju nepomičnog presjeka na dodatni tlak, stoga je prema tome ukupna diferencijalna sila dF_{x0} na obodu presjeka jednaka:

Gdje je C_M teoretska vrijednost koeficijenta inercijske sile u potencijalno strujanju

$$dF_{x0} = a_{x0}(0,0,z;t) \cdot dm - (-a_{x0}(0,0,z;t) \cdot dm) = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} dz \cdot a_{x0}(z;t) \quad (4.3)$$

4.3. Sile otpora

Strujanje oko presjeka cilindra u valu je složenije nego što je Morison pretpostavio u svojoj jednadžbi. Prema Morisonovoj pretpostavci idealnog fluida i bezvrtložnog strujanja sila otpora ima isti smjer kao i gibanje fluida, stoga otpor je proporcionalan kvadratu brzine strujanja fluida v_{x0} . Zbog zadržavanja prikladnog predznaka brzina se zapisuje kao $v_{x0} |v_{x0}|$.

Dobivena jednadžba za silu otpora glasi:

$$dF_{xd} = \frac{1}{2} \rho C_D D dz v_{x0}(z,t) \cdot |v_{x0}(z,t)| \quad (4.4)$$

gdje je C_D pripadni koeficijent otpora, a v_{x0} brzina strujanja u smjeru osi x.

Morisonova jednadžba se temelji na superpoziciji inercijske sile u fazi sa ubrzanjem fluida i sile otpora u fazi sa brzinom fluida:

$$F(t) = F_{inercije}(t) + F_{otpora}(t) \quad (4.5)$$

Iz čega za opći slučaj ukupne sile možemo zapisati kao:

$$F_n(r;t) = \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M \cdot a_n(r;t) + \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot v_n(r;t) \cdot |v_n(r;t)| \quad (4.6)$$

gdje su:

ρ - gustoća vode,

D - promjer elementa na poziciji proračuna sile,

C_M - koeficijent inercije,

C_D - koeficijent otpora,

V_n - komponenta vektora brzine strujanja u smjeru okomitom (normalnom) na os elementa strukture (uključujući brzinu i valova i morske struje),

a_n - komponenta vektora ubrzanja strujanja u smjeru okomitom (normalnom) na os elementa strukture,

r - vektor položaja u globalnim koordinatama pozicije izračunavanja sile,

t - vrijeme.

4.4. Koeficijenti otpora i inercije

Općenito, vrijednost koeficijenata se može izraziti kao

$$C_D = f_1 \left(\frac{2\pi t}{T}, \frac{V_{x \max} T}{D}, \frac{V_{x \max} D}{\vartheta}, \frac{\varepsilon_1}{D} \right) \quad (4.7)$$

$$C_M = f_2 \left(\frac{2\pi t}{T}, \frac{V_{x \max} T}{D}, \frac{V_{x \max} D}{\vartheta}, \frac{\varepsilon_1}{D} \right) \quad (4.8)$$

gdje su:

Re - Reynoldsov broj - $\frac{V_{x \max} D}{\vartheta}, \frac{V_{z \max} D}{\vartheta}$

$V_{x, \max}$ - maksimum horizontalne komponente brzine vodene čestice,

$V_{z, \max}$ - maksimum vertikalne komponente brzine vodene čestice,

D - promjer stupa,

ν - kinematički koeficijent viskoznosti tekućine,

KC - Keulegan-Carpenterov broj,

T - valni period.

Napisana parametarska zavisnost koeficijenata C_D i C_I u Morisonovoj jednadžbi prihvatljiva je za jednostavno harmonijsko strujanje. Za kompleksnije slučajeve strujanja fluida potrebno je u razmatranje uvesti i druge parametre

Vrijednost koeficijenata C_D i C_M u Morisonovoj jednadžbi se određuju i eksperimentalnim putem bilo u laboratorijskim uvjetima ili u prirodi. Vrijednosti koeficijenata otpora za vertikalni cilindar zavisna je o Reynoldsovom broju i varira između područja podkritičnog Reynoldsovog broja s laminarnim graničnim slojem, područja prijelaznog Reynoldsovog broja s laminarnim graničnim slojem i područja nadkritičnog Reynoldsovog broja s turbulentnim graničnim slojem

od $C_D \approx 1,2$ do $C_D \approx 0,7$. U prevladavajućim realnim uvjetima (glatki pilot i turbulentni uvjeti strujanja) vrijedi $C_D = 0,7$. Za slučaj nadkričnog Reynoldsovog broja kod hrapavih cilindara (cilindar s obraštajem), koeficijenti otpora narastu na $C_D = 0,78$ do $0,9$

Teoretsku vrijednost koeficijenta inercije za vertikalni cilindar $C_M = 2$ izvedena je na bazi teorije potencijalnog strujanja koja se najčešće i koristi, a preporučene eksperimentalne vrijednosti su, [9]:

$C_I = 2$	za	$Re < 2,5 \cdot 10^5$
$C_I = 2,5 - Re/5 \cdot 10^5$	za	$2,5 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$
$C_I = 1,5$	za	$Re > 5 \cdot 10^5$

5. PROJEKTIRANJE STRUKTURE

Dosadašnje iskustvo u industriji je pokazalo da postojeće, konvencionalne rešetkaste platforme pokazuju dobru pouzdanost i za projektna opterećenja i opću upotrebu. Kod tih struktura, projektna opterećenja su općenito jednaka sa svih strana, to je rezultiralo simetričnim platformama. S poboljšanim podacima okolišnijih uvjeta na nekim operativnim područjima moguće je da iskoristi orijentaciju platforme za povećanje stabilnosti konstrukcije pri olujnim uvjetima. Međutim, primjena predviđenih smjernih opterećenja izazvanih okolišnim uvjetima može rezultirati strukturom koja je projektirana za manje sile u jednom smjeru u odnosu na druge. Kako bi se osigurala minimalna prihvatljiva čvrstoća platforme u svim smjerovima, prema API pravila, za simetrične, pravokutne i kvadratne platforme potrebno je najmanje 8 smjerova, a za platforme s tri noge potrebno je minimalno 12 smjerova.

5.1. Dozvoljena naprezanja za cilindrične elemente

5.1.1. Aksijalno vlačno naprezanje

Dozvoljeno vlačno naprezanje za cilindrične elemente određuje se pomoću jednadžbe 5.1, [6]

$$F_t = 0.6 \cdot F_y \quad (5.1)$$

gdje je:

F_y – granica razvlačenja.

F_t – dozvoljeno vlačno naprezanje

5.1.2. Aksijalno tlačno naprezanje

5.1.2.1. Globalno izvijanje

Dopušteno aksijalno tlačno naprezanje, F_a , za elemente kojima je omjer D/t manji od 60 određuje se prema slijedećim formulama, [6]:

Za $Kl/r < C_c$

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{Kl/r^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3Kl/r}{8C_c} - \frac{Kl/r^3}{8C_c^3}} \quad (5.2)$$

Odnosno za $Kl/r > C_c$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23Kl/r_t^2} \quad (5.3)$$

gdje su:

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{0,5}$$

E – Youngov modul elastičnosti,

K – Faktor efektivne duljine,

l – Duljina elementa,

t – debljina stjenke

r_t – radijus tromosti,

F_y – granica razvlačenja,

Za članove kojima je omjer D/t veći od 60, potrebno je zamijeniti granicu razvlačenja F_y s kritičnim lokalnim izvijanjem F_{xe} ili f_{xc} , ovisi koji je manji (poglavlje 5.1.2.2.), pri određivanju C_c i F_a .

5.1.2.2. Lokalno izvijanje

Neukružene cilindrične elemente treba ispitati na lokalno izvijanje. Zbog aksijalne tlačne sile kada je omjer D/t veći od 60 i manji od 300 s debljinom stjenke $t > 6$ mm potrebno je ispitati na elastično (F_{xe}) i neelastično (F_{xc}) lokalno izvijanje, [6].

Elastično lokalno izvijanje određuje se po izrazu:

$$F_{xe} = 2C_e E \frac{t}{D} \quad (5.4)$$

gdje su:

C_e – koeficijent kritičkog elastičnog izvijanja,

D – vanjski promjer,

t – debljina stjenke.

Teoretska vrijednost koeficijenta C_e je 0.6, Ali preporuke za ovu jednadžbu su da se za koeficijent kritičkog elastičnog izvijanja uzme 0.3.

Neelastično lokalno izvijanje određuje se po izrazima:

$$F_{xc} = F_y \left[1.64 - 0.23 \frac{D^{\frac{1}{4}}}{t} \right] < F_{xe} \quad (5.5)$$

$$F_{xc} = F_y \text{ za } \frac{D}{t} < 60 \quad (5.6)$$

5.1.3. Savijanje

Dopušteno naprezanje savijanja F_b računamo prema formulama, [6]:

$$F_b \text{ za } \frac{D}{t} \leq \frac{10,340}{F_y}$$

$$F_b = 0.75 F_y \quad (5.7)$$

$$F_b \text{ za } \frac{10,340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20,680}{F_y}$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad (5.8)$$

$$F_b \text{ za } \frac{20,680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad (5.9)$$

5.1.4. Smično naprezanje

Najveće smično naprezanje cilindričnog momenta je dano izrazom, [6]

$$f_v = \frac{V}{0.5A} \quad (5.10)$$

gdje su:

f_v – najveće smično naprezanje [kN/m²],

V – smična sila [kN],

A – poprečni presjek [m²]

Dopušteno smično naprezanje definirano je kao:

$$F_v = 0.4F_y \quad (5.11)$$

5.1.5. Torzijsko naprezanje

Najveća torzijska naprezanja cilindričnog elementa određuje se kao:

$$f_t = \frac{M_t \cdot D/2}{I_p} \quad (5.12)$$

gdje su:

f_t – najveće torzijsko naprezanje,

M_t – moment torzije,

I_p – polarni moment tromosti.

Dopušteno naprezanje se određuje po formuli

$$f_{td} = 0,4 \cdot F_y \quad (5.13)$$

5.1.6. Kombinirano naprezanje za cilindrične elemente

Cilindrični elementi podvrgnuti kombiniranim aksijalnim tlačnim opterećenjem i savijanjem moraju zadovoljiti slijedeće zahtjeve za čitavu duljinu elementa.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e'}\right) F_b} \leq 1.0 \quad (5.14)$$

$$\frac{f_a}{0.6 \cdot F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (5.15)$$

Kada je $f_a/F_a \leq 0.15$ slijedeća formula se može koristiti umjesto prethodne dvije jednadžbe

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (5.16)$$

Jednadžba 5.14 pretpostavlja uzete vrijednosti C_m i F_e' jednake za f_{bx} i f_{by} . Ako su različiti onda trebamo koristiti slijedeću jednadžbu

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{\left[\frac{C_{mx} \cdot f_{bx}}{1 - \frac{f_a}{F_e}} \right]^2 + \left[\frac{C_{my} \cdot f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_e}} \right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (5.17)$$

gdje su:

f_a – aksijalno tlačno ili vlačno naprezanje,

F_a – dopušteno aksijalno tlačno naprezanje,

f_{bx} – tlačno naprezanje na savijanje u točki razmatranja u ravnini,

f_{by} – tlačno naprezanje na savijanje u točki razmatranja van ravnini,

F_b – dopušteno naprezanje uslijed savijanja,

F_e' – Eulerovo naprezanje podijeljeno s faktorom sigurnosti prema AISC 335-89, [10],

C_m – redukcijski faktor prema AISC 335-89, [10],,

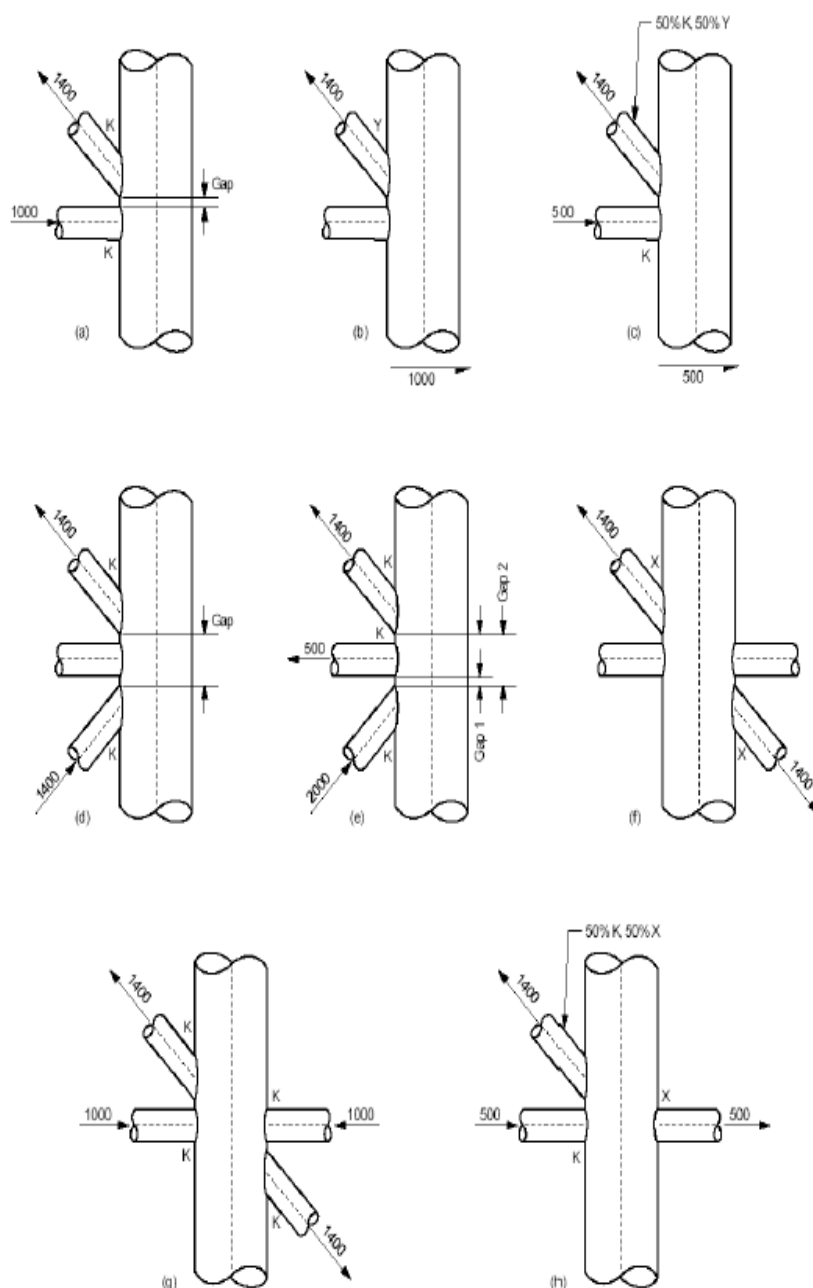
5.2. Provjera spojeva

Za provjeru spojeva formiranih pomoću dva ili više cjevastih elemenata mogu se koristiti razne metode kao što su numeričke metode, prikupljeni test podaci, analitičke metode pod uvjetom da se čvrstoća pomoću tih metoda može pouzdano procijeniti. Kroz ovo poglavlje će se obraditi API standardi za provjeru spojeva.

5.2.1. Klasifikacija spojeva

Klasifikacija spojeva je postupak pri kojem se aksijalno opterećenje u određenom poprečnom vezniku dalje dijeli na K, X i Y komponente opterećenja koje odgovaraju trima tipovima spojeva za koje postoje jednadžbe nosivosti. Takva podjela uobičajeno razmatra sve članove u jednoj ravnini na spoju. Svaki poprečni veznik u ravnini može imati jedinstvenu klasifikaciju koja može varirati ovisno o stanju opterećenja. Klasifikacija može biti kombinacija između tri spoja koja smo ranije u tekstu naveli. Slika 5.1 nam prikazuje neke jednostavne primjere klasifikacije spojeva. Da bi se poprečni veznik smatrao klasifikacijom K-spoja, aksijalno opterećenje u poprečnom vezniku treba biti uravnoteženo unutar 10% opterećenja u drugim poprečnim veznicima u istoj ravnini i istoj strani zgloba. Za klasifikaciju Y-spoja aksijalno opterećenje u poprečnom vezniku djeluje kao smicanje grede u nosivom elementu. Za

klasifikaciju X spoja, aksijalno opterećenje u poprečnom vezniku prenosi se kroz nosivi element na suprotnu stranu. Veoma je važno naglasiti da određivanje spojeva ovisi i o silama u poprečnim elementima te nije dozvoljeno zamjena opterećenja kombinacijom vlačnog i tlačnog opterećenja kako bi se dobila jednaka rezultanta sila. Posebnu pozornost treba posvetiti uspostavljanju odgovarajućeg razmaka ako je dio opterećenja povezan s K spojem. Najočitiiji slučaju na slici 5.1 je pod a), u kojemu je točno potreban biti razmak između elemenata kako bi mogli odrediti vrstu spoja. U slučaju d) kada postoji poprečni element u sredini, promatra se razmak između vanjskih poprečnih elemenata, [6].



Slika 5.1 Primjer klasifikacije spojeva s obzirom na karakteristike spoja

5.2.2. Jednostavni spojevi

Terminologija za jednostavne spojeve je definirana u slici 5.2. je:

Brace – poprečni veznik,

Chord- nosivi element,

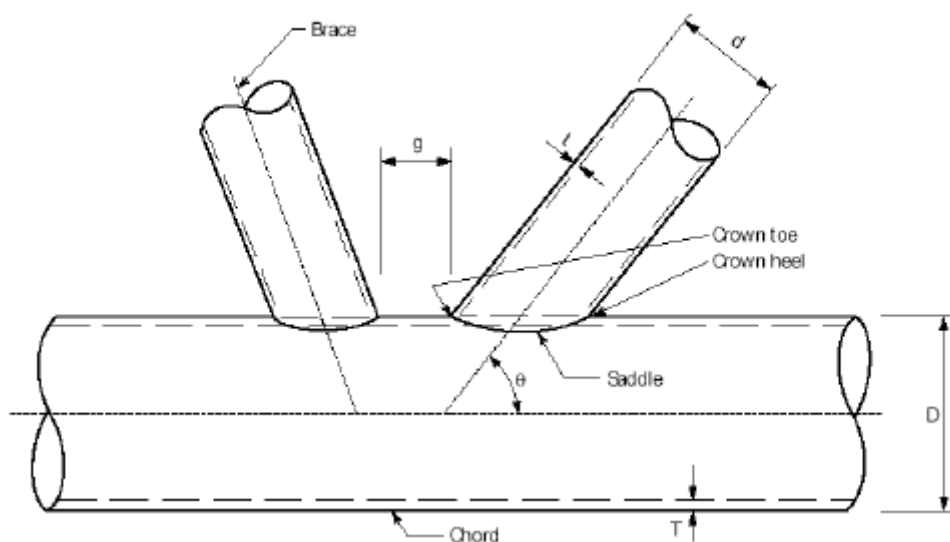
g - razmak između poprečnih veznika,

T – debljina nosivog elementa,

t – debljina poprečnog veznika,

d – vanjski promjer poprečnog veznika,

D – vanjski promjer nosivog elementa.



Slika 5.2 Terminologija spojeva

Tablica 5.1 prikazuje raspon valjanosti za primjenu u praksi

Tablica 5.1 Geometrijski parametri spoja

Donja granica		Parametar	Gornja granica	
0.2	\leq	β	\leq	1
10	\leq	γ	\leq	50
30	\leq	θ	\leq	90
/	/	F_y	\leq	500
/	/	g/D	$>$	0.6 (za K spoj)

gdje su:

$$\beta = \frac{d}{D},$$

$$\gamma = \frac{D}{2T},$$

$$\theta = \frac{t}{T}.$$

5.2.3. Osnovni kapacitet spoja

Za cjevaste spojeve u kojima ne dolazi do preklapanja poprečnih veznika s pločom za pojačanje, fugama ili ojačanjima koristimo slijedeće formule.

$$P_a = Q_u Q_f \frac{F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} \quad (5.18)$$

$$M_a = Q_u Q_f \frac{F_{yc} T^2 d}{FS \sin \theta} \quad (5.19)$$

gdje su:

P_a – dozvoljeni kapacitet za poprečni veznik u aksijalnom opterećenju,

M_a – dozvoljeni kapacitet za poprečni veznik za savojni moment,

F_{yc} – granica popuštanja za nosivi element na spoju,

FS – faktor sigurnosti, 1,60,

Q_u - faktor čvrstoće,

Q_f – faktor prisutnosti opterećenja u nosivom elementu

Za aksijalno opterećene poprečne veznike s klasifikacijom spoja koja je mješavina između K, Y i X spoja, P_a se računa s postotkom mješavine pojedine vrste zgloba te se zbraja kako bi se dobio ukupni kapacitet na spoju.

5.2.4. Faktor čvrstoće Q_f i faktor opterećenja nosivog elementa Q_u

5.2.4.1. Faktor čvrstoće O_u

Q_u varira ovisno o tipu spoja i njegov izračun su dane formule zavisne o tipu spoja

Tablica 5.2 Izračunavanje vrijednosti O_u za aksijalne slučajeve

klasifikacija spoja	opterećenje poprečnog veznika	
	aksijalno razvlačenje	aksijalno tlačjenje
K	$(16 + 1.2\gamma)\beta^{1.2}Q_g, ali \leq 40\beta^{1.2}Q_g$	
T/Y	30β	$2.8 + (20 + 0.8\gamma)\beta^{1.6}$ $ali \leq 2.8 + 36\beta^{1.6}$
X	23β za $\beta \leq 0.9$ $20.7 + (\beta - 0.9)(17\gamma - 220)$ za $\beta \geq 0.9$	$[2.8 + (12 + 0.1\gamma)\beta]Q_\beta$

Za sva tri tipa spoja X,Y,K vrijedi ista jednadžba za savijanje u ravnini poprečnog veznika i van ravnine poprečnog veznika, a glase ovako:

Opterećenje poprečnog veznika koje izaziva savijanje u njegovoj ravnini

$$Q_u = (5 + 0.7\gamma)\beta^{1.2} \quad (5.20)$$

Opterećenje poprečnog veznika koje izaziva savijanje izvan njegove ravnine

$$Q_u = 2.5 + (4.5 + 0.2\gamma)\beta^{2.6} \quad (5.21)$$

gdje su:

Q_β geometrijski faktor definiran s

$$Q_\beta = \frac{0.3}{\beta(1 - 0.833\beta)} \text{ za } \beta > 0.6$$

$$Q_\beta = 1 \text{ za } \beta \leq 0.6 \quad (5.22)$$

Q_g je faktor razmaka definiran s:

$$Q_g = 1 + 0.2[1 - 2.8 g/D]^3 \text{ za } g/D \geq 0.05$$

$$Q_g = 0.13 + 0.65 \cdot \Phi \cdot \gamma^{0.5} \text{ za } \frac{g}{D} \leq -0.05 \quad (5.23)$$

gdje je:

$$\Phi = t \cdot F_{yb} / (TF_{yc})$$

Poželjno je da ne dolazi do preklapanja elemenata te da razmak ne bude manji od $0,25\beta D$. Ako je to neizbježno može se i koristiti linearna interpolacija vrijednosti gornja dva Q_g za $-0.05 < g/D < 0.05$.

5.2.4.2. Faktor opterećenja nosivog elementa O_f

O_f je faktor koji prikazuje prisutnost nazivnih opterećenja u nosivom elementu

$$Q_f = \left[1 + C_1 \left(\frac{FSP_C}{P_y} \right) - C_2 \left(\frac{FSM_C}{M_p} \right) - C_3 A^2 \right] \quad (5.24)$$

gdje je parametar A definirani kao

$$A = \left[\left(\frac{FS P_c}{P_y} \right) + \left(\frac{FS M_c}{M_p} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5.25)$$

gdje su:

FS – faktor sigurnost = 1.60,

P_C – rezultanta nazivnog aksijalnog opterećenja

M_C – Rezultanta nazivnog momenta savijanja u nosivom elementu

P_y – granica popuštanja nosivog elementa prilikom aksijalnog opterećenja

M_p – Moment plastične deformacije nosivog elementa

C_1 , C_2 i C_3 - Koeficijenti dani u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Koeficijenti C_1, C_2, C_3 zavisni o opterećenju

Tip spoja	C_1	C_2	C_3
K spoj pod aksijalnim opterećenjem	0.2	0.2	0.3
Y spoj pod aksijalnim opterećenjem	0.3	0	0.8
X spoj pod aksijalnim opterećenjem			
$\beta \leq 0.90$	0.2	0	0.5
$\beta = 1$	-0.2	0	0.2
Svi spojevi koji se nalaze pod momentnim opterećenjem poprečnog veznika	0.2	0	0.4

Prosjek opterećenja nosivog elementa i savojnih momenata s obje strane poprečnog veznika bi trebao biti korišten u gornjim jednadžbama. Pozitivan predznak je u slučaju tlačnog opterećenja nosivog elementa i kada savojni moment radi tlačno opterećenje na strani nosača na kojoj se nalazi spoj.

5.2.5. Provjera čvrstoće

Za aksijalno opterećenje i momente savijanje u poprečnom vezniku trebalo bi određeno po idućoj formuli

$$IR = \left| \frac{P}{P_a} \right| + \left(\frac{M}{M_a} \right)_{ipb}^2 + \left| \frac{M}{M_a} \right|_{opb} \leq 1.0 \quad (5.26)$$

Omjer koji proračunava navedena formula mora biti manja od 1.

5.2.6. Oštećeni spojevi

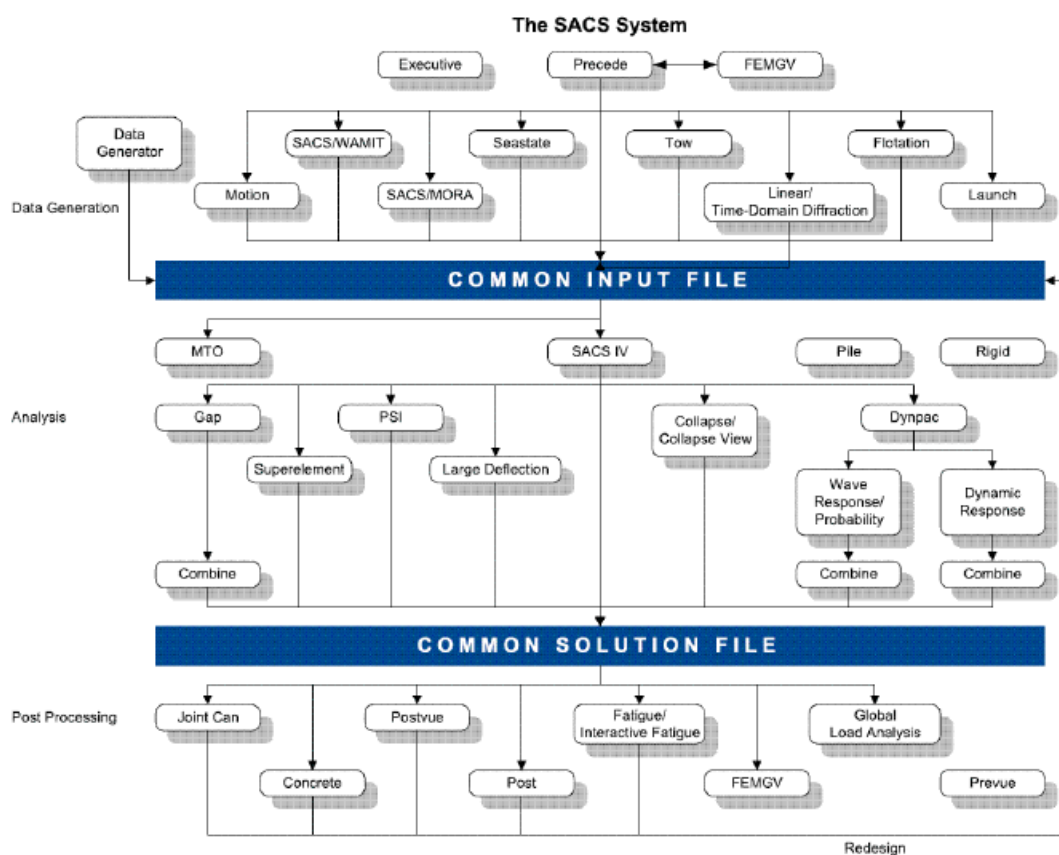
Spojevi u postojećim instalacijama mogu se oštetiti kao rezultat zamora korozije ili preopterećenja. U takvim slučajevima, smanjeni kapacitet zgloba se može procijeniti jednostavnim modelima, numeričkim modelima ili eksperimentalnim dokazima.

6. MODELIRANJE FIKSNE REŠETKASTE PLATFORME

6.1. SACS

Structural Analysis Computer System (SACS) je softverski sustav razvijen za odobalne strukture i za opće civilne objekte inženjerske primjene. SACS je sastavljen od nekoliko modularnih programa za strukturnu analizu koji su međusobno povezani. Svi programi uključuju komplet standardnih inženjerskih postavki u metričkom i imperijalnom sustavu jedinica kako bi se olakšao unos podataka.

Odnosi između programa koji čine sustav SACS prikazani su u shematskom prikazu na slici 6.1. Svi strukturni podaci kao što su geometrija, dimenzije elemenata, svojstva materijala i okolišni uvjeti generirani su u programima za postavljanje ulaznih podataka. Programi koji obrađuju ulazne podatke i izrađuju izlaznu datoteku koja sadrži pomake u spojevima i unutarnje sile u elementima. Programi za naknadnu obradu podataka služe za ispravljanje i redizajniranje strukture u slučaju da struktura ne prolazi određene zadane uvjete.



Slika 6.1 Odnosi između SACS modula

6.2. Precede

U modulu SACS sistema Precede izrađena je geometrija ovog projekta, te su generirana opterećenja na modeliranu konstrukciju. Precede je interaktivni grafički modeler koji ima slijedeće mogućnosti:

- Mogućnost generiranja modela uključujući geometriju, odabir materijala, presjek elemenata, svojstva materijala i postavljanje opterećenja.
- Automatsko otkrivanje greški pri unosu.
- Modeliranje greda ili konačnih elemenata uključujući ploče i ljuske.
- Automatsko generiranje osnovnih elemenata i paluba.
- Automatsko generiranje kartezijske, cilindrične ili sferne mreže.
- Automatsko generiranje opterećenja poput izazvanih gravitacijom, tlakom i opremom.
- Mogućnost ispisa izvješća i nacрта.
- Modeliranje okolišnih uvjeta .

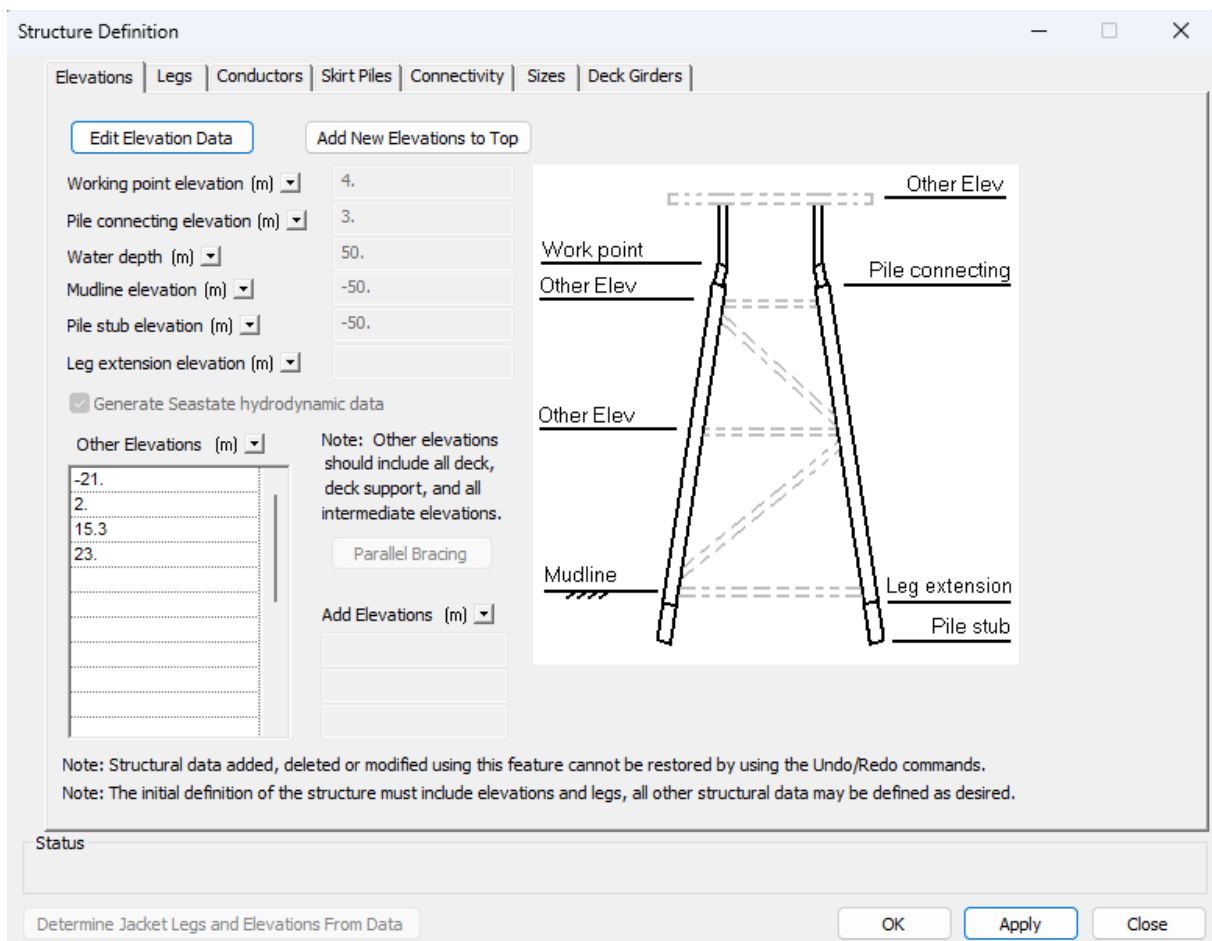
Uz ove sve navedene mogućnosti SACS i modula Precede izrađen je projekt za ovaj diplomski rad uz pomoć uputa koje su dane uz programski paket SACS.

6.3. Modeliranje geometrije

Modeliranje geometrije započeto je unosom osnovnih podataka o fiksnoj platformi uz pomoć dijela softvera koji se naziva Structure Definion. Structure Definition omogućava definiciju nove fiksne platforme od samog početka kreiranjem nogu fiksne platforme, pilota i konduktora.

Prvo se unose podaci o visinama, a to su:

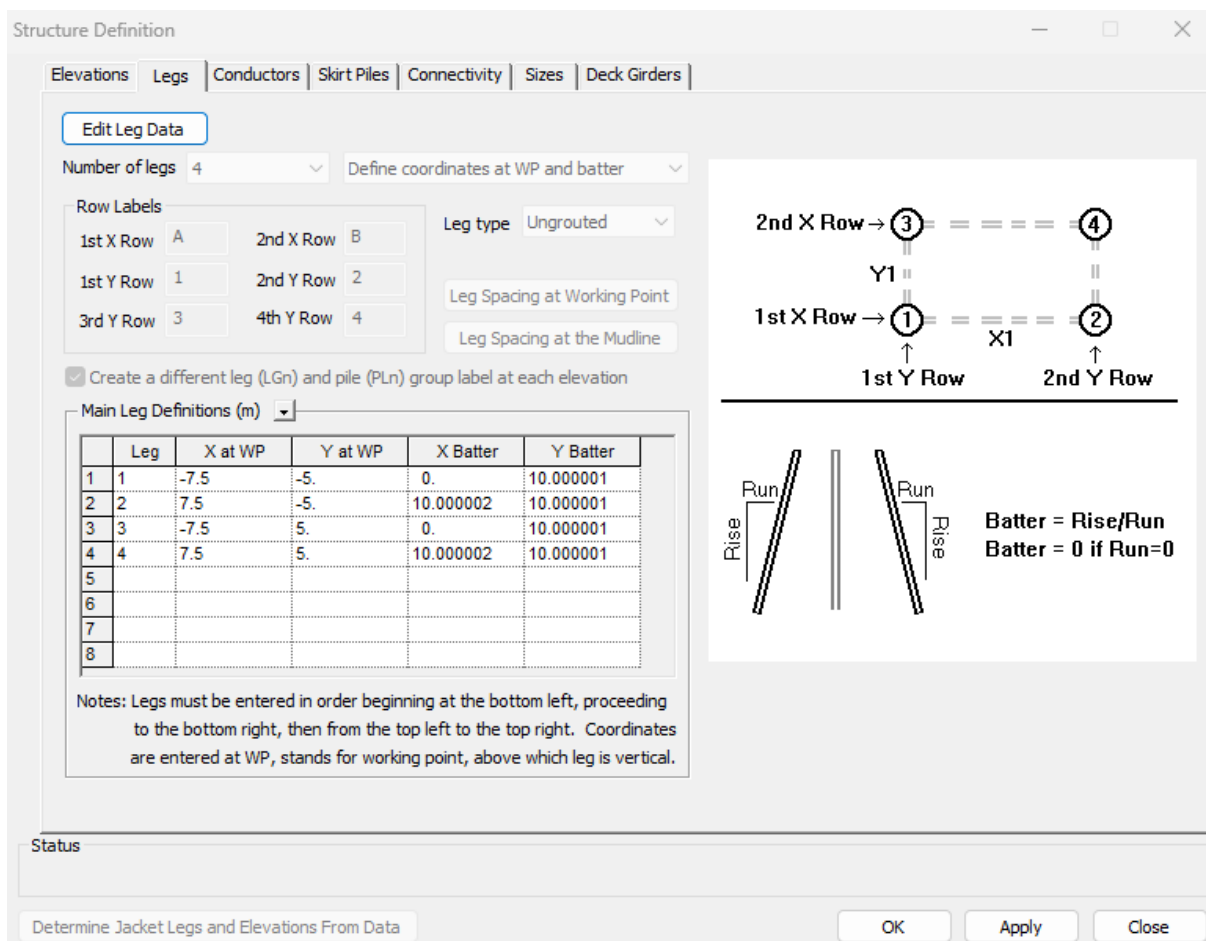
- Elevacija radne točke: 4 m.
- Konekcija pilona s palubama: 3 m.
- Dubina morske vode: 50 m.
- Elevacija čvrstog morskog dna: -50 m.
- Dubina pilota: -50 m.
- Elevacije horizontalnih nosača: -21 m , 2 m.
- Visine paluba: Celldeck; 15.3 m,
 Maindeck 23 m.



Slika 6.2 Prikaz sučelja SACS modula Precede

Nakon unosa vertikalnih dimenzija u Structure Definition, potrebno je unijeti podatke o nogama fiksne platforme. Podaci koji su zahtijevani za unos:

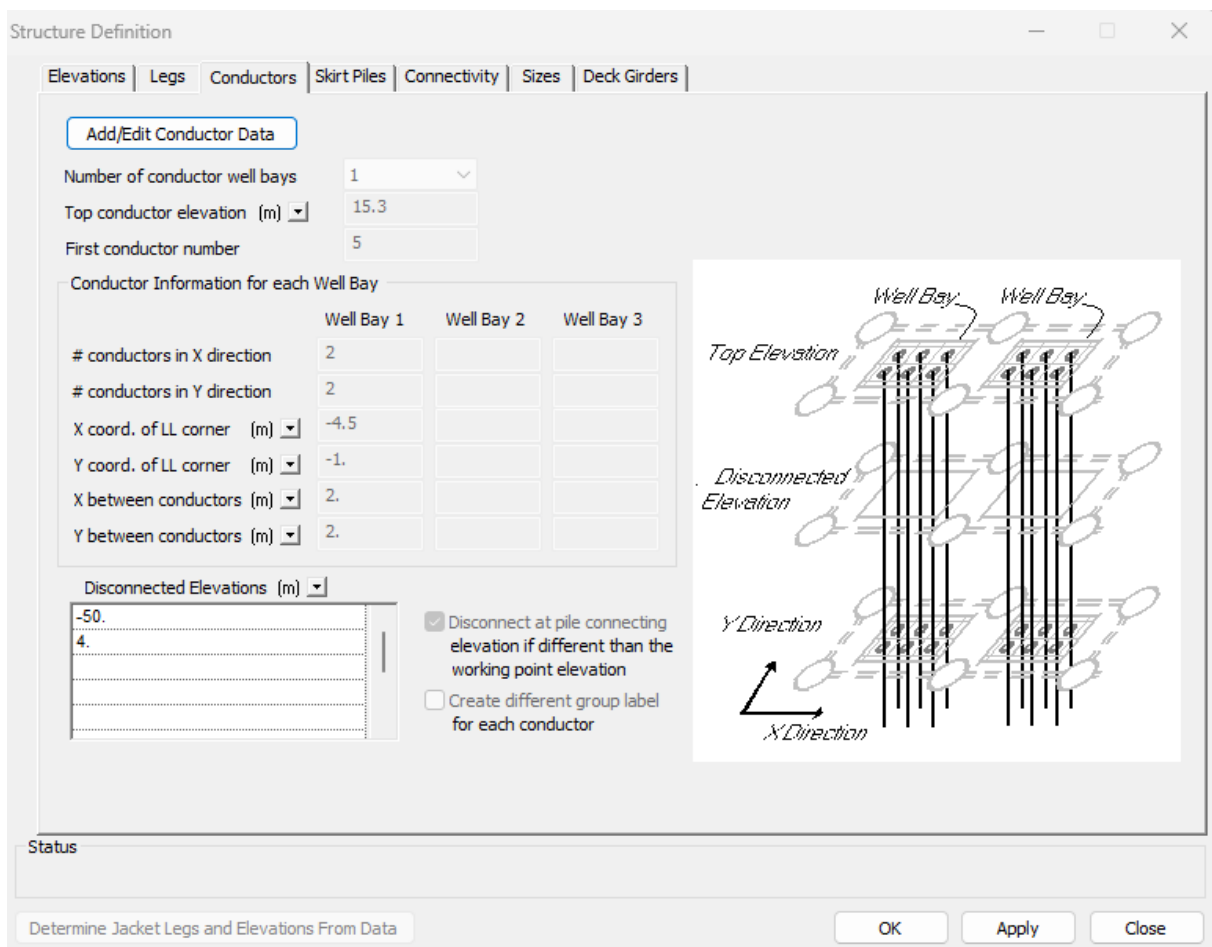
- Broj nogu.
- Koordinate nogu.
- Nagib noge.



Slika 6.3 Prikaz sučelja SACS modula precede

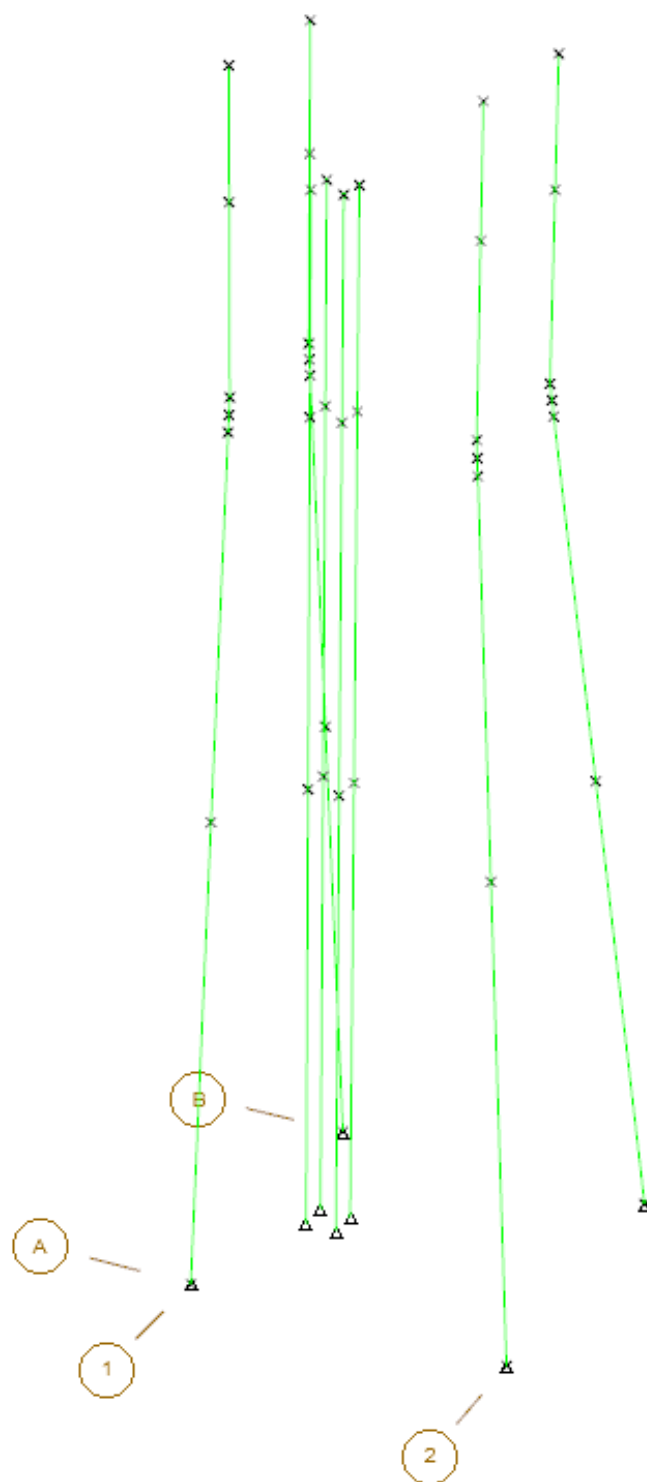
Slijedeći korak izrade platforme je unos podataka o konduktorima. Podaci koji su traženi su:

- Broj priključaka na palubi.
- Najviša elevacija konduktora.
- Raspored konduktora.
- Elevacije prekida konduktora.



Slika 6.4 prikaz sučelja SACS modula Precede

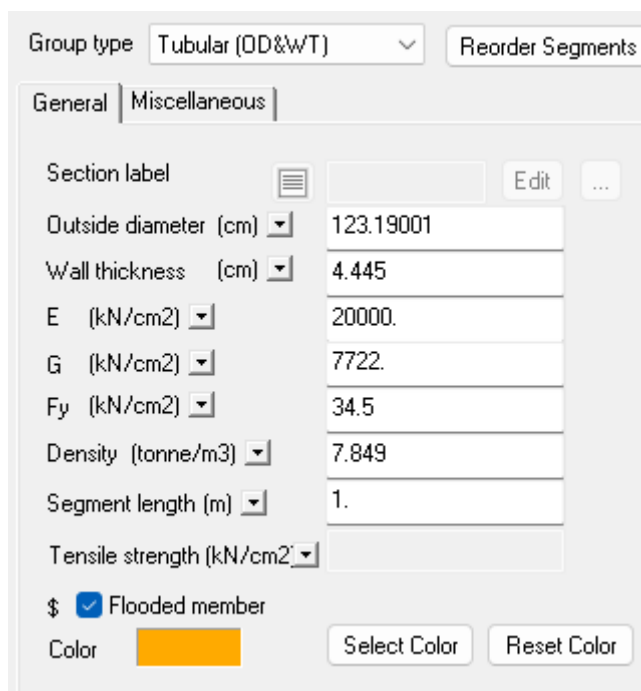
Nakon izrade konduktora mogu se vidjeti prvi obrisi platforme s osnovnim dimenzijama.



Slika 6.5 Grafički prikaz platforme nakon definiranja nogu i konduktora

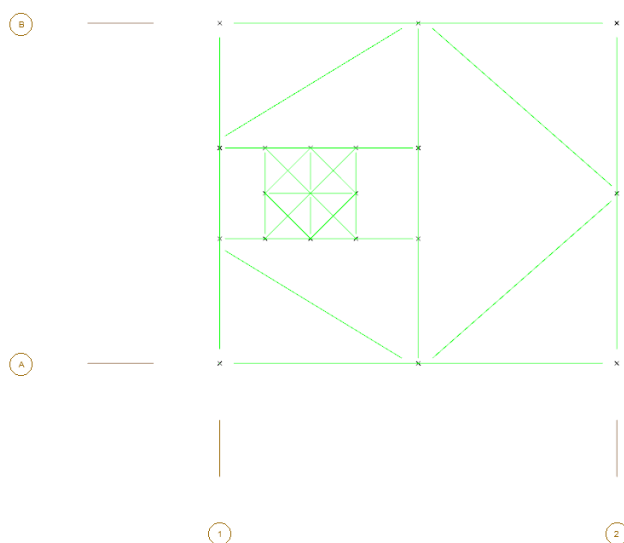
Slijedeći koraci su odrediti svojstva materijalima i odrediti njihovu geometriju, što je u Precedeu doista intuitivno. Za noge naftne platforme postavljeni su cilindrični profili s

dimenzijama danim na slici 6.6. Nakon unesenih podataka za noge platforme, potrebno je unijeti i podatke istom procedurom za druge elemente koji su do sada formirani.

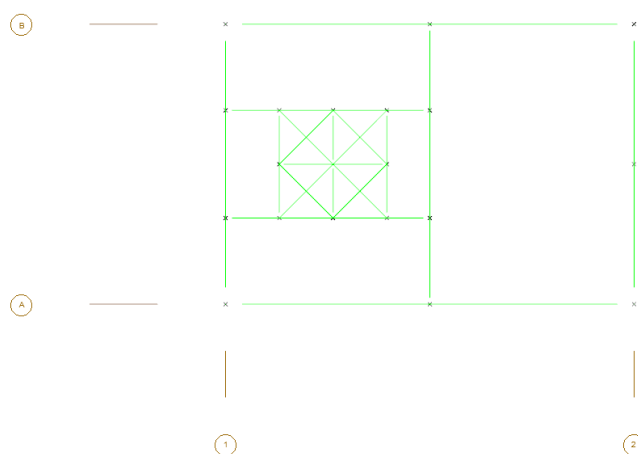


Slika 6.6 Sučelje u Precedu za unos svojstva materijala

Fiksna platforma ima horizontalne elemente koji ukružuju čitavu konstrukciju, ova platforma ima na dvije elevacije horizontalno postavljene elemente. 21 metar ispod morske površine i 2 metra iznad morske površine. Slike 6.5 i 6.6. horizontalno postavljene elemente na ranije spomenutim elevacijama. Nakon postavljanja svih elemenata određena je geometrija i svojstva materija

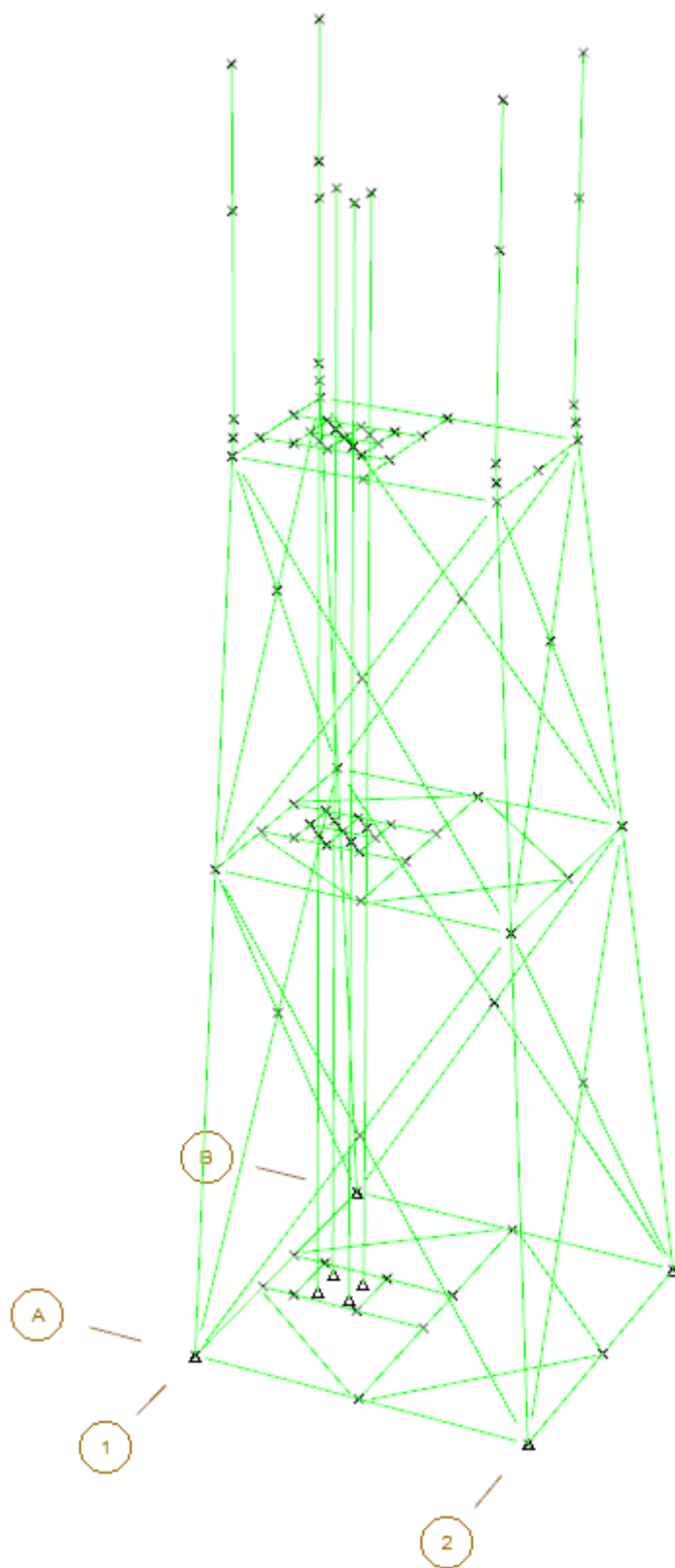


Slika 6.7 Tlocrt platforme na elevaciji od 21metar ispod morske površine



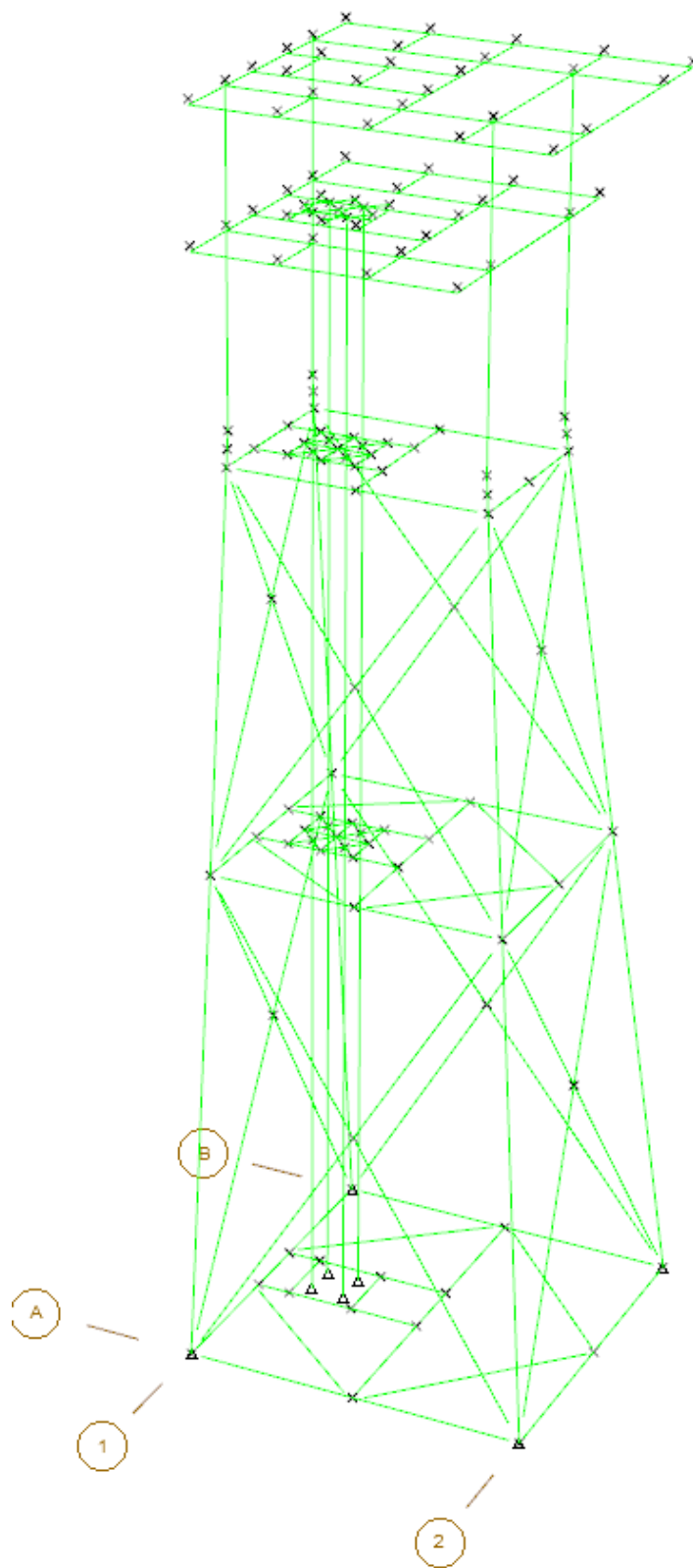
Slika 6.8 Tlocrt platforme na elevaciji od 2 metra iznad morske površine

Nakon što su postavljeni horizontalni nosači, potrebno je postaviti dijagonalne elemente koji povezuju suprotne čvorove na dvije susjedne elevacije. Dijagonalne elemente možemo vidjeti na slici 6.7. Za ovu operaciju korištena je funkcija X brace.



Slika 6.9 Prikaz platforme nakon dodavanja dijagonalnih elemenata

Zadanim novim dijagonalnim elementnima potrebno je odrediti geometriju i svojstva materijala. Slijedeći korak je izrada platformi, ovaj model fiksne platforme ima dvije palube Maindeck i Celldeck. Za izradu palubi ponovo se ulazi u Structural Definition i u prozoru Deck određuju se dimenzije platforme i elevacije na kojima će palube biti. Glavna paluba (Maindeck) postavljena je na elevaciji od 23 metra, dok je pomoćna platforma na elevaciji od 15.3 metra. Nakon pozicioniranja svih elemenata te zadavanja dimenzija potrebno je odrediti svojstva materijala i geometriju nosača na palubi. S određivanjem svojstava materijala završeno je geometrijsko modeliranje platforme.



Slika 6.10 Geometrijski potpuno definirana platforma

Kada se dovrši modeliranje paluba završeno je geometrijsko modeliranje fiksne platforme i slijedeći korak je postavljanje opterećenja na platformu.

6.4. Modeliranje opterećenja

6.4.1. Opterećenja vlastite težine i promjenjiva opterećenja

Modeliranje opterećenja vlastite težine (engl. dead load) i promjenjivih opterećenja također se izvodi Sacs-ovom modulu Precede. Opterećenja vlastite težine program proračunava iz zadane geometrije i zadanih svojstva materijala. Nakon što je utvrđena masa samih elemenata potrebno je unijeti parametre za obraštaj. Odabire se debljina obraštaja s obzirom na dubinu i njegova gustoća. U nepromjenjiva opterećenja ubrajaju se i težina pokrova palube, opreme i ostalo (npr. vatrozid, kran, staza za prilaz pristaništu). Sva opterećenja vlastite težine prikazana su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Opterećenja vlastite težine platforme

Vlastita težina		
Težina konstrukcije	8613.316	kN
Težina obraštaja	1001.109	kN
Težina palube	404.998	kN
Težina opreme	2379.678	kN
Ostalo	233.792	kN
Σ	12227.9	kN

U promjenjiva opterećenja (engl. live loads) ubrajaju se sva ona opterećenja koja su promjenjiva tijekom izvođenja nekih operativnih zahvata na platformi. Za promjenjiva opterećenja se postavljaju iskustveni podaci, tako je na glavnoj palubi opterećenje kontinuirano od 5 kN/m², a na pomoćnoj palubi kontinuirano opterećenje od 2.5 kN/m². Sva promjenjiva opterećenja su prikazana u tablici 6.2

Tablica 6.2 Promjenjiva opterećenja platforme

Promjenjiva opterećenja		
Promjenjiva težina	404.998	kN

Na rešetkastu konstrukciju pričvršćenu za morsko dno djeluje sila uzgona koja je suprotnog predznaka od sila proizvedenih nepromjenjivih i promjenjivih opterećenja. Precede daje mogućnost vrlo jednostavnog proračunavanja uzgona za sve elementa ispod slobodne površine i za obraštaj. U Tablici su prikazane sile uzgona za sve elemente i obraštaj te njihova suma.

Tablica 6.3 Sile uzgona na platformu

Uzgon		
Uzgon elemenata	2081.475	kN
Uzgon obraštaja	735.1	kN
Ukupni uzgon	2816.572	kN

U nastavku proračuna težina konstrukcije je smanjenja za ukupni iznos uzgona.

6.4.2. Okolišna opterećenja

Okolišna opterećenja koja se sastoje od valova vjetra i morske struje projektirana su za dva slučaja. Operativno okolišno, koje je u skladu s normalnim radnim uvjetima i projektno okolišno opterećenje koje je u skladu s ekstremnim vremenskim uvjetima. Svako projektno i operativno opterećenje je definirano za 12 smjerova nailaska na platformu. U nastavku se navode osnovni postavljeni podaci valova, vjetra i morske struje za jedan smjer.

Operativno opterećenje za smjer nailaska 0°:

Tablica 6.4 Svojstva okolišnog opterećenja za operativne uvjete

Val P000		
Valna teorija	STOKES 5TH	
Valna visina	6.10	m
Valni period	12.00	s
valna duljina	207.19	m
kut nailaska	0	°
valna brzina	17.27	m/s
Morska struja P000		
Brzina (0 m)	0.514	m/s
Brzina (50 m)	1.029	m/s
smjer nailaska	0	°
faktor blokiranja	0.847	
Faktor konduktora	0.85	
Vjetar P000		
Brzina vjetra	25.72	m/s
Smjer vjetra	0	°
Referentna visina	10.0	m
Vrsta profila	AP08	

Ekstremno opterećenje za smjer nailaska 0°:

Tablica 6.5 Svojstva okolišnog opterećenja za ekstremne uvjete

Val S000		
Valna teorija	STOKES 5TH	
Valna visina	12.19	m
Valni period	15.00	s
valna duljina	293.56	m
kut nailaska	0	°
valna brzina	19.57	m/s
Morska struja S000		
Brzina (0 m)	0.514	m/s
Brzina (50 m)	1.801	m/s
smjer nailaska	0	°
faktor blokiranja	0.847	
Faktor konduktora	0.85	
Vjetar S000		
Brzina vjetra	45.17	m/s
Smjer vjetra	0	°
Referentna visina	10.0	m
Vrsta profila	AP08	

6.4.3. Kombinacije opterećenja

Nakon što su određena nepromjenjiva, promjenjiva i okolišna opterećenja, preostaje postaviti moguće kombinacije opterećenja koja su moguća prilikom eksploatacije naftne platforme. Zadaje se 12 kombinacija opterećenja u operativnim uvjetima i 12 opterećenja u ekstremnim uvjetima. Opterećenja uzrokovanih težinom konstrukcije, valovima, vjetra i morske struje u operativnim uvjetima, množe se s faktorom sigurnosti 1.1, dok sva ostala opterećenja množe s jedinicom tj. ne uvrštavamo faktorom sigurnosti. Za ekstremne uvjete se također težina konstrukcije i okolišna opterećenja množe s faktorom 1.1, dok se promjenjivo opterećenje množi s faktorom 0.75 jer se ne očekuje da se u isto vrijeme dogode ekstremni uvjeti s maksimalnim promjenjivim opterećenjima. Preostala opterećenja u ekstremnim uvjetima ostaju jednaka. U tablici 6.6 je prikazana kombinacija opterećenja u operativnim uvjetima, a u tablici 6.7 je prikazana kombinacija naprezanja za ekstremne uvjete.

Tablica 6.6 Kombinacija opterećenja u operativnim uvjetima

Operativni uvjeti	
Težina konstrukcije	1.1
Težina palube	1
Težina opreme	1
Promjenjiva težina	1
Ostalo	1
P000	1.1

Tablica 6.7 Kombinacija opterećenja u ekstremnim uvjetima

Ekstremni uvjeti	
Težina konstrukcije	1.1
Težina palube	1
Težina opreme	1
Promjenjiva težina	0.75
Ostalo	1
S000	1.1

6.4.4. Suma globalnih sila i momenata

Sve globalne sile i momenti koji se javljaju u strukturi dane su u tablici 6.8.

Tablica 6.8 Suma globalnih sila i momenata na strukturu

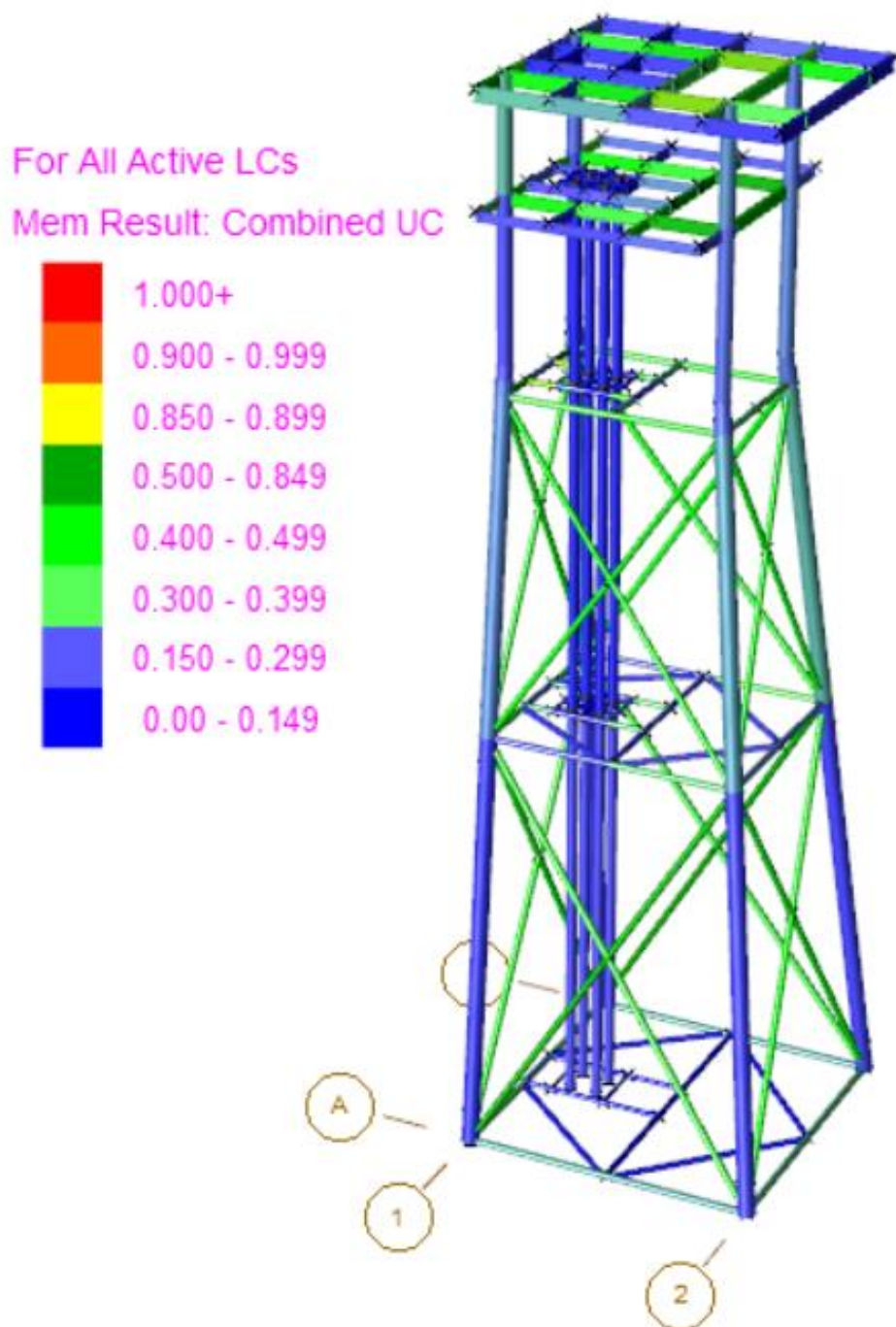
Opterećenje		F_x [KN]	F_y [KN]	F_z [KN]	M_x [KN/m]	M_y [KN/m]	M_z [KN/m]
1	O0	1179.75	-0.05	-12945.33	796.2	59824.6	-16.6
2	O30	1046.48	615.96	-12953.07	-22096.3	54748.7	-8.1
3	O60	598.26	1099.06	-12954.71	-40169.8	38281.2	5.9
4	O90	-5.91	1262.25	-12972.28	-46386.3	15997.4	15.6
5	O120	-603.61	1088.37	-12994.77	-39839.6	-6014.4	14.6
6	O150	-1042.83	607.35	-13009.95	-21847	-22309	39.2
7	O180	-1170.83	-0.1	-13011.5	797.6	-27204.8	16.7
8	O210	-1042.85	-607.45	-13009.74	23437.7	-22309.6	-7.8
9	O240	-603.69	-1088.38	-12994.54	41425.2	-6017.2	5.7
10	O270	-5.36	-1276.33	-12970.31	47755.8	16015.7	-50.5
11	O300	598.21	-1099.01	-12954.47	41754.4	38278.7	-25.8
12	O330	1046.41	-615.98	-12952.86	23684.9	54745.5	-23
13	N0	3973.23	-0.17	-11998.74	805.8	164751.4	-48.3
14	N30	3511.72	2049.37	-12002.42	-76901.5	147257.8	-408.4
15	N60	2004.16	3667.36	-12129.97	-139586	91484.1	-238.1
16	N90	-15.55	4229.42	-12177.18	-161256.7	14818.3	-455
17	N120	-2032.89	3664.49	-12225.86	-139775.8	-61945.9	-526.4
18	N150	-3529.36	2048.13	-12266.39	-77832	-118719.2	-340.3
19	N180	-3982.39	-0.08	-12278.24	792.6	-136140.6	46.2
20	N210	-3529.2	-2047.99	-12265.29	79405.2	-118712.6	428.5
21	N240	-2032.77	-3663.75	-12224.51	141324.8	-61941.4	584.3
22	N270	-15.73	-4228.29	-12175.93	162791.9	14810	456.3
23	N300	2003.63	-3666.4	-12128.63	141129.7	91461.7	182.2
24	N330	3511.97	-2049.82	-12001.38	78515.7	147266.4	317.5

7. PRIKAZ REZULTATA

Model fiksne platforme opterećen je ranije definiranim kombinacijama opterećenja. Za operativne uvjete oznaka je O i kut nailaska valova, vjetra i morske struje, dok za ekstremne uvjete Oznaka je N i kut nailaska vanjskih opterećenja kao i u operativnim uvjetima.

7.1. Kombinirano opterećenje elemenata

Kombinirano opterećenje elemenata se proračunava po formula navedenim u poglavlju 5.2. Rezultati dobiveni u programu SACS koji koristi API pravila navedeni su u nastavku. Grafički prikaz rezultata prikazan je na slici 7.1, te se može iščitati kako svaki element prolazi provjeru kombiniranog opterećenja. U tablici 7.1 su prikazani elementi s najvećim kombiniranim opterećenjem. Uz najveće kombinirano opterećenje može se vidjeti pri kojemu opterećenju dolazi do njega, na kojemu mjestu u elementu te kolika se naprezanja pojavljuju u aksijalnom opterećenju, savijanju u osi i van osi elementa, smična sila te koeficijenti vitkosti.



Slika 7.1 Grafički prikaz maksimalnog kombiniranog naprezanja

Tablica 7.1 Elementi s kombiniranim opterećenjem većim od 0.5

Element	ID grupe	Max comb. UC	Opterećenje	Udaljenost od kraja	Aksijalno [N/mm ²]	savijanje		Smična sila		KLY/Ry	KLZ/RZ
						y [N/mm ²]	z [N/mm ²]	Fy [kN]	Fz [kN]		
101L-101X	BR1	0.507	N150	0	-53.54	-7.54	8.58	-8.95	-0.72	98.9	98.9
103L-102X	BR1	0.512	N210	0	-53.96	-7.7	-8.61	8.94	-0.67	98.9	98.9
3104-303L	H31	0.5	N120	0	-17.58	-7.9	-95.68	204.34	-19.47	65.3	16.2
3103-3108	H32	0.671	N240	0	-11.89	-8.16	-150.81	213.29	3.6	12.7	12.7
3104-3107	H32	0.678	N120	0	-12.36	-9.34	151.89	-214.57	4.73	12.7	12.7
6103-6111	W02	0.503	O60	0	-0.13	-70.46	12.74	-5.97	259.75	11.6	39.7
7103-704L	W03	0.642	O330	5	-2.69	-95.66	-5.26	-6.41	-658.97	12.7	51.4
7105-702L	W03	0.659	O300	5	-3.42	-94.73	-8.99	-11.57	-650.09	12.7	51.4

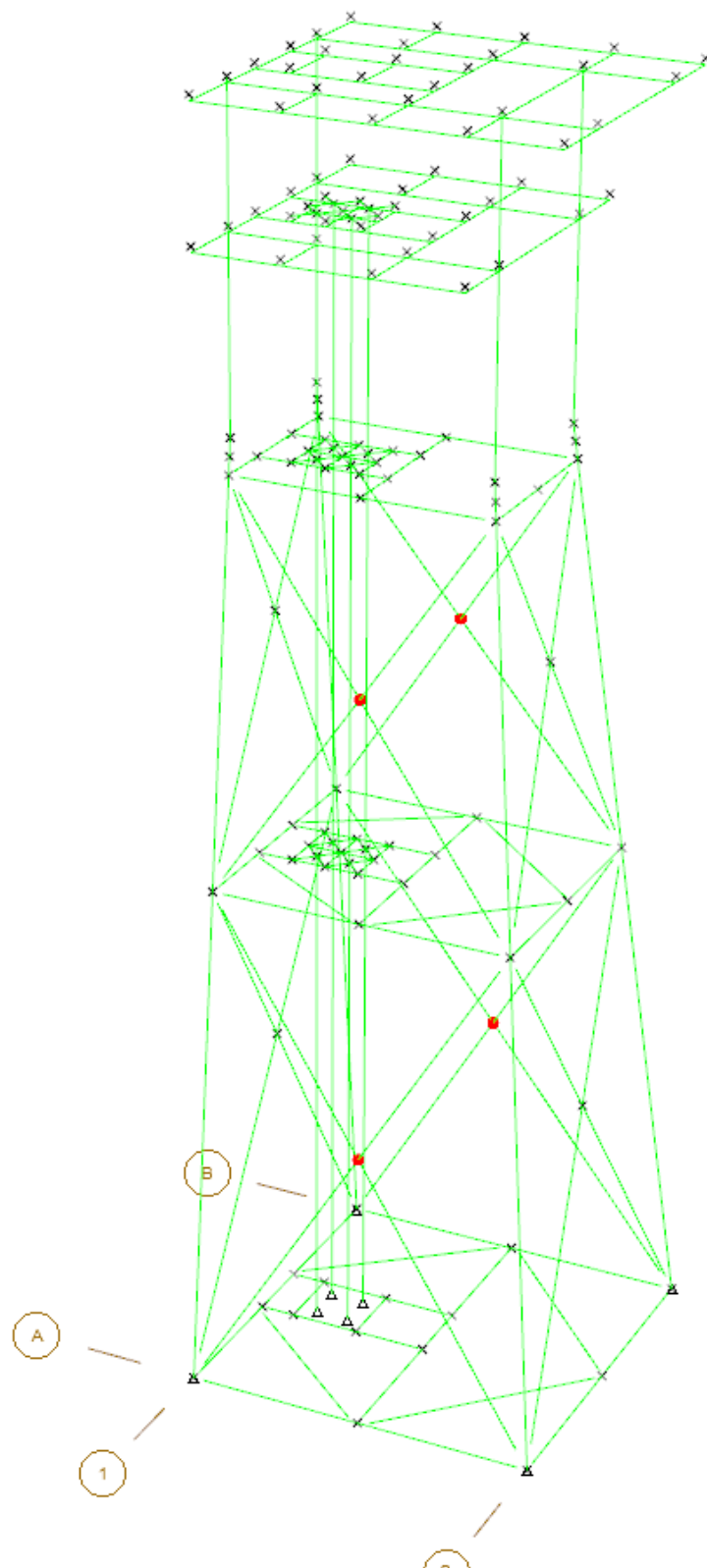
7.2. provjera spojeva

Provjera spojeva se provodi pomoću API-jevih pravila. Korištene su formule navedene u poglavlju 5.3 Provjera spojeva unutar SACS-a prema tim pravilima određuje kombinirano naprezanje u spojevima te nam omogućuje vrlo jednostavan i brz pregled svih spojeva. U tablici 7.2 su navedeni elementi s najvećim kombiniranim opterećenjem kojima omjer kombiniranog naprezanja ne smije prelaziti 1. Na slici su prikazani spojevi s najvećim kombiniranim naprezanjima iz tablice 7.2.

Tablica 7.2 Spojevi s najvećim kombiniranim opterećenjem

Zajednički spoj	Chord spoj	Brace spoj	dimenzije chorda		Tip spoja	dimenzije brace		Brace angle	LC	naprezanje u ch [N/mm ²]
			D [cm]	t [cm]		D [cm]	t [cm]			
201X	302L	301L	45.72	1.905	X	45.72	1.905	70.46	N240	-39.86
102X	204L	203L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	65.97	N150	-54.29
101X	202L	201L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	65.97	N210	-53.67
201X	201L	202L	45.72	1.905	X	45.72	1.905	70.46	N240	-39.86
202X	304L	303L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	70.46	N120	-37.10
202X	203L	204L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	70.46	N120	-37.10
102X	103L	104L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	65.97	N150	-54.29
101X	101L	102L	50.8	1.905	X	50.8	1.905	65.97	N210	-53.67

Zajednički spoj	Chord spoj	Brace spoj	Naprezanje brace [N/mm ²]			Dopušteno naprezanje [N/mm ²]			Max UC ratio
			FA	OPB	IPB	FA	OPB	IPB	
201X	302L	301L	38.70	23.62	4.50	58.47	121.87	173.74	0.856
102X	204L	203L	46.43	10.87	9.38	61.94	109.72	162.69	0.852
101X	202L	201L	45.99	11.06	9.35	61.93	109.82	162.84	0.847
201X	201L	202L	39.20	21.34	7.73	58.84	121.87	173.74	0.843
202X	304L	303L	38.17	21.04	1.81	58.63	111.48	165.29	0.840
202X	203L	204L	38.60	18.95	5.28	58.86	111.48	165.29	0.827
102X	103L	104L	47.32	6.71	10.47	62.20	109.72	162.69	0.826
101X	101L	102L	46.87	6.82	10.36	62.19	109.82	162.84	0.820



Slika 7.2 Grafički prikaz spojeva največeg kombiniranog napreznja (crvena boja)

8. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog diplomskog rada provedena je detaljna statička analiza strukture fiksne rešetkaste platforme. Provedena je provjera spojeva i kombiniranog opterećenja elemenata prema klasifikacijskom društvu American Petroleum Institute. Provedena analiza pokazuje da svi elementi i spojevi zadovoljavaju zahtijevanu čvrstoću, što je prikazano u posljednjem poglavlju. Po rezultatima se može zaključiti da je ova rešetkasta konstrukcija predimenzionirana, no moramo uzeti u obzir da se za potpunu statičku analizu mora uzeti u obzir zamor i opterećenja od potresa koja mogu biti višestruko snažnija u usporedbi sa okolišnim opterećenjima. Konstrukcija je projektirana da može izdržati sve ekstremne i operativne uvjete za 12 smjerova nailaska okolišnih opterećenja s pripadnim opterećenjima same konstrukcije i opreme za rad. Kako je teško doći do nacrt platformi te skidanja tajnosti s dokumenata u dogovoru s mentorom konstruirana je platforma s 4 noge po uzoru na pokazni model SACS platforme. Rubni uvjeti su uzeti po uputama SACS-a da se pilotu vežu za tlo koje se predstavlja kao nelinearna matrica krutosti vezani su za linearnu konstrukciju preko glave pilota.

Izrada ovog diplomskog mi je dao početno znanje za projektiranje i analizu rešetkastih konstrukcija. Smatram da bi se mogao nastaviti baviti ovom tematikom koja možda nije toliko puno obrađena studijskim programom, no s ovim diplomskim sam potaknut dodatnom izučavanju ove teme i mogućim zaposlenjem u toj industriji.

LITERATURA

- [1] „Oil platform - Wikipedia“. https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform#cite_note-1 (pristupljeno 08. srpanj 2023.).
- [2] „Naftna platforma – Wikipedia“. https://hr.wikipedia.org/wiki/Naftna_platforma (pristupljeno 08. srpanj 2023.).
- [3] „Offshore Structures Design, Construction and Maintenance“. [Na internetu]. Dostupno na: www.LearnEngineering.in
- [4] K. Sadeghi i H. Dilek, „AN INTRODUCTION TO THE DESIGN OF OFFSHORE STRUCTURES“, *Academic Research International*, sv. 10, izd. 1, 2019.
- [5] „Main components of a typical jacket structure | Download Scientific Diagram“. https://www.researchgate.net/figure/Main-components-of-a-typical-jacket-structure_fig1_327419322 (pristupljeno 09. srpanj 2023.).
- [6] „Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD TWENTY-SECOND EDITION, XXX 200X“.
- [7] J. T. Kirby i T. M. Chen, „Surface Waves on Vertically Sheared Flows, Approximate Dispersion Relations“, *J Geophys Res*, sij. 1989.
- [8] SACS „Seastate“, 2022.
- [9] Građevinski fakultet u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu „Valna opterećenja fiknih pomorskih konstrukcija“.
- [10] „Specification for Structural Steel Buildings Allowable Stress Design and Plastic Design Junel, 1989 with Commentary“.