

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 20	str. 51 - 63	Zagreb, 2008.
----------------------------------	---------	--------------	---------------

UDK 622.242
UDC 622.242

Pregledni rad
Review

Jezik/Language: Hrvatski/Croatian

FUNKCIONALNI ZAHTJEVI STABILNOSTI SAMOPODIŽUĆIH BUŠAĆIH PLATFORMI NA RADNOJ POZICIJI

FUNCTIONAL REQUIREMENTS FOR STABILITY OF JACK UP DRILLING RIGS ON WORKING POSITION

DAMIR ZADRAVEC¹, ZDENKO KRIŠTAFOR²

¹INA D.D. SD Naftaplin
Šubićeva 29, 10000 Zagreb

²Rudarsko-geološko-naftni fakultet,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Ključne riječi: samopodizuća bušaća platforma, sile uslijed djelovanja radne okoline, predopterećenje, prodiranje nogu u morsko dno, kut trenja, moment stabilnosti, sigurnost protiv proklizavanja

Key words: jack up drilling platform, environmental forces, preload, legs penetration in seabed, friction angle, stability moment, safety against slippery

Sažetak

Samopodizuće bušaće platforme odobalni su objekti čiju osobitost čini rudarsko postrojenje na pomorskoj strukturi bez vlastitog pogona, poduprtoj na morsko dno. Upotrebljavaju se za izgradnju i opremanje dubokih bušotina pri istraživanju i eksploataciji ugljikovodika iz podmorja. Postizanjem uvjeta za smještanje centra gravitacije u unaprijed predodređene i dozvoljene granice tijekom tegljenja odnosno uravnoteženjem sila koje djeluju na objekt tijekom radova na radnoj poziciji, osigurava se stabilnost i siguran rad platforme. Prodiranjem stopa nogu u morsko dno uslijed vlastite težine i proračunavanjem sile predopterećenja, ovisno o geomehničkim svojstvima, vrsti i nosivosti tla morskog dna, proračunavi pritom sile uslijed djelovanja radne okoline (valovi, vjetar, morska struja, snijeg, led), osigurava se primjereno temeljenje, uravnoteženje sila koje djeluju na platformu te preduvjeti za siguran rad objekta u cjelini.

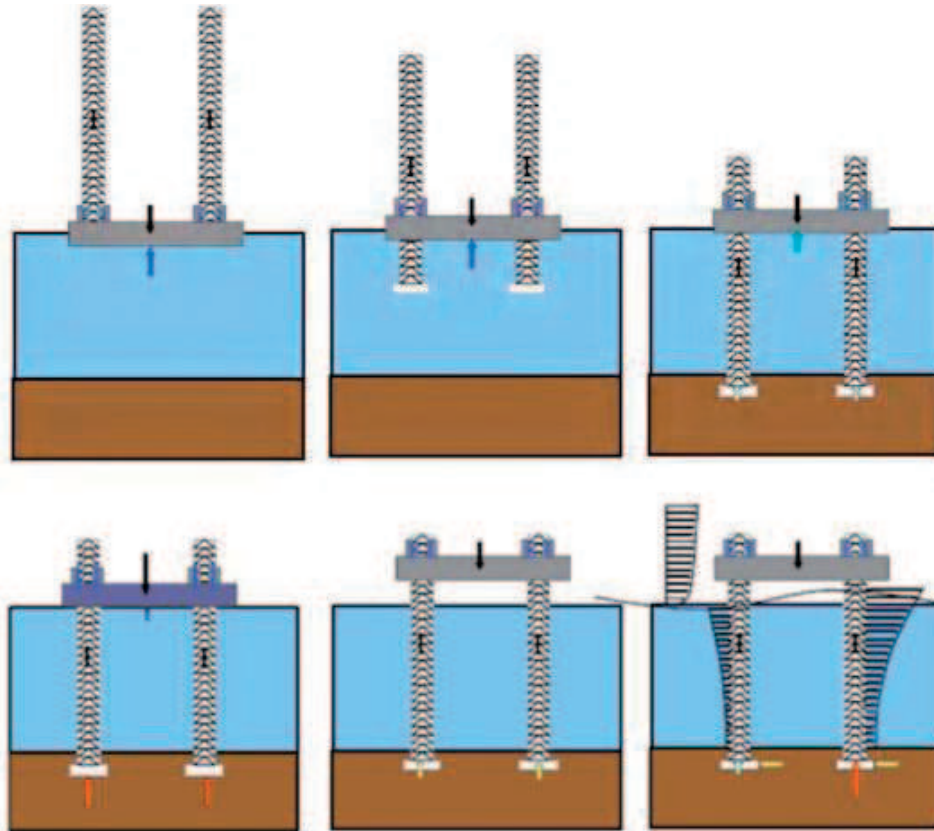
Abstract

Jack up drilling platforms are offshore drilling units composed by drilling rig situated on naval structure without self propelling device. Jack up drilling rigs are units used for drilling and completion of deep well bores in offshore oil and gas exploration industry or field development. By reaching the theoretical center of gravity and equilibrium while towing and balance of acting forces on the unit while operations on location ensures the stability and safe mode of operations of entire unit. Penetration of legs spud cans in sea bad produced by weight of unit and acting of preload force, depending on geomechanical characteristics, type and bearing capacity of sea bad, and taking in consideration working environmental forces which acts on unit (wind, waves, sea current, ice, snow) ensures proper foundation, environmental forces balancing and safe mode of operations.

UVOD

Samopodizuće (engl. *jack up*) bušaće platforme kompleksni su odobalni objekti čiju osobitost čini rudarsko postrojenje na pomorskoj strukturi bez vlastitog pogona. Upotrebljavaju se za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika iz podmorja, a sastoje se od čeličnog trupa opremljenog najčešće s tri noge te sustavom za njihovo podizanje i spuštanje. Plove na morskoj površini pogonjene vlačnom silom od brodova tegljača koristeći uzgon i plovna svojstva vlastitog trupa. Dolaskom na željenu lokaciju pozicioniraju se, a spuštanjem nogu dolazi do njihovog prodiranja u morsko dno i na taj se način podupiru. Vlastitom težinom i predopterećenjem uravnotežuju sile radne okoline, podižu se iznad površine mora na radni položaj te započinju radove na izgradnji i opremanju bušotina na moru (slika 1).

Identifikacija i definiranje parametara utjecaja radne okoline na stabilnost i izvedbu rudarskih radova samopodizućim bušaćim platformama, sastoji se od evaluacije opterećenja platforme na određenoj poziciji. Najveća dubina mora, najveća visina i perioda vala, profil brzine morske struje, referentna brzina vjetra, utjecaj snijega, leda i temperature u hladnim zonama te utjecaj potresa u trusnom području, određuju mogućnost uporabe određene samopodizuće platforme na zahtijevanoj lokaciji. Nadalje, istraživanje morskog dna i određivanje geomehničkih pokazatelja te njihova procjena u cilju izračuna pretpostavljenog prodiranja (penetracije) stopa nogu u morsko dno od neobične su važnosti za verifikaciju stabilnosti platforme. Potpune informacije o radnoj okolini operatorske kompanije naručuju od specijaliziranih agencija za određena područja.



Slika 1. Slijed radnji samopodizućih bušačih platformi pri dolasku na lokaciju (www.bbengr.com, 2008)
Figure 1 Synopsis of Jack up drilling rigs operations while approaching to the location (www.bbengr.com, 2008)

Zahtjevi operatorske kompanije specificirani u dokumentaciji za traženje usluga (engl. *tender*), zakonska regulativa u području potencijalnih rudarskih radova te parametri radne okoline čimbenici su koji utječu na odabir samopodizūće platforme za rad na određenom projektu. Odabir kriterija i računskih metoda za izračun sila opterećenja i stabilnosti uslijed utjecaja radne okoline ključan je kod usporedbe operativnih svojstava samopodizūćih platformi prilikom njihovog odabira za pojedine projekte. Kriterijima za odabir i matematičkim modeliranjem vrednuju se (LeTirant, 1993):

- dizajn hidrodinamičkih koeficijenata platforme (različiti ovisno o zakonskoj regulativi, dizajnu i klasifikacijskoj organizaciji);
- računске metode za verifikaciju (linearne ili nelinearne, determinističke ili stohastičke, statičke ili dinamičke);
- korištena teorija morskih valova;
- pretpostavljena stabilnost morskog dna i platforme u cjelini;
- utjecaj temperature na ponašanje čelika u hladnim područjima.

Prikaz utjecaja radne okoline i naprezanja koja djeluju na platformu za vrijeme operacija na radnoj lokaciji definira interakciju dinamičkog djelovanja sile morskih valova, morske struje i vjetra (vodoravne sile) te geomehaničkih svojstva i reakciju morskog dna, uravnotežene okomitim silama (sile uslijed težine platforme i predopterećenja) te faktore sigurnosti protiv prevrtanja i proklizavanja.

Podjelom samopodizūćih bušačih platformi s obzirom na tipove i njihova operativna svojstva definirane su njihove osobitosti i ograničenja ovisno o radnoj okolini u kojoj izvode radove. Važno je naglasiti kako su duljina nogu i model operacija relevantni čimbenici prema kojem se samopodizūće bušaće platforme definiraju i odabiru za pojedine projekte te kako geometrijski oblik stopa nogu određuje silu kojom preko kontaktne površine, reakcijom nogu, djeluju na morsko dno. Prodiranje nogu u morsko dno i ostvarenje proračunatog predopterećenja na osnovu karakteristika morskog dna, a samim tim uravnoteženje opterećenja uslijed djelovanja radne okoline, jamstvo su sigurnog rada samopodizūće bušaće platforme na radnoj poziciji. Važan čimbenik navedenog proračuna su podaci o geomehaničkim svojstvima i litološki sastav morskog

dna. Geotehnička ispitivanja koja su potrebna prije početka operacija na lokaciji uvelike doprinose sigurnosti kasnijeg rada platforme te su obvezatna i propisana zakonskom regulativom i internim propisima sudionika u radnom procesu.

OPTEREĆENJA POKRETNIH SAMOPODIŽUĆIH BUŠAČIH PLATFORMI NA RADNOJ POZICIJI

Opterećenja uslijed djelovanja radne okoline zavise o okolnostima u kojoj se samopodižuća bušača platforma nalazi. To mogu biti operacije vezane uz premještanje ili izvođenje radova na lokaciji. Kada je platforma pozicionirana na radnu lokaciju i podignuta na radnu poziciju opterećenja su definirana kao:

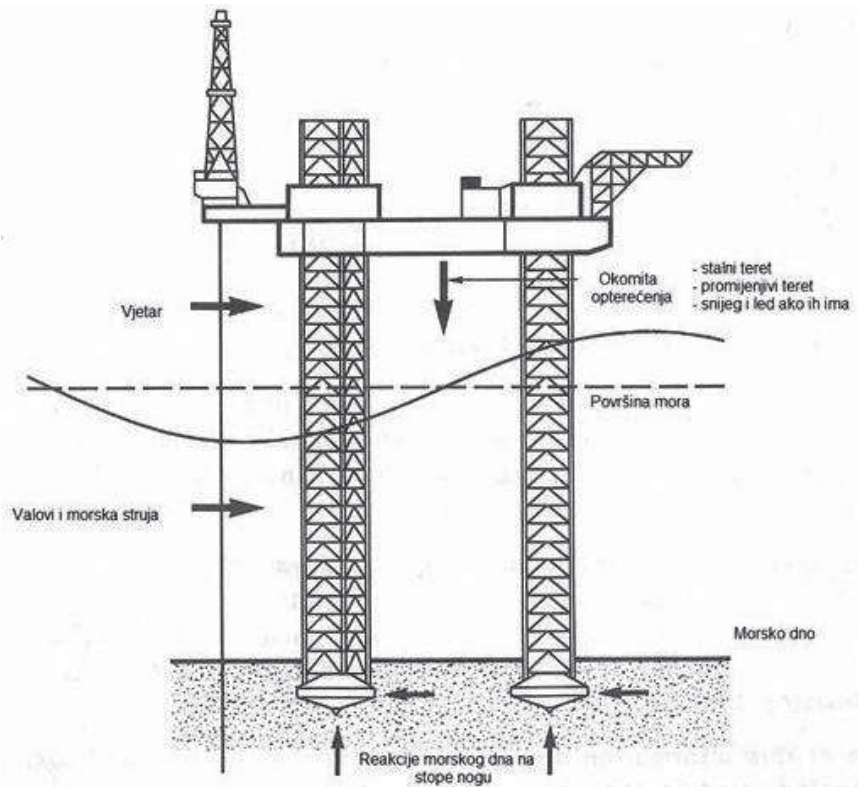
- osnovni teret;
- stalni teret;
- promjenljivi teret;
- teret predopterećenja;
- opterećenja uslijed radne okoline i izvođenja radova.

Osnovni teret je težina čelične oplata trupa i pripadajuće opreme potrebne za održavanje platforme tijekom plovidbe, podizanje i spuštanje trupa platforme, težina nogu i stopa nogu te težina helikopterske palube.

Stalni teret je težina opreme koja je manje-više stalno prisutna na platformi, a čine ga: palubne dizalice, stambeni dio, motori, generatori elektroenergetskog sustava, isplačne sisaljke, isplačni sustav, cementacijski agregat, oprema tornja, toranj, otplinjači, podkonstrukcija tornja sa sustavom za pomicanje, grede za pomicanje podkonstrukcije tornja itd.

Promjenljivi ili varijabilni teret čine: posada, isplaka, praškasti materijali za isplaku, cement, kemikalije, dizelsko gorivo, pitka voda, industrijska voda, ulje za podmazivanje, kolona zaštitnih cijevi, bušaće cijevi, teške bušaće cijevi, oprema za kontrolu tlaka u bušotini, isplačni laboratorij, kontejneri i oprema servisnih tvrtki, itd. Teret predopterećenja (engl. *preload*) je težina morske vode kojom se privremeno pune spremnici tijekom operacije predopterećenja. Po uspješnom završetku postupka predopterećenja, morska voda se ispušta iz spremnika, a ukoliko se dio zadrži u spremnicima u svrhu održanja stabilnosti tijekom izvođenja operacija na lokaciji, treba je uzeti u obzir za proračun centra gravitacije kao varijabilni teret.

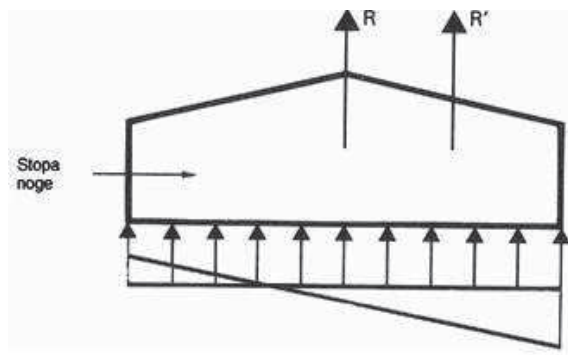
Tijekom radova bušenja evidentni su i teret na kuki, koji uključuje teret bušačkog niza i nateg uslijed trenja niza u bušotini, težina bušačkog niza ovješnog u vrtačem stolu i težina odložena na podištu tornja odnosno teret niza bušačkih cijevi oslonjenih u tornju (engl. *finger*).



Slika 2. Opterećenja uslijed utjecaja djelovanja radne okoline (LeTirant, 1993)
Figure 2 Loads due to working environment (LeTirant, 1993)

Posljednja tri navedena opterećenja pripadaju skupini promjenljivog tereta, evidencija kojeg se mora svakodnevno voditi i kontrolirati. Opterećenja uslijed djelovanja radne okoline (slika 2) predstavljaju utjecaj morskih valova, morske struje, vjetera i opterećenja uslijed deformacija i reakcija podloge tijekom pozicioniranja platforme. Kad je platforma podignuta u radni položaj opterećenja uslijed sile vjetera, valova i morske struje dovode se u ravnotežu djelovanjem sila u suprotnom smjeru i to težinom platforme, reakcijom morskog dna na noge i prodiranjem nogu. Navedene sile uravnoteženja otpor su prevrtanju platforme. Metode za računanje spomenutih opterećenja definirane su standardima klasifikacije i bit će prikazane u daljnjem tekstu. Kao dodatak opterećenjima uslijed djelovanja radne okoline su opterećenja uslijed deformacija kada je platforma podignuta u radni položaj.

Platforma podignuta u radni položaj predstavlja vrlo fleksibilnu strukturu te podnosi elastične deformacije uslijed horizontalnih opterećenja. Područje stopa nogu u morskome dnu rotira do jednog stupnja, dok u području trupa vodoravna gibanja mogu biti jedan i više metara. Posljedice takvog gibanja su asimetrična opterećenja podloge ispod stopa nogu, odnosno naprezanja više nisu ravnomjerna nego se povećavaju prema obodu stopa nogu (slika 3) te se javlja $P \times \Delta$ efekt“ kao posljedica gibanja trupa platforme (slika 4).



Slika 3. Asimetrična reakcija podloge uslijed rotacije stopa noge (LeTirant, 1993)

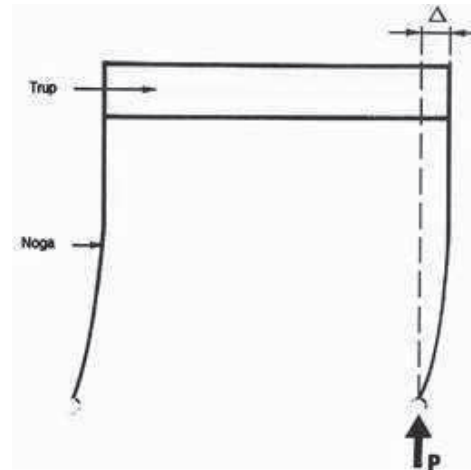
Figure 3 Asymmetric reaction due to spud can rotation (LeTirant, 1993)

Rezultantna sila u nogama platforme je decentrirana proizvodeći sekundarni moment sile $P \times \Delta$, gdje je P osno opterećenje u nozi, a Δ pomak trupa platforme:

$$\Delta = \frac{e_s}{1 - \frac{P}{P_E}} \quad (1)$$

Pri tome su:

- e_s - linearni elastični pomak trupa;
- P - osno opterećenje noge;
- P_E - Kritično opterećenje noge prema Euleru.



Slika 4. Efekt decentrirane sile u nogama (LeTirant, 1993)

Figure 4 Effect of off-centering forces in the legs (LeTirant, 1993)

Tijekom rada platforme na nogama i stopama nogu mogu se nakupiti morski mikroorganizmi i školjke. Takve nakupine povećat će površinu rešetkaste konstrukcije nogu i mogu prouzročiti povećanje djelovanja sile mora i morske struje na konstrukciju nogu. Tijekom svake operacije podizanja i spuštanja platforme treba pregledati noge i odrediti količinu nakupina. Povremeno ih je potrebno odstraniti radi izbjegavanja obilatog nakupljanja i dodatnog opterećenja platforme.

GEOFIZIČKA I GEOTEHNIČKA ISPITIVANJA MORSKOG DNE PRIJE INSTALIRANJA SAMOPODIŽUĆE PLATFORME

Istraživanje morskog dna prije instaliranja samopodižuće platforme sastoji se od geofizičkih i geotehničkih istraživanja lokacije za postavljanje platforme. U prvoj fazi geofizička istraživanja podrazumijevaju identifikaciju morskog dna i površinskih slojeva te otkrivanje prisutnosti plitkih plinova koji su velika potencijalna opasnost za sigurnost samopodižuće i proizvodne platforme. Interpretacijom podataka analogne i digitalne seizmike moguće je odrediti stratigrafsku pripadnost i litološki sastav, odnosno vrstu i tvrdoću tla morskog dna i površinskih slojeva, morfologiju dna, eventualnu prisutnost neželjenih predmeta i struktura na morskome dnu te eventualna područja

dimnjaka plitkih i površinskih plinova. Visokorezolurna seizmička ispitivanja provode se do dubine od 1000 m i detektiraju prisutnost plitkih plinova analizom niskih, srednjih i osobito visokih amplituda anomalija seizmičke refleksije (engl. *bright spot*). Opažanja su moguća uslijed vrlo velike razlike u impedanciji između slojeva zasićenih vodom ili plinom.

Na temelju interpretacije ispitivanja, izrađuju se karte anomalija i u skladu s njima određuje konačna lokacija za pozicioniranje platforme. Geofizička ispitivanja obuhvaćaju i jezgrovanje morskog dna do dubine od oko 5 do 10 m zbog identifikacije karakteristika morskog dna i kalibracije površinskih mjerenja. U fazi, neposredno prije ili tijekom instaliranja platforme, izvode se geotehnička ispitivanja odnosno uzimanje uzoraka morskog dna jezgrovanjem do dubine dvostruko veće od promjera stopa nogu platforme. Uzimanje jezgre na nepoznatim lokacijama izvodi se za to specijalno opremljenim brodovima prije istražnog bušenja ili izravno s platforme prije predopterećenja, u svrhu računanja pretpostavljenih vrijednosti prodiranja stopa nogu. Postupak za uzimanje jezgre morskog dna od velike je važnosti za sigurnost platforme, a svrha mu je pozicioniranje platforme na sigurnu lokaciju. Sastoji se od parcijalnog predopterećenja platforme do 25% od vrijednosti proračunatog te uzimanje uzoraka kad je trup djelomično uronjen ili malo podignut iznad površine mora. Spomenuti geomehanički postupak za ispitivanje parametara morskog dna primijenjen je za izračun odnosa predopterećenja i pretpostavljene penetracije nogu platforme Noble Carl Norberg, konstrukcije Marathon LeTourneau klase 82 u području Sjevernog Jadrana. Uzorci morskog dna uzimani su kroz bušaći niz promjera 0,127 m (5") i udarni kolektor za jezgrovanje duljine 1 m. Dobiven je sljedeći litološki sastav morskog dna (Izabela 2, 2006.):

- od morskog dna do dubine 3,8 m ispod dna – mekana do srednje postojana glina, otpornosti na posmična naprezanja 10 – 25 kPa;
- od 3,8 do 5,8 m – srednje gusti silt;
- Od 5,8 do 6,8 m – srednje postojan do postojan treset, otpornosti na posmična naprezanja od oko 50 kPa;
- od 6,8 do 17 m - srednje gusti silt;
- od 17 do 26 m – srednje gusti pijesak.

Uzorci tla vizualno se procjenjuju i standardno ispituju u svrhu definiranja mehaničkih karakteristika. Mjerenja posmičnog naprezanja nedreniranih (neisušenih) uzoraka, mjerenje kuta trenja dreniranih uzoraka te modula elastičnosti uzoraka tla prikupljenih pomoću udarnog kolektora, iskazuju najslabija svojstva tla jer su im originalne vrijednosti narušene činom uzimanja uzorka. Dio uzoraka šalje se i na laboratorijska ispitivanja te se njihovom analizom i triaksijskim ispitivanjima utvrđuju:

- vrste tla
- sadržaj vode, W
- težina jediničnog volumena, γ
- raspodjela veličina čestica u uzorku
- Atterbergova ograničenja W_L i W_P za kohezijska tla
- indeks plastičnosti, I_P
- otpornost na nedrenirana posmična naprezanja, C_U
- kut trenja, ϕ'
- modul elastičnosti, E
- modul posmičnog naprezanja, G

Za kohezivna tla, težina jediničnog volumena uronjenog uzorka računa se primjenom sljedeće jednadžbe

$$\gamma' = \frac{6,3}{0,37 + W} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2)$$

gdje je γ' izražen u kN/m^3 dok je sadržaj vode, W , u uzorku izražen u postotnoj vrijednosti decimalnim brojem.

Teoretski se proračun prodiranja stopa nogu i provjera stabilnosti platforme rade koristeći laboratorijski određenu otpornost nedreniranog uzorka na posmična naprezanja takozvanim NN (UU) (nekonsolidiranim – nedreniranim) triaksijskim ispitivanjima uzoraka. Pretpostavljeno prodiranje stopa nogu proizlazi iz odnosa konstrukcije i dimenzija stopa nogu, određene veličine predopterećenja i spomenutih geomehaničkih karakteristika morskog dna. Samopodizuća platforma Noble Carl Norberg, konstrukcije Marathon LeTourneau, ima stope nogu promjera 14,0 m, ukupne visine 7,3 m. Dizajnirani teret predopterećenja za svaku nogu iznosi 31,39 MN odnosno 3201 t. Stope su tijekom parcijalnog predopterećenja od 25% prodrle 5 m u morsko dno neposredno prije uzimanja uzoraka što je pri gazu od 2 m odgovaralo maksimalnom opterećenju od 25,28 MN odnosno 2578 t na pramčanu nogu. Prodiranje stopa nogu pri punom predopterećenju određeno je primjenom standardne metode SNAME (SNAME, 1997). Očekivano prodiranje stopa nogu navedene platforme za promatranu lokaciju pri maksimalnom predopterećenju je 5,9 m. Mogućnost propadanja nogu (engl. *punch through*) na promatranj lokaciji okarakterizirana je kao mala.

PRODIRANJE STOPA NOGU U MORSKO DNO

Nakon pozicioniranja pokretne samopodizuće bušaće platforme na lokaciji, neophodno ja da platforma prije početka bušaćih operacija dosegne zadane uvjete stabilnosti i ravnoteže u odnosu na sva opterećenja uslijed

djelovanja radne okoline i radnog procesa. Jedan od uvjeta sigurnog temeljenja platforme na radnoj lokaciji je dostizanje određenog prodiranja stopa nogu u morsko dno. Koristeći prethodno prikazane podatke moguće je izračunati i pretpostaviti prodiranje stopa nogu u morsko dno. Uzevši u obzir geomehanička svojstva morskog dna i konstrukcijske parametre platforme, prodiranje stopa nogu traje sve dok se ne izjednače vrijednosti težine strukture platforme i tereta predopterećenja s reakcijom podloge (jedinичnom nosivosti tla morskog dna). Predopterećenje je sila kojom platforma reakcijom nogu djeluje na morsko dno na koje je poduprta. Ta sila mora biti veća ili jednaka od rezultante najnepovoljnijih mogućih vanjskih sila u odnosu na koje je platforma dimenzionirana (uvjeti olujnog nevremena, opterećenja platforme u uvjetima bušenja i maksimalnih dozvoljenih natega). Predopterećenje platforme ne smije se raditi u lošim vremenskim uvjetima (Noble Drilling, 1999) pri čemu se misli na jak vjetar i velike valove te na zračnosti većoj od 1,5 m. Ukoliko teret predopterećenja odgovara djelovanju najvećeg predviđenog opterećenja uslijed utjecaja radne okoline, smatra se da je dosegnuto maksimalno teoretsko prodiranje. Ukoliko je teret predopterećenja manji od najvećeg mogućeg opterećenja uslijed djelovanja okoline, moguće je je očekivati dodatno prodiranje tijekom rada. Tijekom predopterećenja platforme, osobito u mekom i nekohezivnom morskom dnu, može doći do naglog i nekontroliranog propadanja stopa nogu u morsko dno. Stope nogu modernih samopodizućih platformi dizajnirane su za tzv. plitko temeljenje odnosno konstrukcija stope im je takva da onemogućuje duboku penetraciju. Omjer promjera stope noge i prodiranja u morsko dno iznosi

$$\frac{D_p}{B_n} \leq 2,5 \quad (3)$$

gdje su:

D_p - prodiranje stope noge u morsko dno, m;

B_n - promjer stope noge, m.

PREDOPTEREĆENJE SAMOPODIŽUĆE BUŠAĆE PLATFORME

Predopterećenje je definirano kao sila kojom platforma reakcijom nogu djeluje na morsko dno (slika 5). Glavni zadatak predopterećenja je dodatno učvršćenje stopa nogu prodiranjem u morsko dno što će osigurati stabilnost platforme u ekstremnim uvjetima tijekom boravka i rada na zadanoj lokaciji. Smatra se da je sigurnost temeljenja samopodizuće bušaće platforme osigurana jedino ako je

postupak predopterećenja uspješno izveden i to u apsolutnoj vrijednosti zbroja ukupne težine platforme, promjenljivog tereta i 100%-tnoj (maksimalnoj) vrijednosti opterećenja uslijed ekstremnih uvjeta radne okoline:

$$Q_p \geq P + L + E \quad (N) \quad (4)$$

pritom su:

Q_p - predopterećenje po nozi, N;

P - stalni teret strukture, N;

L - promjenljivi teret na platformi, N;

E - opterećenja uslijed ekstremnih uvjeta radne okoline, N.

Proračunato predopterećenje na tlo morskog dna, simulirajući najveću moguću silu uslijed utjecaja ekstremnih uvjeta radne okoline uvećanu za graničnu vrijednost sigurnosti. Uzevši u razmatranje parcijalnu stabilnost temeljenja, za vrednovanje kvalitete predopterećenja DNV (Det Norske Veritas, 1990) preporuča za proračun najveća dizajnirana opterećenja platforme i najmanji moment stabilnosti uslijed ukopavanja tijekom penetracije stopa nogu u morsko dno.

Najmanje potrebno predopterećenje za svaku nogu dano je jednadžbama:

- za glinovito tlo morskog dna:

$$Q_p = \frac{Q}{1 - \frac{2\sqrt{A_1}}{\pi R_1^2} \times \frac{M_{\min}}{Q}} \quad (N) \quad (5)$$

- za pješčano tlo morskog dna:

$$Q_p = \frac{Q}{\left(1 - \frac{2\sqrt{A_1}}{\pi R_1^2} \times \frac{M_{\min}}{Q}\right)^2} \quad (N) \quad (6)$$

pritom su:

Q_p - najmanje potrebno predopterećenje za svaku nogu, N;

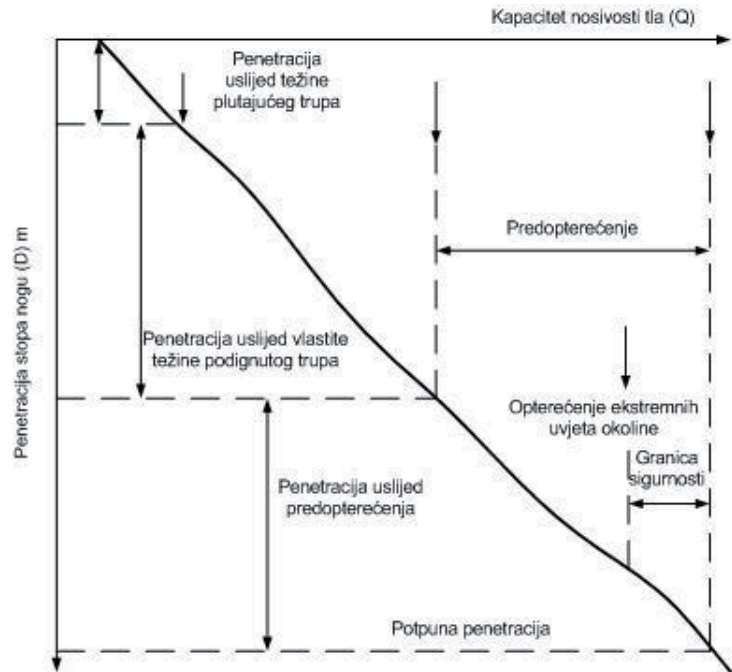
Q - najveće opterećenje po nozi kao funkcija ekstremnih uvjeta radne okoline, N;

M_{\min} - najmanji moment stabilnosti uslijed penetracije, N;

A_1 - kontaktna površina stope noge i tla morskog dna pri parcijalnoj penetraciji, m^2 ;

R_1 - polumjer kružnice kontaktne površine, m.

Primjenjuju se različiti postupci za predopterećenje platforme i svima je svrha smanjenje efekta naglog propadanja nogu u morsko dno.



Slika 5. Predopterećenje samopodizjuće platforme (Zadravec, 2007)

Figure 5 Preload of Jackup's (Zadravec, 2007)

STABILNOST SAMOPODIŽUĆE BUŠAČE PLATFORME TIJEKOM RADA NA LOKACIJI

Vodoravna opterećenja nastala djelovanjem radne okoline uslijed valova, morske struje i vjetrova na dijelove strukture samopodizjuće bušaće platforme, ostvaruju moment s tendencijom prevrtanja strukture. Okomita opterećenja uslijed težine platforme, promjenljivog tereta i opterećenja okoline uslijed snijega i leda, ostvaruju moment stabilnosti u cilju održanja strukture stabilnom. Stabilnost platforme bit će osigurana ukoliko je moment stabilnosti veći od momenta prevrtanja i ukoliko nosivost morskog dna, na kojem je objekt temeljen, nije premašena rezultantom navedenih vodoravnih i okomitih opterećenja. Kompleksna analiza reakcije samopodizjuće platforme na vanjska opterećenja tijekom operacija na lokaciji funkcija je tipa odnosno konstrukcije platforme, mikrolokacijskih uvjeta te analize problema u ekstremnim uvjetima koja uzima u obzir i zamor materijala. Jednostavne analize reakcije samopodizjuće platforme na opterećenja uslijed

utjecaja radne okoline pretpostavljaju statičko ponašanje strukture suprotstavljeno determinističkom djelovanju uz određene korekcije obzirom na nelinearnost odnosa vala, strukture i vrste morskog dna. Prema preporukama DNV, sveobuhvatna analiza reakcije treba uzeti u obzir dinamičko ponašanje strukture te svojstva opterećenja korigirane za različite oblike nelinearnosti.

Nekoliko je principa analize reakcije samopodizjućih platformi. Princip statičke ili dinamičke reakcije, pri čemu gibanje strukture ovisi o veličini opterećenja uslijed inercije, promatra dva osnovna stanja strukture. Ako se zanemari opterećenje uslijed inercije, struktura će biti gotovo nepomična, odnosno brzina strujanja oko nje bit će mala. Ukoliko je pak perioda vala vrlo blizu prirodnoj periodi samopodizjuće platforme, dinamički efekt postaje znatan. Osnovni model samopodizjućih platformi korespondira tijekom operacija na lokaciji prirodnoj periodi gibanja od 4 do 8 sekundi, ovisno o tipu i konstrukciji strukture, što može koincidirati s periodom vala. Najveća prirodna perioda gibanja konvencionalnih

samopodizućih platformi dimenzioniranih za operacije u moru dubine 70 do 90 m je 5 do 6 sekundi. Krutost novijih samopodizućih platformi izgrađenih za operacije u moru dubine 100 do 110 m smanjuje prirodnu periodu gibanja na 6 do 8 sekundi. Jednostavne statičke analize obično su nedovoljne ukoliko prirodna perioda gibanja strukture prelazi 3 sekunde (American Petroleum Institute, 1991).

Princip determinističke ili stohastičke reakcije promatra najznačajnija opterećenja uslijed utjecaja radne okoline kao opterećenja uslijed djelovanja morskih valova. Deterministička metoda podrazumijeva definiranje vala njegovom visinom i periodom dok stohastička odnosno spektralna, neregularnosti stanja morske površine simulira isto nasumce izabranim modelom vala zadanih statističkih i spektralnih karakteristika.

Princip linearne ili nelinearne reakcije uglavnom opisuju nelinearne jednadžbe, kroz integrirana opterećenja strukture, zavisno o visini krijeste vala, teoriji morskih valova korištenoj za proračun, vlačnom koeficijentu iz Morisonove formule ($1/2 \times \rho \times C_D \times A \times V^2$), ponašanju strukture, osobito obzirom na „ $P \times \Delta$ efekt“ (moment induciran pomakom trupa platforme), Eulerovom efektu (kritičnom opterećenju uslijed savijanja u nozi) te ponašanju temelja (interakcija stopa nogu i tla morskog dna) i spojnih dijelova trupa s nogama.

Nadalje, iz principa analize reakcija samopodizućih platformi na opterećenja uslijed utjecaja okoline proizlaze metode analize navedenih reakcija. Mnoga se pojednostavljena analiza temelje na supstituciji statičkih dinamičkim, determinističkih stohastičkim, linearnih nelinearnim. DNV (Det Norske Veritas, 1984) predstavlja šest metoda različitih pristupa analizi reakcije samopodizućih platformi:

- Metoda A (stohastička, nelinearna, dinamička) donosi rješenje jednadžbe dinamičke ravnoteže koja predstavlja vlačnu silu i silu inercije u vremenskoj domeni.

$$F = m \times \frac{d^2u}{dt^2} + c(u) \times \frac{du}{dt} + k(u) \times u \quad (7)$$

U jednadžbi su m - masa, c , k - krutost, pri čemu je opterećenje generirano spektralnom analizom parcijalnog spektra vala korištenjem Monte Carlo simulacijske metode, a efekti vjetera, valova i morske struje simultano su uključeni u proračun.

- Metoda B (deterministička, nelinearna, dinamička) akceptira pretpostavku regularnih morskih valova, pri čemu su im brzina i ubrzanje određeni teorijom

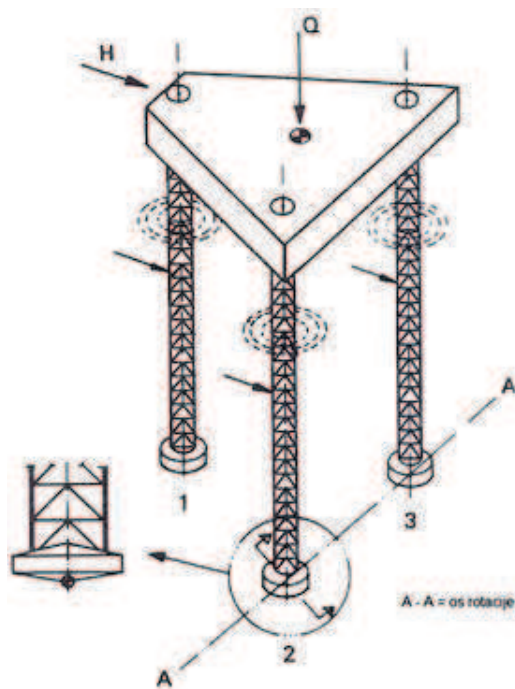
morskih valova, a nelinearna jednadžba ravnoteže rješava se u vremenskoj domeni na isti način kao u metodi A. Metoda je prikladna za analizu reakcije platforme u ekstremnim vremenskim uvjetima, ali ne i u uvjetima zamora materijala.

- Metoda C (stohastička, linearna, dinamička) temelji se na linearnosti jednadžbe ravnoteže i njezino rješavanje u frekventnoj domeni koristeći metodu stohastičke linearne analize. Metoda je prikladna za evaluaciju reakcije platforme uzevši u obzir zamor materijala i neravnomjernost u ponašanju morskih valova.
- Metoda D (deterministička, nelinearna, statička) jednaka je metodi B, ali primjenljiva za vrlo krute strukture. Kako su pak samopodizuće platforme elastične strukture, dinamički efekt je teško zanemariti te je simulacija reakcije korigirana množenjem opterećenja uslijed okoline s dinamičkim faktorom pojačanja (engl. *dynamic amplification factor - DAF*), o čemu će biti više biti rečeno kod proračuna momenta prevrtanja.
- Metoda E (stohastička, linearna, statička) jednaka je metodi C, također primjenljiva za vrlo krute strukture te korigirana za DAF kao i u prethodnoj metodi.
- Metoda F (dinamička, linearna, statička) najjednostavnija je, sličnih izlaznih podataka kao i kod metode B, uzevši u obzir utjecaj nelinearnosti na dinamička ponašanja strukture.

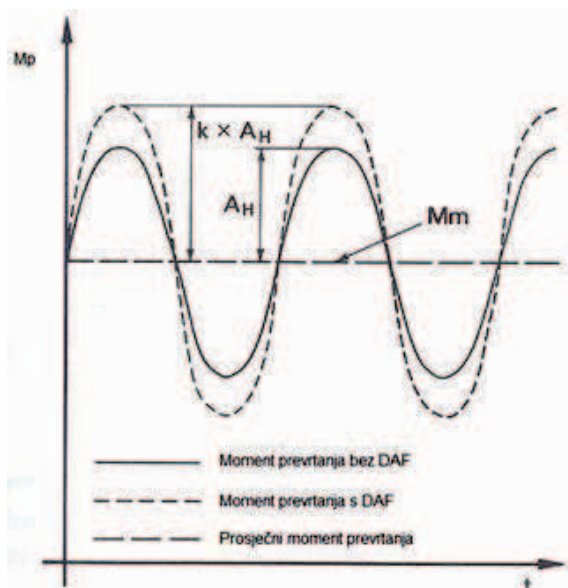
Iz navedenog je vidljivo kako postavljanje samopodizuće platforme na željenoj lokaciji zahtijeva niz sigurnosnih provjera u cilju izbjegavanja potencijalnih neželjenih situacija. Evidentno je kako do prevrtanja platforme može doći uslijed neravnoteže kada moment prevrtanja premaši moment stabilnosti. Nadalje do prevrtanja može doći i uslijed naglog propadanja nogu u morsko dno kao posljedica resultantnog djelovanja dvaju spomenutih momenata, uz prekoračenje nosivosti morskog tla. Do prevrtanja može doći i uslijed proklizavanja pramčane noge radi premale inicijalne penetracije u morsko dno ili uslijed oštećenja kritičnog dijela strukture na spoju trupa i noge platforme. Zbog svega navedenog opisanim metodama analize reakcije platforme na vanjska opterećenja potrebno je analizirati i izračunati momente prevrtanja i sigurnosti te, za svaku novu lokaciju, provesti sigurnosne provjere geomehaničkih parametara morskog dna u cilju izbjegavanja naglog propadanja nogu i narušavanja temeljne stabilnosti objekta. U slučaju malog prodiranja nakon predopterećenja potrebno je provesti sigurnosne provjere protiv proklizavanja, vrednovanje stabilnosti temeljenja stopa nogu pojednostavljenom metodom ili metodom konačnih elemenata te ustanoviti vrijednosti ispiranja zone uokolo penetrirane stope noge.

MOMENT PREVRTANJAI MOMENT STABILNOSTI SAMOPODIŽUĆE PLATFORME

Veličina momenta prevrtanja platforme, kao indikatora stabilnosti samopodizjuće bušaće platforme u poduprtom položaju, ovisi o fleksibilnosti strukture na djelovanje najnepovoljnijih uvjeta stanja mora koja se predviđaju za određenu lokaciju, odnosno za najveća očekivana vodoravna opterećenja. Analiza uključuje određivanje periode vala u odnosu na prirodnu periodu gibanja strukture, smjer djelovanja sile valova na strukturu te najveću visinu vala. Nadalje, kod razmatranja smjera djelovanja najvećeg vodoravnog opterećenja na platformu, pri kojem se i generira najveći moment prevrtanja, potrebno je odrediti os rotacije momenata prevrtanja i stabilnosti. Za samopodizjuće platforme s neovisnim nogama pretpostavljena os rotacije je vodoravna os koja spaja dvije noge u području penetracija stopa nogu u morsko dno i prolazi područjem između centra i obodnog dijela stopa nogu (slika 6).



Slika 6. Os rotacije momenta prevrtanja (LeTirant, 1993)
 Figure 6 Axis of rotation of overturning moment (LeTirant, 1993)



Slika 7. Moment prevrtanja (LeTirant, 1993)
 Figure 7 Overturning moment (LeTirant, 1993)

Postupak izračunavanja momenta prevrtanja obzirom na os rotacije pretpostavlja da sile valova, vjetra i morske struje djeluju u istom smjeru te im je rezultanta najveća vodoravna sila koja djeluje na strukturu platforme. Kako spomenuti proračun ne uzima samo statičke uvjete potrebno je uzeti u obzir i efekt dinamičkog pojačanja DAF koji je posljedica zajedničkog djelovanja morske struje i valova, te „ $P \times \Delta$ efekt“ kao posljedicu deformacije strukture platforme (slika 7). Uzevši u obzir navedene faktore, moment prevrtanja izražen je jednadžbom:

$$M_p = M_m + k \times A_H \quad (\text{Nm}) \quad (8)$$

pri čemu su:

M_p - ukupni moment prevrtanja, Nm;

M_m - prosječna vrijednost momenta u vremenu trajanja jednog ciklusa vala, Nm;

A_H - amplituda momenta uslijed zajedničkog djelovanja morske struje i vala, MNm;

k - dinamički faktor pojačanja (DAF).

Faktor dinamičkog pojačanja DAF predstavljen je jednadžbom

$$k = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_0}{T}\right)^2\right]^2 + \left(2C \frac{T_0}{T}\right)^2}} \quad (9)$$

Pri tome su:

T_0 - prirodna perioda gibanja strukture platforme, s;

T - perioda vala, s;

C - prigušenje, -.

Proračun momenta stabilnosti u obzir uzima stvarne vrijednosti promjenljivog tereta na platformi, smanjenje težine uronjenih dijelova strukture uslijed uzgona te smanjenje momenta uslijed deformacije strukture u području spoja nogu s trupom platforme. Moment stabilnosti izražen je jednadžbom (Carlsen, 1986)

$$M_S = M_{S0} - \frac{nP \times (e_0 + e)}{1 - \frac{P}{P_E}} \quad (\text{Nm}) \quad (10)$$

gdje su:

M_S - moment stabilnosti, Nm;

M_{S0} - moment stabilnosti uz pretpostavku da je struktura platforme kruta, Nm;

n - broj nogu platforme;

e_0 - ukupni vodoravni statički pomak samopodizujuće platforme uslijed elastičnosti, m;

e - vodoravni pomak samopodizujuće platforme uslijed

$P \times \Delta$ efekta, m;

P - prosječno osno naprezanje u nozi, N;

P_E - kritično Eulerovo naprezanje u nozi, N.

Važno je napomenuti da je pomak uslijed $P \times \Delta$ efekta u razini trupa platforme oko 1 m dok je ukupni vodoravni statički pomak izražen jednadžbom:

$$e_0 = e_1 + e_2 + e_3 \quad (11)$$

gdje su:

e_1 - neravnina konstrukcije noge (20 – 30 mm), m;

e_2 - pomak u vodilici na spoju s trupom (50 mm), m;

e_3 - naginjanje uslijed slijeganja tla ispod stopa nogu (objektivno, vrlo teško određiva veličina), m.

PRORAČUN FAKTORA SIGURNOSTI PROTIV PREVRTANJA

Sigurnosni faktor protiv prevrtanja, S_r , definiran je kao odnos momenta stabilnosti i momenta prevrtanja.

$$S_r = \frac{M_s}{M_p} \quad (12)$$

Preporučeni faktor sigurnosti varira, ovisno o certifikacijskoj organizaciji koja ga propisuje, i to:

- prema DNV(1990) $S_r = 1,25$, s osi rotacije pozicioniranom kroz dvije najopterećenije stope nogu i to u području između središta i oboda stope;
- prema Bureau Veritas (1987) $S_r = 1,25$, s osi rotacije pozicioniranom kroz središte dviju krmenih stopa nogu;
- prema ABS (1985) zahtijeva se $S_r > 1$, uz minimalnu penetraciju stopa nogu od 3 m u morsko dno;
- Lloyd's (1986) zahtijeva $S_r > 1$, bez dodatnih zahtjeva.

Proračun faktora sigurnosti za samopodizujuću bušaću platformu Noble Carl Norberg konstrukcije Marathon LeTourneau 82 temelji se na najmanjoj i najvećoj potrebnoj reakciji uporišta nogu uslijed težine trupa, promjenljivog tereta i tereta predopterećenja te na konstrukcijskoj udaljenosti između prednje i zadnjih nogu, kroz koje prolazi os rotacije.

- Najmanja dozvoljena reakcija za predopterećenje 30,96 MN (3158,50 t) (Noble Drilling, 1999).
- Najveća dozvoljena reakcija za predopterećenje 31,40 MN (3200,00 t) (Noble Drilling, 1999).

Ulazni podaci za proračun uzeti su iz uputa za premještaj samopodizujuće bušaće platforme Noble Carl Norberg (Noble Drilling, 1999):

Reakcije uporišta nogu u području samopodizujućeg sustava:

- krmene noge, 32 MN svaka;
- pramčana noga, 30 MN;
- težina svake pojedine noge, 5,2 MN;
- prirodna perioda platforme, 5 s;
- površina poprečnog presjeka elementa noge, 0,3 m²;
- inercija svake noge, 6 m⁴;
- ekvivalentni Yangov modul elastičnosti nogu, 160 000 MPa;
- raspoloživa duljina nogu ispod pontona, 96 m;
- longitudinalna udaljenost između pramčane noge i osi rotacije, 34,15 m;
- perioda vala u ekstremnim vremenskim uvjetima, 14 s.

Odnos zadanih uvjeta uporabom metoda za izračunavanje „ $P \times \Delta$ efekta“, momenata prevrtanja uslijed vjetrova, utjecaja morske struje i valova dovodi do sljedećih rezultata:

- pomak platforme u području trupa: 1,1 m;
- moment prevrtanja uslijed vjetra 240 MNm;
- moment prevrtanja uslijed utjecaja valova i morske struje varira u rasponu od -100 do 650 MNm.

- a. Proračun momenta stabilnosti pretpostavlja krutost strukture i umnožak je reakcije uporišta pramčane noge i longitudinalne udaljenosti između te noge i osi rotacije, koja prolazi stopama krmenih nogu:

$$M_{S0} = (31 + 5,2) \times 34,15 = 1236,2 \text{ MNm}$$

- Prosječno opterećenje po nozi u području trupa iznosi:

$$\frac{32 + 32 + 30}{3} = 31,3 \text{ MN}$$

- Prosječno opterećenje po nozi u području stopa nogu:
 $31,3 + 5,2 = 36,5 \text{ MN}$
- Prosječno opterećenje je srednja vrijednost dvaju prethodnih: 33,9 MN

- b. Proračun kritičnog Eulerovog opterećenja računanjem sljedećih komponenti:

- radijus rotacije noge (engl. *gyration radius*):

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{S}} = \sqrt{\frac{6}{0,3}} = 4,47 \text{ m}$$

- koeficijent nedostatnosti noge uslijed duljine i radijusa rotacije:

$$\lambda = \frac{2 \times 1}{\rho} = \frac{2 \times 96}{4,47} = 42,95$$

- kritično Eulerovo posmično naprezanje: MPa

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \times 160000}{42,95^2} = 856$$

Kritično Eulerovo opterećenje:

$$P_E = 0,3 \text{ m}^2 \times 856 = 256,8 \text{ MN}$$

- c. Smanjenje momenta stabilnosti uslijed pomaka trupa platforme (1,1 m) („ $P \times \Delta$ efekt“) i rizika od savijanja nogu donosi ukupni moment stabilnosti:

$$\frac{n \times P \times \Delta}{1 - \frac{P}{P_E}} = \frac{3 \times 33,9 \times 1,1}{1 - \frac{33,9}{256,8}} = \frac{111,87}{0,868} = 128,88 \text{ MNm}$$

$$M_S = 1236,2 - 128,88 = 1107,32 \text{ MNm}$$

- d. Proračun momenta prevrtanja:

- faktor dinamičkog pojačanja DAF:

$$k = \frac{1}{1 - \left(\frac{T_0}{T}\right)^2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{5}{14}\right)^2} = \frac{1}{0,872} = 1,15$$

- srednja vrijednost momenta uslijed utjecaja valova i morske struje:

$$\frac{600 - 100}{2} = 250 \text{ MNm}$$

- amplituda momenta uslijed valova i morske struje:

$$A_H = \frac{600 + 100}{2} = 350 \text{ MNm}$$

- ukupni moment prevrtanja suma je momenta prevrtanja uslijed utjecaja vjetra, momenta uslijed utjecaja valova i morske struje te amplitude momenta uslijed utjecaja valova i morske struje uvećanog za DAF:

$$M_P = 240 + 250 + (350 \times 1,15) = 892,5 \text{ MNm}$$

- e. proračun faktora sigurnosti:

$$S_r = \frac{M_s}{M_p} = \frac{1107,32}{892,5} = 1,24$$

Vidljivo je da dobivena vrijednost faktora sigurnosti protiv prevrtanja ima graničnu vrijednost zadovoljenja uvjeta stabilnosti te su time ujedno i definirani granični operativni uvjeti za zadani tip platforme, ovisno o konstrukciji i mogućnosti izvođenja operacija u ekstremno zadanim uvjetima radne okoline.

SIGURNOST SAMOPODIŽUĆE BUŠAĆE PLATFORME PROTIV PROKLIZAVANJA

Do proklizavanja stopa nogu samopodizućih bušaćih platformi s neovisnim nogama na određenoj lokaciji može doći uslijed kombinacije najnepovoljnijih uvjeta vodoravnih opterećenja i neostvarene proračunate vrijednosti predopterećenja. Osobito se potencijalni rizik odnosi na pramčanu nogu uslijed malih penetracija u tvrdo glinovito tlo morskog dna ili uslijed ispiranja tla uokolo stope noge u pješčanom morskom dnu. Ovisno o vrsti tla, certifikacijske organizacije preporučuju dolje navedene sigurnosne faktore i to:

- za pješčano morsko dno $S_{rp} = 1,3$;
- za glinovito morsko dno $S_{rp} = 1,4$ do 1,5.

Kriterij stabilnosti samopodizućih bušaćih platformi poduprtih o pješčano morsko dno prikazan je jednadžbom (Schotman, 1990).

$$\gamma_E E_H \leq \frac{\tan \delta}{S_{rp}} (\gamma_P P + \gamma_L L + \gamma_E E_V) \quad (13)$$

Pritom su:

P, L, E_V - trajno, promjenljivo i okomito opterećenje uslijed ekstremnih uvjeta radne okoline, N;

E_H - vodoravno opterećenje uslijed ekstremnih uvjeta radne okoline, N;

$\gamma_P, \gamma_L, \gamma_E$ - pripadajući koeficijenti opterećenja;

δ - unutarnji kut trenja pijeska, °.

S_{rp} - sigurnosni faktor protiv proklizavanja, -.

Uslijed ostvarenja pasivne otpornosti tla oko ukopanih dijelova stope noge jednadžba za sigurnosni faktor protiv proklizavanja poprima oblik:

$$\frac{Q \tan \delta + F_P}{H} \geq S_{rp} \quad (14)$$

gdje su:

Q - okomito odnosno uzdužno naprezanje stope noge, N;

$H = E_H$ - vodoravno odnosno poprečno naprezanja stope noge uslijed ekstremnih uvjeta radne okoline; N;

F_P - pasivna otpornost tla uslijed djelovanja stope noge, Pa.

$$F_P = K_P \times \sigma_v' \times S_P \quad (15)$$

pri čemu su:

$K_P = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right)$ koeficijent tlaka tla morskog dna uslijed penetracije stope noge;

σ_v' - prosječni tlak frakturiranja tla ispod stope noge, Nm^2 ;

S_P - kontaktna površina tlaka (određena je oblikom stope noge), m^2 ;

ϕ' - unutarnji kut trenja pijeska, °.

Ukoliko se pasivna otpornost tla zanemari, a budući da stožasta (konična) konstrukcija stope noge s vodoravnom ravninom tla morskog dna zatvara kut θ , jednadžba faktora sigurnosti protiv proklizavanja poprima oblik:

$$\frac{Q \tan(\theta + \delta)}{H} \geq S_{rp} \quad (16)$$

Konstruktivski kut θ u praksi dostiže 15° dok je za δ konsolidirane pijeske 30° . Kako je zahtjev stabilnosti protiv proklizavanja da je $H < Q$ te, uz pretpostavku da je $S_{rp} = 1,3$, sigurnosni uvjet stabilnosti bit će ostvaren u uvjetima koje definira slijedeća jednadžba:

$$\frac{H}{Q} < 1.3 \quad (17)$$

Uzevši u obzir konstrukciju i dimenzije stopa nogu, ukupnu težinu platforme u operativnim uvjetima, proračunato predopterećenje, geomehanička svojstva pješčanog tla morskog dna te pretpostavljeni sigurnosni faktor protiv proklizavanja, koristeći narednu jednadžbu može se izračunati najveće dopušteno vodoravno opterećenje na pojedinu stopu noge pri kojem neće doći do proklizavanja.

$$H \leq \frac{Q \tan \delta + K_P \sigma_v' S_P}{S_{rp}} \quad (18)$$

Kriterij stabilnosti samopodizućih bušaćih platformi poduprtih o tvrdo glineno morsko dno prikazan je jednadžbom (Schotman, 1990) :

$$\frac{C_u A_n + F_P}{H} \geq S_{rp} \quad (19)$$

gdje su:

A_n - noseća površina stope noge, m^2 ;

C_u - nedrenirana otpornost gline na posmična naprezanja, Pa;

F_P - pasivna otpornost tla uslijed djelovanja stope noge, Pa;

H - vodoravno opterećenje u području stopa nogu, N.

ZAKLJUČAK

Prikazom interakcije odnosno funkcijske ovisnosti stabilnosti samopodizuće bušaće platforme o geomehaničkim svojstvima, vrsti tla morskog dna te odnosu okomitih i vodoravnih opterećenja, definirana su najveća dozvoljena opterećenja uslijed djelovanja radne okoline za pojedini konstrukcijski tip platforme. Evidentno je kako se samo pravilnim proračunom tereta predopterećenja i u ovisnosti o geomehaničkim

svojstvima tla morskog dna, prodiranjem stopa nogu u morsko dno, osigurava uravnoteženje sila uslijed djelovanja radne okoline te pravilno temeljenje platforme na zadanoj lokaciji. Navedeni proračuni predviđene dubine prodiranja stopa nogu u morsko dno u području sjevernog dijela Jadranskog mora te momenta stabilnosti, prikazani su na primjeru samopodižuće bušaće platforme Noble Carl Norberg koja je uspješno izvodila rudarske radove za operatorsko trgovačko društvo INAgip d.o.o. na eksploatacijskom polju ugljikovodika Sjeverni Jadran. Prikazani su originalni podaci prikupljeni tijekom uzimanja plitke jezgre u cilju određivanja litološkog sastava i geomehaničkih svojstava tla morskog dna u području sjevernog Jadrana, dok su izračunom momenta stabilnosti protiv prevrtanja definirana najveća dozvoljena vodoravna naprezanja za navedeni tip samopodižuće bušaće platforme.

Accepted: 30.10.2008.
Received: 15.09.2008.

LITERATURA

- Le Tirant i P., Perol, C. (1993): *Stability and Operations of Jackups*. Editions Technip, 315 pp, Paris.
- Izabela 2 Well Site Survey : Final Report (2006).
- SNAME : Recommended Practice for Site Specific Assessment of Mobile Jack-up Units : Technical and Research Buletin (1997).
- Noble Drilling (1999): Noble Carl Norberg Rig Move Procedure.
- Det Norske Veritas (1984): Rules for Classification of Mobile Offshore Units.
- Det Norske Veritas (1990): Rules for Classification of Mobile Offshore Units.
- Zdravec, D. (2007): Poboljšanje operativnih svojstava samopodižućih bušaćih platformi, Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 149 pp, Zagreb.
- American Petroleum Institute (1991): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms.
- Carlsen, C. A., Kjeoy, H., Eriksson, K. (1986): Structural Behavior of Harsh Environment Jack-ups. In: *The Jack-Up Drilling Platform*. Collins, 90-136 pp, London.
- Schotman, G. J. M., Efthymiou, M. (1990): Aspects of the Stability of Jackup Spud-Can Foundations. In: *Jack-Up Drilling Platform*. Elsevier, 245-269 pp, London.
- <http://www.bbengr.com> (20.8.2008)