

Tin Matulja, dipl. ing.
Dr. sc. Tomislav Mrakovčić
Dr. sc. Nikša Fafandjel
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
Vukovarska 58
51000 Rijeka

Stručni članak
UDK: 629.5.015.1
629.525
656.61.08
Primljeno: 15. ožujka 2007.
Prihvaćeno: 26. ožujka 2007.

ANALIZA UTJECAJA NAGIBNIH BALASTNIH KOBILICA NA SIGURNOST POSADE SA STAJALIŠTA HIDROSTIČKIH ZNAČAJKI

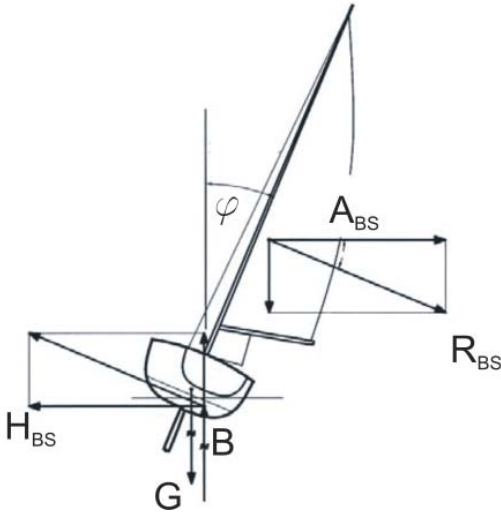
Trendovi gradnje jedrilica usmjereni su ka izboru sve većih dimenzija istih, korištenju naprednih tehnologija izrade i ugradnji inovativnih brodskih sistema kao što je sistem nagibne balastne kobilice. Prema svojim karakteristikama ovakve jedrilice svrstavaju se u kategoriju 'maxi' jedrilica visokih performansi, a budući njihova dužina preko svega redovito prelazi 24 metra te dostiže i do 45 metara, ovakve jedrilice zahtjevaju profesionalnu posadu, tj. školovane pomorce. Stoga je cilj ovog istraživanja, kao dijela autorovog cjelokupnog projekta jedrilice, upravo definirati posljedice uslijed interakcije upravljanja posade sistemom nagibne balastne kobilice što bitno utječe na hidrostatičke značajke jedrilice u pozitivnom, ali i u negativnom smislu, a samim time na njihovu sigurnost. Izvršena je analiza utjecaja nagibne kobilice na hidrostatičke značajke velike jedrilice. Nadalje, autori su definirali kritične nagibe jedrilice pri kojima može biti ugrožena sigurnost posade te su odredili područja na plohi poluga statičkog stabiliteta kada ona nastupaju, ovisno o nagibu jedrilice i otklonu kobilice. Analiza je izvršena na autorovom projektu 'maxi' jedrilice visokih performansi, dužine preko 30 metara, koja posjeduje nagibnu balastnu kobilicu s maksimalnim bočnim otklonom od $\pm 40^\circ$.

Ključne riječi: *nagibna balastna kobilica, hidrostatičke značajke, 'maxi' jedrilica visokih performansi, sigurnost posade*

1. UVOD

Svrha kobilice je da kod napredovanja jedrilice generira komponentu hidrodinamičke sile uzgona na svojoj površini kojom se suprostavlja bočnoj komponenti sile vjetera na jedrima, te na taj način omogućuje, uz pomoć kormila, gibanje jedrilice u željenom smjeru, te da svojom težinom osigura potreban stabilitet kako ne bi

došlo do njenog prevrtanja . Slika 1. prikazuje relevantne sile koje djeluju na jedrilicu dok jedri.



Gdje je:

φ - kut bočnog nagiba jedrilice

G - težina jedrilice

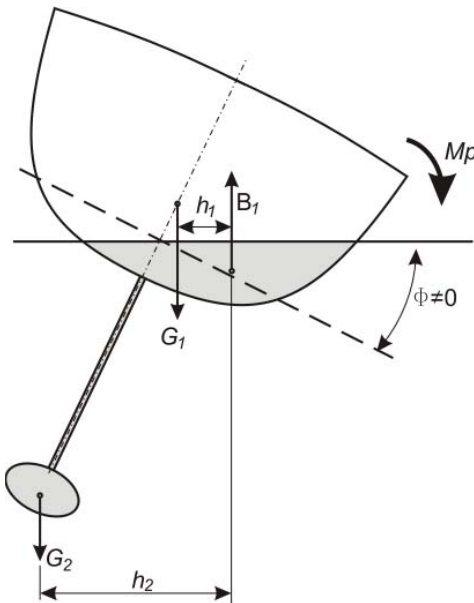
B - uzgon jedrilice

A_{BS} - aerodinamička bočna sila

R_{BS} - rezultirajuća bočna sila

H_{BS} - hidrodinamička bočna sila

Slika 1. Sile na jedrilicu, [2, str. 57]



Gdje je:

M_p - prekretni moment, Nm

G_1 - ukupna težina jedrilice, bez balasta kobilice, N

G_2 - težina balasta fiksne kobilice, N

h_p, h_2 - poluge statičkog stabiliteta, m

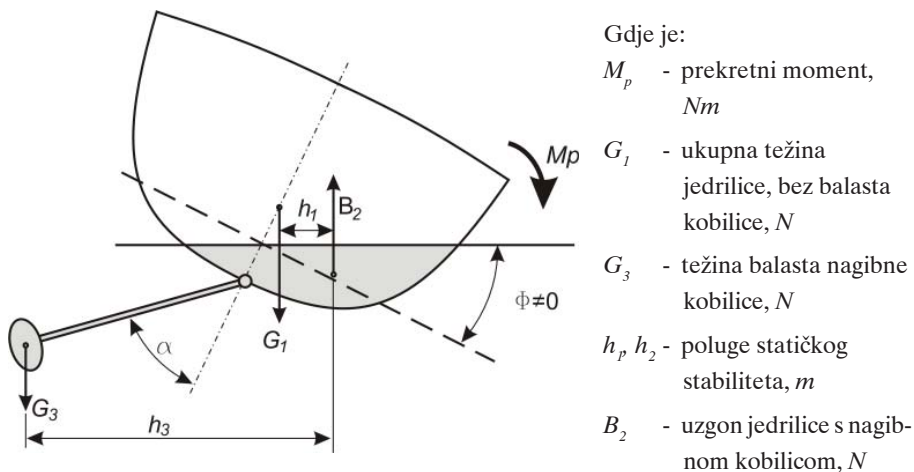
B_1 - uzgon jedrilice s fiksnom kobilicom, N

Slika 2. Hidrostatičke sile i momenti kod jedrilice s fiksnom kobilicom

Prekretni moment - M_p , uzrokovan aerodinamičkom bočnom silom - A_{BS} , uravnotežuje se momentom uzrokovanim od sile uzgona i mase jedrilice do kojeg dolazi kod nagnjanja - M_{ST} . Stabilitet se može podijeliti na statički i dinamički stabilitet [1, str.1], ali i na stabilitet forme i stabilitet težina. Kod jedrilice dominira stabilitet težina upravo zbog težine balasta u kobilici koji čini oko 50% ukupne težine jedrilice, a koji dolazi do izražaja kada se jedrilica nagnje, čime se stvara krak (poluga) između težišta kobilice i težišta istisnine, a time i prekretni moment, odnosno stabilitet zbog kobilice, (Slika 2.).

2. NAGIBNE BALASTNE KOBILICE – OPĆENITO

Upotreba nagibnih kobilica bitno je unaprijedila performance jedrilica jer osigurava veći krak - h_3 , odnosno polugu statičkog stabiliteta pri istom nagibu jedrilice - Φ , što omogućuje postizanje jednakog momenta statičkog stabiliteta uz manju težinu balasta u kobilici - G_3 , (Slika 3.). Smanjenjem težine balasta jedrilice smanjuje se njena ukupna istisnina, te oplakivana površina, odnosno otpor.



Slika 3. Hidrostatičke sile i momenti kod jedrilice s nagibnom kobilicom

Uslijed djelovanja vjeta, rezultirajuća sila u jedrima koja djeluje u središtu pritiska na jedra, generira prekretni moment M_p koji nagnje jedrilicu. Ovaj moment izjednačava moment statičkog stabiliteta nagnute jedrilice - M_{st} . Vrijeđe sljedeće jednakosti, iz slike 2:

$$B_1 = G_1 + G_2, \quad (1)$$

$$M_{st} = G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_2, \quad (2)$$

i iz slike 3:

$$B_2 = G_1 + G_3, \quad (3)$$

$$M_{st} = G_1 \cdot h_1 + G_3 \cdot h_3, \quad (4)$$

nadalje vrijedi:

$$G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_2 = G_1 \cdot h_1 + G_3 \cdot h_3, \quad (5)$$

$$G_2 \cdot h_2 = G_3 \cdot h_3, \quad (6)$$

a budući je h_3 veći od h_2 , proizlazi da je G_3 manji od G_2 , odnosno:

$$B_1 = G_1 + G_2 \neq B_2 = G_1 + G_3. \quad (7)$$

Gdje je:

M_{st} - moment statičkog stabiliteta, Nm

G_1 - ukupna težina jedrilice, bez balasta kobilice, N

G_2 - težina balasta fiksne kobilice, N

G_3 - težina balasta nagibne kobilice, N

h_1 - h_2 - poluge statičkog stabiliteta, m

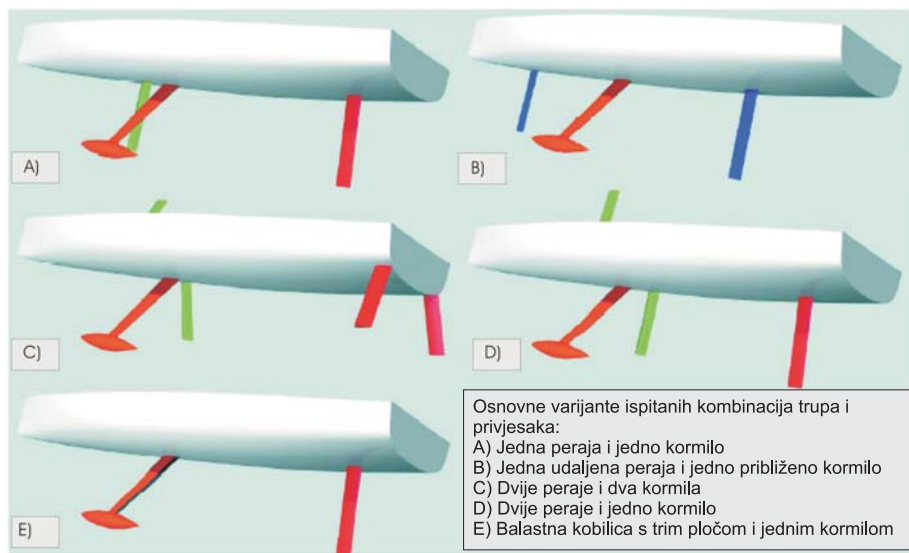
B_1 - uzgon jedrilice s fiksnom kobilicom, N

B_2 - uzgon jedrilice s nagibnom kobilicom, N .

Iz prikazane ravnoteže sila i momenata dokazan je doprinos nagibnih kobilica u smanjenju ukupne mase jedrilice. Prvi ovakvi sistemi eksperimentalno su se počeli ugrađivati na jedrilice prije desetak godina. Tada je krenuo razvoj istih uglavnom na principu pokušaja i pogreške u cilju uštede u masi konstrukcijske izvedbe, zatim pouzdanosti i održavanju. Nagibne balastne kobilice primjenjivale su se uglavnom kod prototipnih regatnih tzv. *maxi* jedrilica, dok je danas sve veća primjena ovakvih kobilica i kod modernih manjih tzv. *fast-cruiser* jedrilica u serijskoj proizvodnji. Primjena nagibnih kobilica utječe na tehnološki razvoj *offshore* jedrilica na način kakav nije zabilježen od prelaska na kompozitne materijale gradnje od kojeg je prošlo više od 25 godina, [3, str. 38]. Poboljšavanje performansi jedrilica korištenjem nagibnih balastnih kobilica je značajno i očito je da će se razvoj ovakvih sistema unapređivati sukladno novim iskustvima i tehničkim dostignućima.

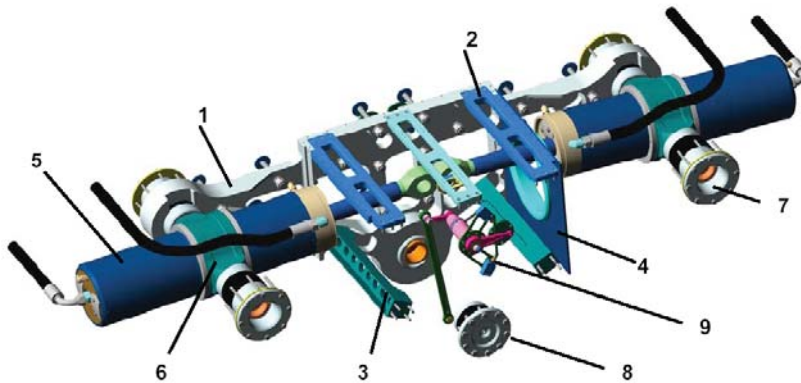
Fizika učinka nagibne kobilice je jednostavna. Što je nagibni kut balastne kobilice veći to je veći i moment statičkog stabiliteta, (Slika 3.). Međutim, povećavanjem nagiba balastne kobilice smanjuje se njena bočna projicirana povr-

šina potrebna za stvaranje bočne komponente hidrodinamičkog uzgona. Izgubljeni hidrodinamički uzgon mora se kompenzirati ugradnjom dodatnih privjesaka (peraja, jedna ili dvije) na određenim pozicijama u blizini nagibne balastne kobilice, (Slika 4.).



Slika 4. Osnovne varijante ispitanih kombinacija trupa i privjesaka koje se uspješno primjenjuju, [3, str. 40]

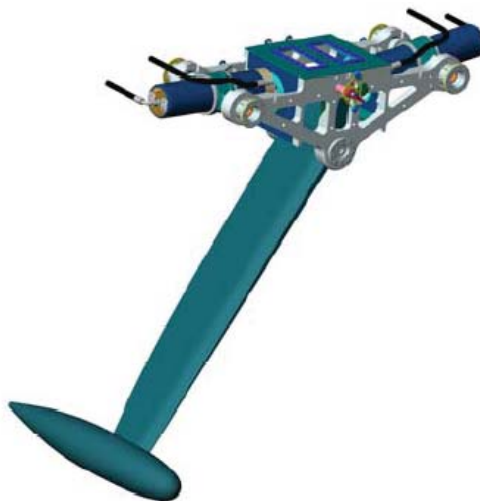
Sustav za naganjanje kobilice može biti mehanički ili hidraulički. Osnovni dijelovi hidrauličkog sustava za naganjanje prikazani su na slici 5.



Slika 5. Hidraulički sustav za naginjanje nagibne kobilice s dva dvoradna hidraulička cilindra, [3, str. 34]

Gdje je:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. Okvir, baza HD sistema, "dvostruki A" | 5. Cilindar |
| 2. Gornji uzdužni nosač sistema | 6. Zglobni spoj cilindra i okvira |
| 3. Donji uzdužni nosač sistema | 7. Samopodesivi ležaj kobilice |
| 4. Vodonepropusna "kutija" | 8. Ležaj cilindra |
| | 9. Sistem za upravljanje u nuždi |



Slika 6. Prikaz kompletnog sistema nagibne kobilice s dva dvoradna hidraulička cilindra, [4, str. 33]

Struktura sistema, okvir, nagibne kobilice mora biti projektiran na način da absorbira svo opterećenje uzrokovano cilindrima, dok mora prenijeti na trup samo moment izravnavanja (stabilitet) preko ležajeva (pozicije 7 i 8, slika 5.).

Nužno se ugrađuju uzdužni nosači (poz. 2 i 3, slika 5.) primarno za sprečavanje kolapsa strukture u slučaju nasukavanja jedrilice. Ležajevi peraje kobilice su samopodesivi (poz. 8, slika 5.), odnosno izvedeni su na način da absorbiraju minimalne moguće pomake peraje kobilice u jedrenju. Cijev cilindra obično se izrađuje od aluminijske legure 7075 (Ergal), Titana 6Al4V ili nehrđajućeg čelika 17-4-PH; dok se osovina i završeci izrađuju od spomenutog nehrđajućeg čelika ili titana, te od Nitronic 50SS.

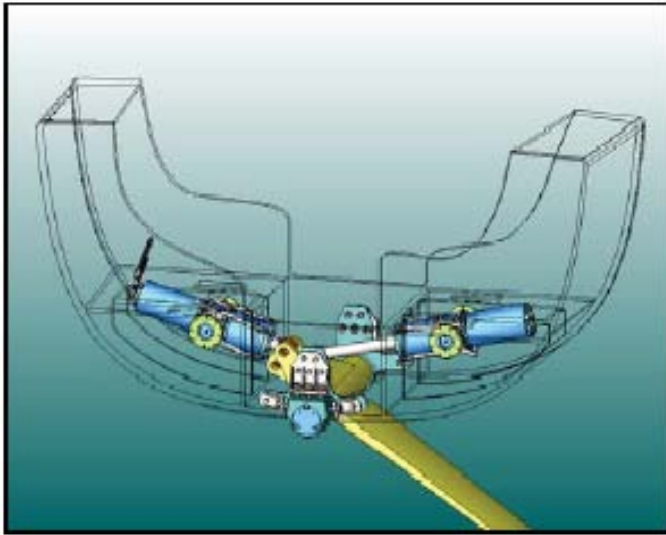
Sistem je vodonepropustan, centralni dio gdje je smješten vrh peraje kobilice (poluga) je uronjen u zatvorenoj vodonepropusnoj kutiji, dok su cilindri na suhom izvan nje (poz. 4, slika 5). Na gornjoj strani «kutije» nalazi se prozirni poklopac za inspekciju i održavanje.

Jedan kompletan sistem nagibne balastne kobilice s hidrauličkim sustavom za naginjanje prikazan je na slici 6, dok je njen smještaj unutar strukture trupa prikazan na slici 7.

Ovakvi sistemi moraju imati uređaj za fiksiranje kobilice u nultom položaju u slučaju bilo kakve havarije na upravljačkom sustavu. Mora se moći izvršiti ručno prekretanje u slučaju zakazivanja pogona hidraulike.

Nadalje, ovakvi sistemi nisu novost samo za projektante već i za pomorce koji se njima moraju koristiti i razumjeti niz bitnih karakteristika i način na koji oni utječu na brzinu, stabilitet i sigurnost jedrilice, odnosno posade. Primjerice pokazalo se je da se i profesionalnim posadama događaju nekontrolirani manevri, zbog udara vjetera ili vala, ili pak kod izbjegavanja sudara na moru, koji uzrokuju situacije da se nagibna kobilica nađe na zavjetrinskoj strani i započne djelovati zajedno s vjetrom u nagibanju jedrilice. U ovakvim situacijama nagib jedrilice može se kretati i oko 70° - 100° koji može uzrokovati ozljede posade uslijed pada ili čak njihov gubitak u moru. Na slici 8. prikazana je 30-meterska *maxi* jedrilica visokih performansi nakon manevra u kojemu nije izvršeno pravovremeno prekretanje nagibne kobilice, te je ista započela djelovati u suprotnom smjeru zajedno s umjerenim vjetrom i uzrokovala nagib kritičan za sigurnost posade. Logično je da bi situacija bila još kritičnija kod jačeg vjetera i izraženijeg stanja mora.

Cilj ovog istraživanja, kao dijela autorovog cjelokupnog projekta jedrilice, je definirati već spomenute moguće posljedice uslijed interakcije upravljanja posade sistemom nagibne balasne kobilice što bitno utječe na hidrostatičke značajke jedrilice u pozitivnom, ali i u negativnom smislu, a samim time na njihovu sigurnost. U ovome je radu izvršena analiza utjecaja nagibne kobilice na hidrostatičke značajke velike jedrilice. Nadalje, autori su definirali kritične nagibe jedrilice pri kojima može biti ugrožena sigurnost posade te su odredili područja na plohi poluga statičkog stabiliteta kada ona nastupaju, ovisno o nagibu jedrilice i otklonu kobilice. Analiza je izvršena na autorovom projektu 'maxi' jedrilice visokih performansi, dužine preko 30 metara, koja posjeduje nagibnu balastnu kobilicu s maksimalnim bočnim otklonom od $\pm 40^\circ$ (Slika 9.).



Slika 7. Prikaz smještaja hidrauličkog sustava za naganjanje nagibne kobilice, [4, str. 38]



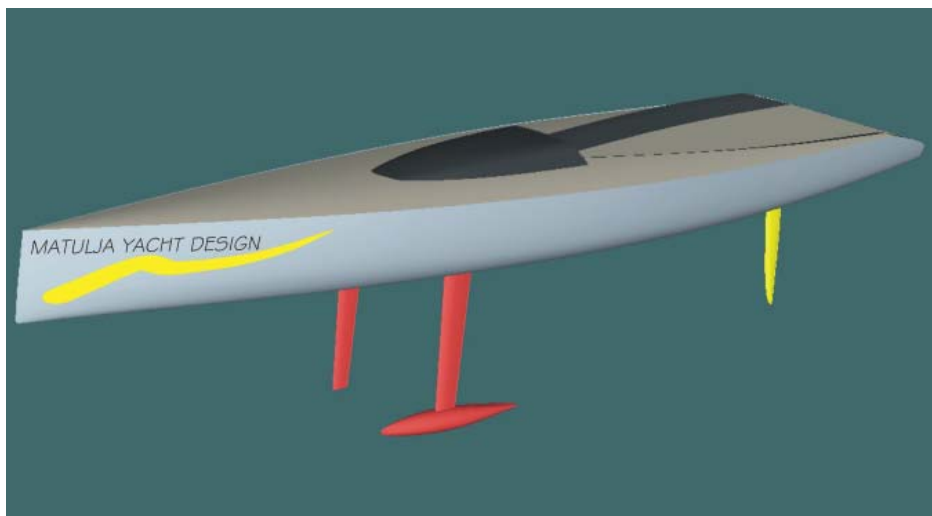
Slika 8. Nagib maxi jedrilice uzrokovan djelovanjem nagibne kobilice na zavjetrinskoj strani, [5, str. 36]

Bilo da se radi o jedrilicama s nagibnim kobilicama ili onima s konvencionalnim kobilicama, povećavanje performansi zbog uravnoteženosti jedrilice obrnuto je proporcionalno razini sigurnosti i stabilitetu što predstavlja jednu od kritičnih problematika koje projektanti i klasifikacijske ustanove te i organizatori zahtjevnih natjecanja moraju uzeti u razmatranje.

Postoji niz propisa kojima se definiraju minimalni zahtjevi za stabilitet jedrilica s fiksnom kobilicom, kao što su ISAF-Offshore Special Regulations, ISO-12217-2 Stability Standards, MCA Code (UK) itd. Iako se ovi propisi međusobno razlikuju u određenim detaljima zbog različitih nadležnosti njihov je primarni cilj osigurati smjernice za gradnju pomorskih brodica kako bi njihovi vlasnici ili posade bili uvjereni u njihovu sigurnost i pouzdanost. Primarni zahtjevi navedenih propisa sa stajališta stabiliteta su:

- kut nagiba pri kojemu može nastupiti prodor vode,
- minimalni odnos stabiliteta i raspoložive površine jedara i
- minimalna vrijednost stabiliteta kod nagiba jedrilice od 90°.

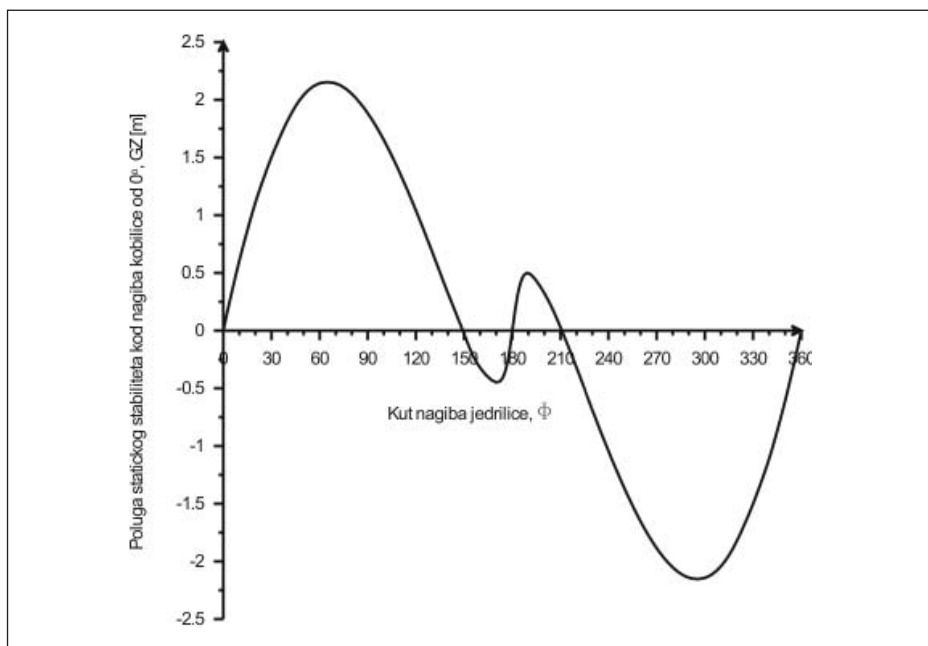
Svaki od ovih zahtjeva direktno je primjenjiv na jedrilice s pomičnim balastom. Pri projektiranju jedrilice s nagibnom balastnom kobilicom potrebno je zadovoljiti sve zahtjeve vezane za stabilitet u najnepovoljnijem položaju kobilice. Nadalje, pokazalo se da iako se zadovolje svi propisi vezani za stabilitet, jedrilice s nagibnom balastnom kobilicom u određenim situacijama prilikom jedrenja zauzimaju takve kuteve nagiba koji iako nisu opasni za prevrtanje ili prodor vode itekako su opasni za posadu.



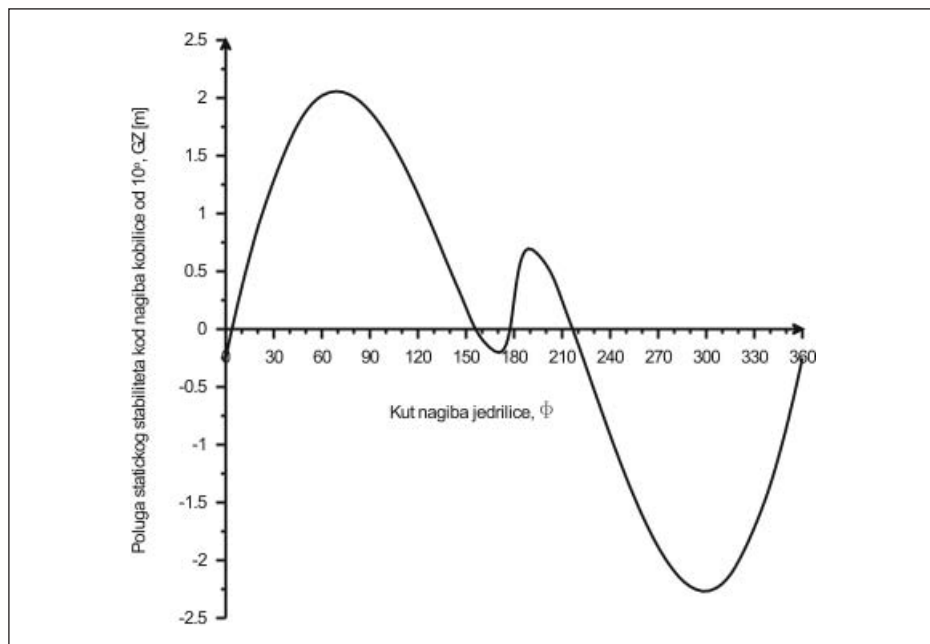
Slika 9. Maxi jedrilica visokih performansi, [6]

3. ANALIZA UTJECAJA NAGIBA NAGIBNE KOBILICE NA HIDROSTATIČKE ZNAČAJKE

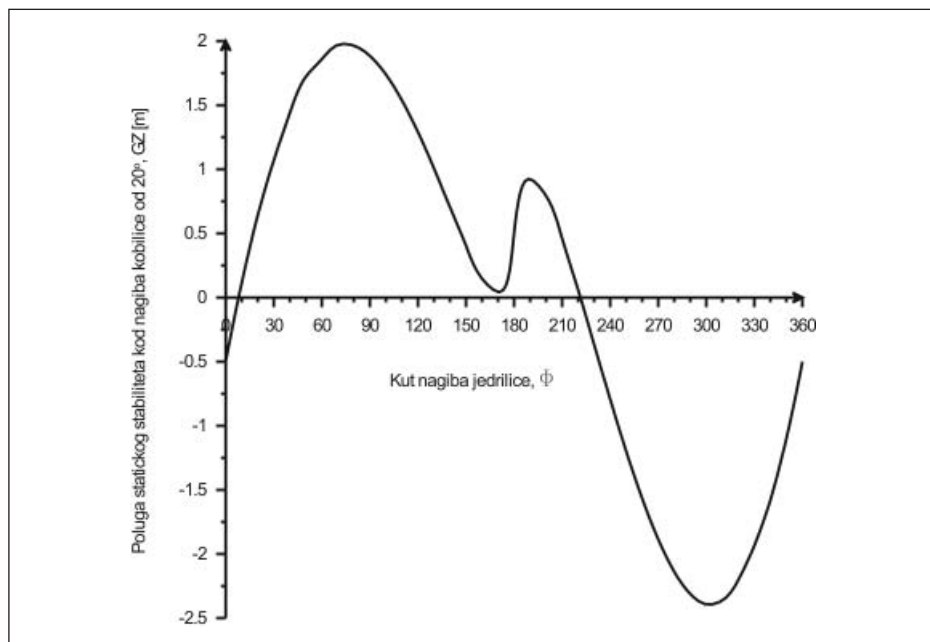
Pomicanjem nagibne balastne kobilice utječe se na položaj težišta sistema jedrilice čime se hidrostatičke karakteristike mijenjaju. Stoga su izvršeni proračuni hidrostatičkih značajki za razne nagibe nagibne kobilice u intervalu od -40° do $+40^\circ$, te različite nagibe jedrilice u intervalu od 0° do 360° s ciljem dobivanja krivulja poluga statičkog stabiliteta za različite scenarije kako bi se mogla izvršiti analiza utjecaja pojedinog položaja nagibne kobilice na hidrostatičke značajke.



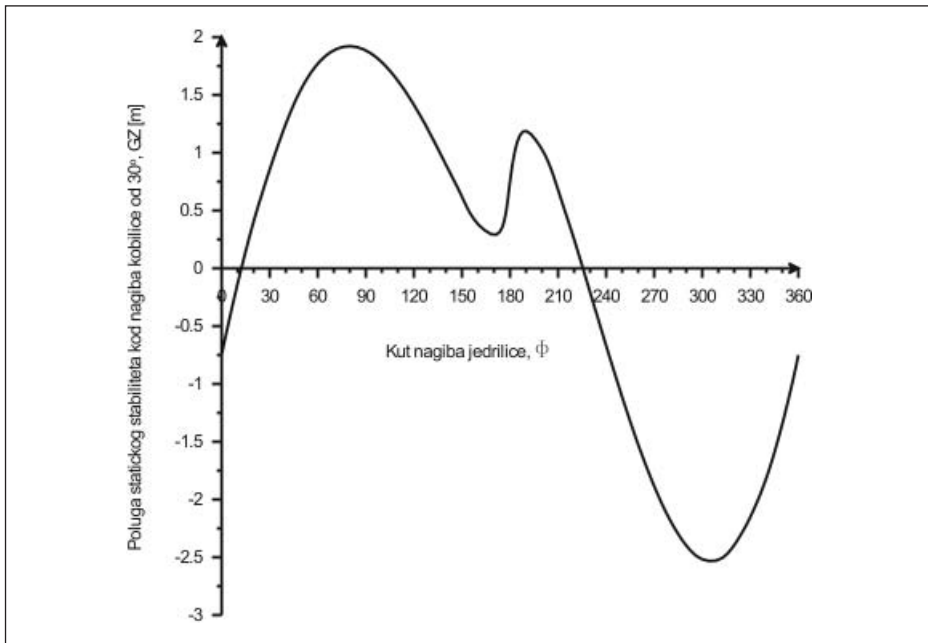
Slika 10. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod kobilice u nultom položaju



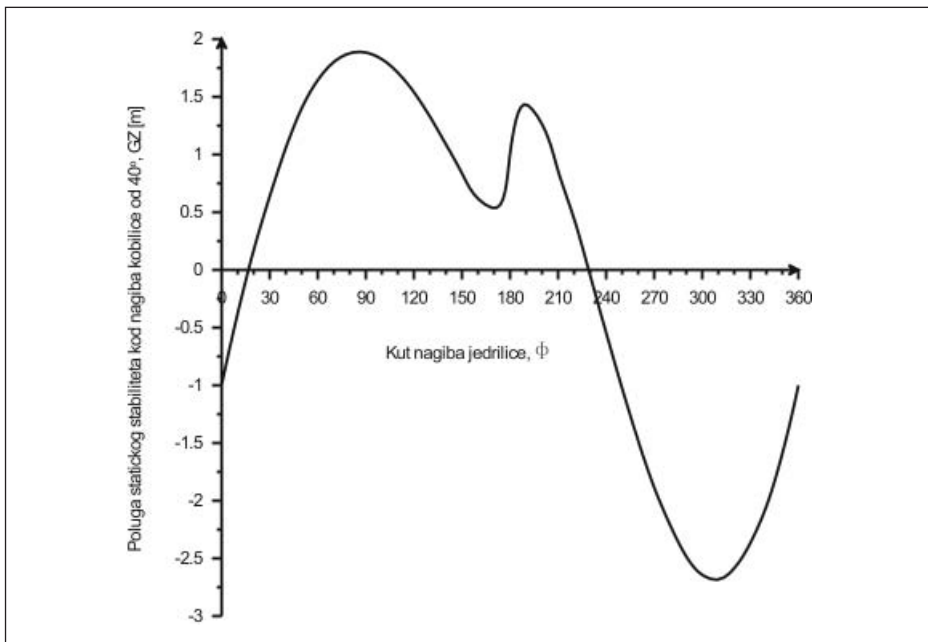
Slika 11. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od 10°



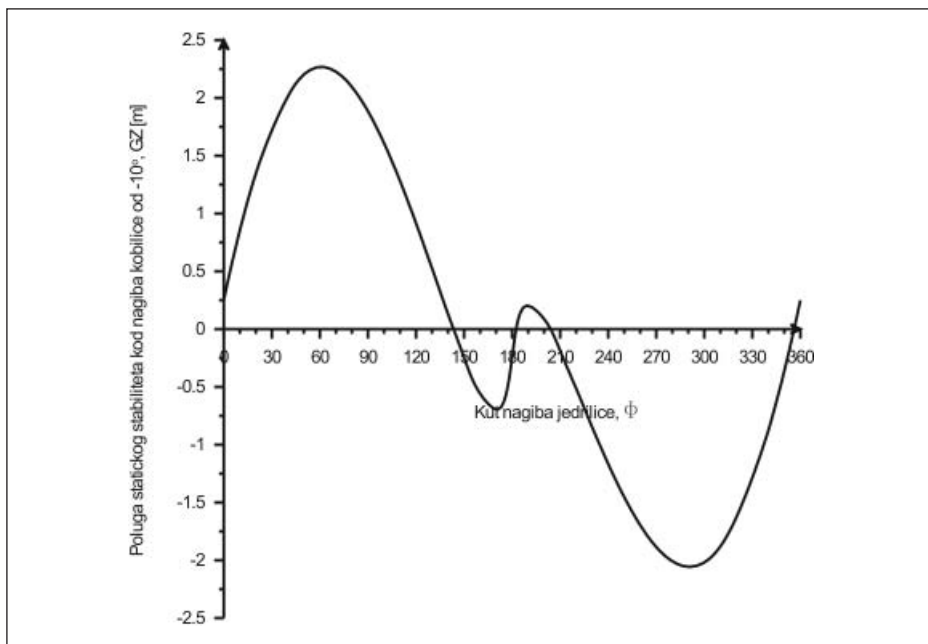
Slika 12. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od 20°



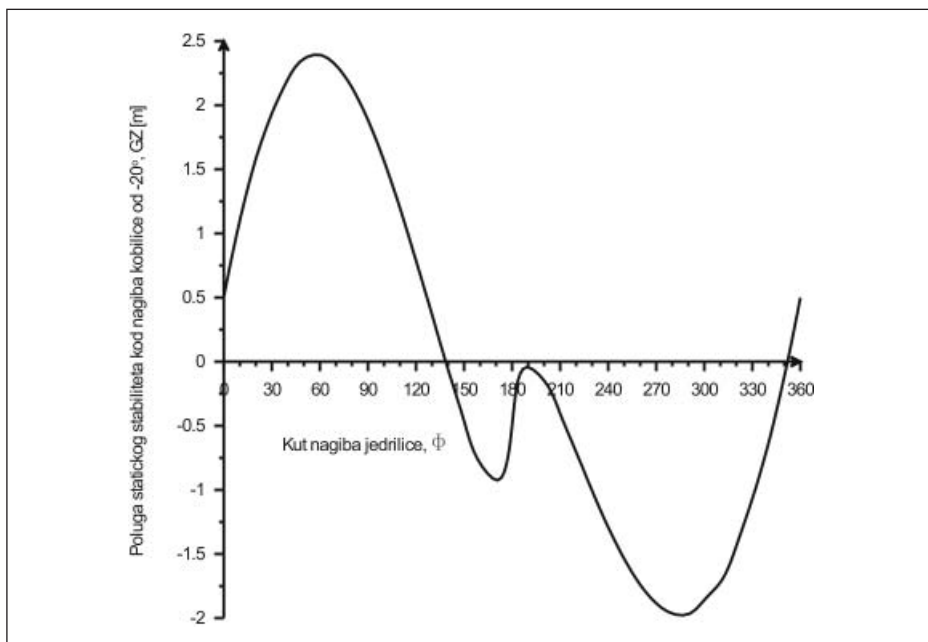
Slika 13. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od 30°



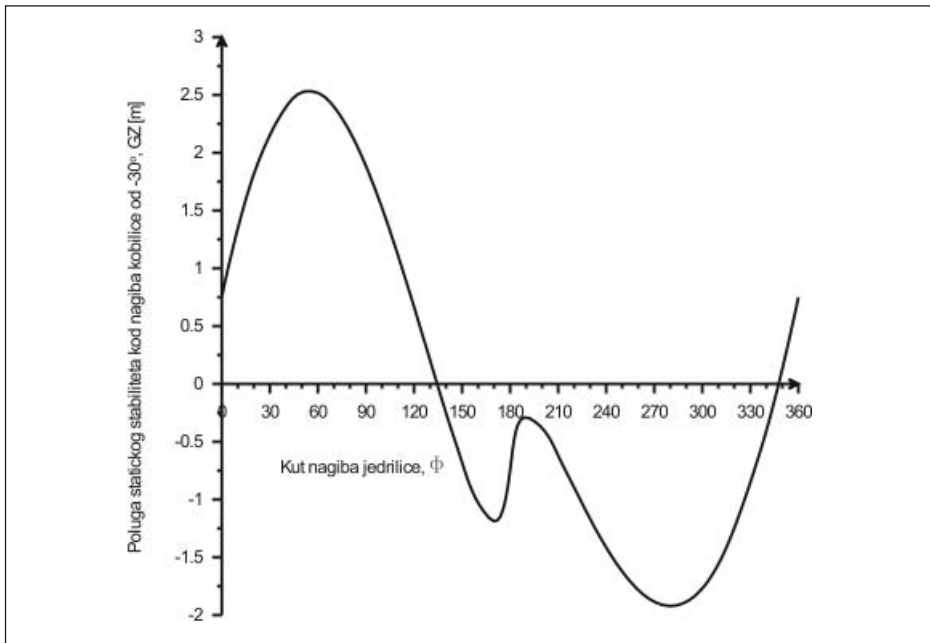
Slika 14. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od 40°



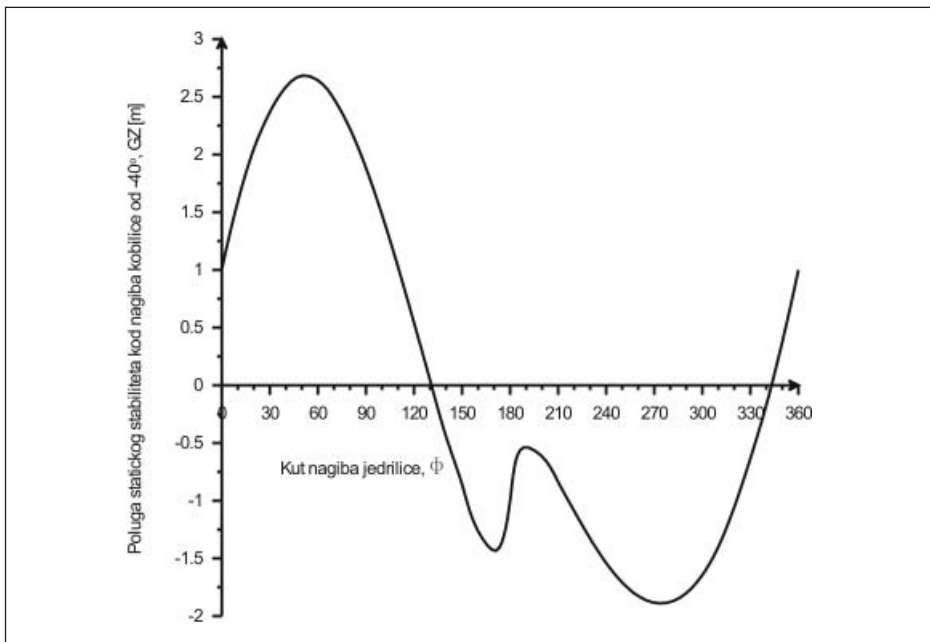
Slika 15. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od -10°



Slika 16. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od -20°

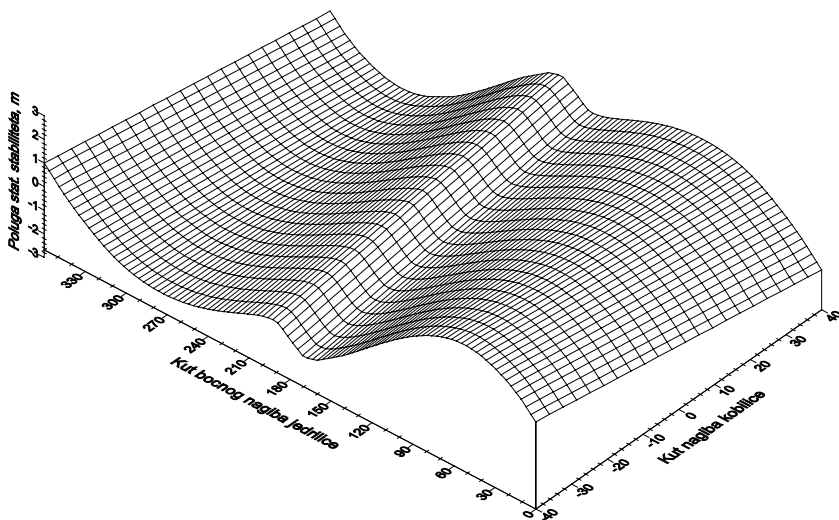


Slika 17. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od -30°



Slika 18. Krivulja poluga statičkog stabiliteta kod nagiba kobilice od -40°

Iz prikazanih krivulja poluga statičkog stabiliteta za različite nagibe kobilice (Slika 10. do 18.), vidljivo je kako se hidrostatičke karakteristike bitno mijenjaju s promjenom nagiba kobilice. Navedene krivulje poluga statičkog stabiliteta mogu se prikazati i trodimenzionalno u funkciji kuta nagiba kobilice (u intervalu od -40° do $+40^\circ$) i u funkciji nagiba jedrilice (u intervalu od 0° do 360°), čime se dobiva ploha poluga statičkog stabiliteta, prikazana na slici 19.



Slika 19. Ploha poluga statičkog stabiliteta

4. DEFINIRANJE KRITIČNIH NAGIBA JEDRILICE

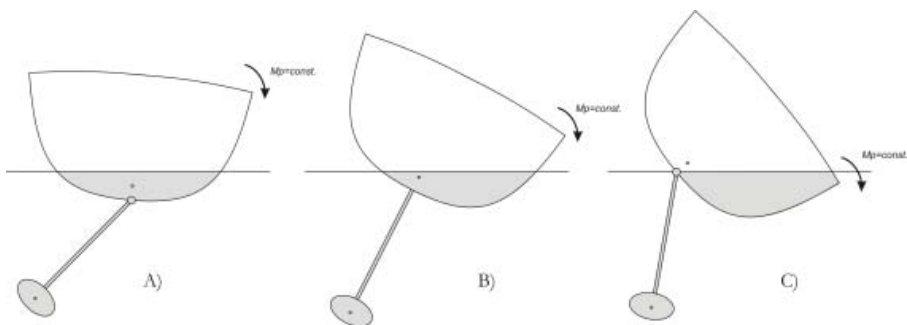
Pod kritičnim nagibom jedrilice autori podrazumijevaju one nagibe kod kojih kretanje posade na jedrilici i izvršavanje potrebnih zadataka postaje kritično zbog povećane opasnosti od pada koji može rezultirati ozljedom i/ili gubitkom u moru. Autori su praktičnim ispitivanjima te prikupljanjem informacija intervjuiranjem više iskusnih jedriličara/pomoraca došli do sljedećih zaključaka vezanih za opis kretanja posade na jedrilici i izvršavanje potrebnih zadataka:

Tablica 1. Opis kretanja posade na jedrilici u odnosu na kut bočnog nagiba iste

Kut nagiba jedrilice	Opis kretanja posade
0° do 15°	normalno
15° do 30°	otežano
30° do 45°	vrlo otežano
veći od 45°	kritično

Kako je vidljivo iz tablice 1. kutevi nagiba jedrilice veći od 45° definirani su kao kritični sa stajališta sigurnosti posade. Ovakvi kutevi nisu uobičajeni kod optimalnog jedrenja već nastupaju kao posljedica nekontroliranih i/ili neuspjelih manevara te kao posljedica udara vjetera i/ili vala.

Za nastupanje kritičnih kuteva nagiba nužan je odgovarajući vanjski prekretni moment. Taj moment izjednačava moment statičkog stabiliteta nagnute jedrilice, koji je, kako je vidljivo iz plohe poluga statičkog stabiliteta, isti kod različitih nagiba kobilice samo za različite kuteve nagiba jedrilice. Iz toga slijedi da jedrilice kod jednakog vanjskog prekretnog momenta, odnosno kod iste snage vjetera, s obzirom na različiti položaj kobilice poprimaju različite kuteve nagiba, od kojih neki mogu biti kritični. Na slici 20. prikazana su tri scenarija jedrilice s različitim položajem kobilice za slučaj jedrenja u vjetar snage oko 15 čv.



Slika 20. Nagib jedrilice za konstantnu snagu vjetera kod tri karakteristična položaja kobilice od -40°, 0° i +40°

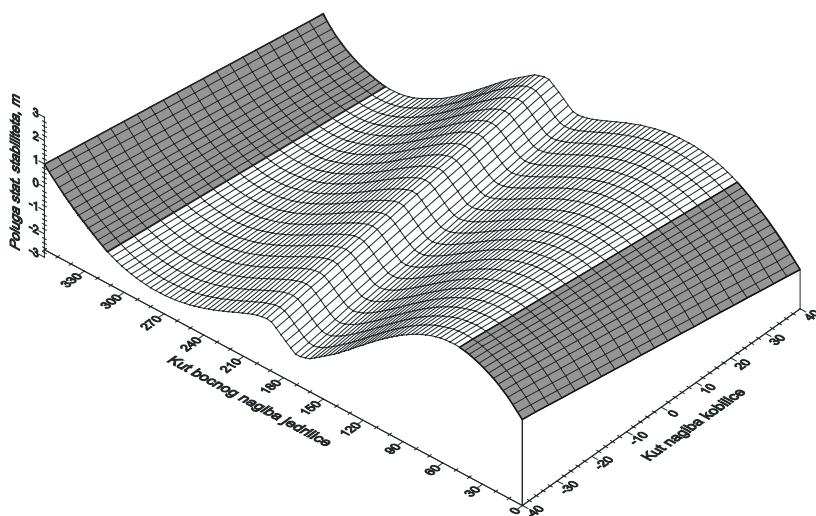
Rezultati relevantni za sliku 20. prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz rezultata relevantnih za sliku 20

Slučaj:	A)	B)	C)
Snaga vjetra, [čv.]	15	15	15
Kut nagiba kobilice, [°]	-40	0	+40
Kut nagiba jedrilice, [°]	5	27	50
Opis kretanja posade	normalno	otežano	kritično

Iz slike je vidljivo da kod umjerenog vjetra, idealnog za jedrenje, u slučaju nepovoljnog položaja kobilice nastupaju kritični nagibi za sigurnost posade, a logično je da bi posljedice bile još kritičnije kod jakog ili olujnog vjetra.

Na slici 20. prikazana je ploha poluga statičkog stabiliteta na kojoj je određena i osjenčana površina plohe za kuteve bočnog nagiba jedrilice koji nisu kritični sa stajališta sigurnosti posade.



Slika 21. Izdvojeno područje kritičnih kuteva nagiba na plohi poluga statičkog stabiliteta

5. ZAKLJUČAK

U ovome radu analiziran je utjecaj nagibne balastne kobilice na hidrostatičke značajke jedrilice, te utjecaj promjena hidrostatičkih značajki zbog pomicanja nagibne balastne kobilice, tj. položaja težišta masa na sigurnost posade.

Autori su u radu izvršili proračune hidrostatičkih značajki za različite položaje nagibne balastne kobilice što je za rezultat imalo definiranje plohe poluga statičkog stabiliteta u funkciji nagiba balastne kobilice i u funkciji bočnog nagiba jedrilice. Iz navedene plohe moguće je očitati vrijednost poluge statičkog stabiliteta za trenutni nagib balastne kobilice i bočni nagib jedrilice, odnosno, što je još bitnije, moguće je za poznati prekretni moment očitati, odnosno predvidjeti bočni nagib jedrilice za različite nagibe balastne kobilice.

Nadalje, određeni su kritični kutevi nagiba jedrilice kao oni nagibi kod kojih kretanje posade na jedrilici i izvršavanje potrebnih zadataka postaje kritično zbog povećane opasnosti od pada koji može rezultirati ozljedom i/ili padom u more. Iz izvršene analize utvrđeno je da kritični kutevi nagiba nastupaju kod znatno manjih vrjednosti poluga statičkog stabiliteta kada je balastna kobilica nagnuta na zavjetrinsku stranu, odnosno kod znatno manjih vanjskih prekretnih momenata. Iz toga se može zaključiti da je upravljanje balastnim kobilicama vrlo odgovoran posao zaduženih članova posade i može utjecati na bočni nagib jedrilice pri konstantnom i umjerenom vjetru snage petnaestak čvorova u rasponu od 5 do 50 stupnjeva, a kretanje posade može iz normalnog u trenutku prijeći u kritično.

LITERATURA

- [1] Uršić, J., Stabilitet broda, I dio, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1991.
- [2] Larson, L., Elliason, R., Principles of yacht design, International Marine, Camden Maine, 1998.
- [3] Farr, B., Sea change... part II, Farr Yacht Design, Seahorse Magazine, April, 2005.
- [4] Cariboni, G., Canting keel systems, Keel control catalogue, Italy, 2007.
- [5] Bruce Farr, Sea change... part I, Farr Yacht Design, Seahorse Magazine, March, 2005.
- [6] Matulja, R., T. Matulja, Projekt maxi jedrilice visokih performansi, Projekt br. 018./2006.

Summary

MAXI YACHT CANTING KEEL SYSTEM INFLUENCE ANALYSIS ON THE SAFETY OF THE CREW IN TERMS OF HYDROSTATIC CHARACTERISTICS

The yacht building trends are focused towards the selection of larger dimensions, adopting advanced yacht building technologies and equipping innovative systems like canting keels. These yachts belong to a category known as high-performance maxi yachts and as their dimensions normally exceed 24 meters and come up to 45 meters, such yachts require a professional crew i.e. trained seamen. The scope of this research, as a part of the author's entire maxi yacht design, is to define the consequences due to the crew interaction with the canting keel system managing operations which can significantly impact on the hydrostatic characteristics of a sailing yacht in a positive and negative sense, and imperil the safety of the crew. In this paper the influence of a maxi yacht canting keel system on her hydrostatic characteristics is analyzed. Further more the authors have defined the critical angle of the heel as related to the safety of the crew and have defined such areas on the righting arm surface. The analysis has been carried out on the author's 30 meters length overall high performance maxi yacht design with a $\pm 40^\circ$ canting keel.

Key words: *canting keel, hydrostatic characteristics, high performance maxi yacht, safety of the crew*

Tin Matulja, B.Sc.

Tomislav Mrakovčić, Ph.D.

Nikša Fafandjel, Ph.D.

Faculty of Engineering

Vukovarska 58

51000 Rijeka

Croatia