

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милан Д. Калајџић

**КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД
ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА**

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Milan D. Kalajdžić

**SAILING YACHT MOTION
IN GUSTING WIND**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

Комисија за оцену и одбрану:

Ментор: Проф. др Милан Хофман, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије:

Проф. др Дејан Радојчић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Милорад Моток, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Доц. др Игор Бачкалов, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

Доц. др Александар Симић, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

Датум одбране:

Предговор

У раду *КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА* коришћене су методе које су резултат вишегодишњег истраживања изведеног на Катедри за бродоградњу Машинског факултета Универзитета у Београду. Аутор је био члан тима истраживача – инжењера бродоградње, који је испитивао проблем динамичког стабилитета морских и речних бродова у светлу понашања брода на таласима и рачуна вероватноће. Ово истраживање награђено је међународним признањем *RINA-Lloyd's Register Educational Trust Ship Safety Award* за 2007. годину.

На основама овог истраживања аутор је проширио и применио метод и на кретање једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји. Добијени резултати су вишеструко значајани и применљиви су и у научном смислу, али имају и широку практичну примену.

Аутор дугује велику захвалност ментору, који је иницирао и осмислио истраживање и, стрпљиво и подстицајно, руководио радом. Такође, Аутор се захваљује породици на несебичној подршци и пријатељима који су, свако на свој начин, допринели успешном завршетку рада.

Београд, јул 2014.

Милан Калајџић

КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА

Апстракт

У раду је развијен иновативни поступак за прорачун кретања једрилице под утицајем променљивог, хаотичног ветра у воденој струји. Поступак омогућава процену оптималног положаја једара током њеног нестационарног кретања. Примењени метод је базиран на дугогодишњем истраживању у којем се аутор бавио утицајем променљивог ветра на динамички стабилитет брода. Оваквим приступом проширен је класични поступак предвиђања брзине једрилице при константном ветру. Алгебарске једначине се, на тај начин, претварају у нелинеарне спрегнуте диференцијалне једначине кретања једрилице и тиме анализа постаје много захтевнија. Ипак, поступак води кроз све компликоване проблеме, и омогућава главни циљ: одређивање залетање, заношења и ваљања једрилице током времена под утицајем променљивог ветра и водене струје. Поступак се може применити за различите положаје једара: константан током кретања, или променљив, који прати оптимум у односу на ветар. Помоћу стохастичке анализе добијених резултата, такође се могу одредити, поредити и анализирати средња брзина пловидбе, средњи нагиб, угао заношења једрилице.

Ветар је, генерално, временски завистан феномен, тако да (због променљиве силе ветра) кретање једрилице не може бити стационарно. Упркос томе, у већини истраживања, перформансе једрилице (њена брзина, заношење, итд.) сматрају се константним, а утицај удара ветра се занемарује.

Приказано истраживање примењује иновативне технике развијене у анализи утицаја променљивог ветра на стабилитет и сигурност брода, а анализа обухвата ударе ветра и последице нестационарног кретања једрилице. Такође, као основни случај решава се и стационарно кретање једрилице, са и без утицаја водене струје, за константан ветар и резултати се приказују у форми поларних дијаграма.

Основна процедура је, укратко, следеће. За претпостављене сложене услове нестационарног кретања једрилице под дејством хаотичног ветра у воденој струји, решавају се спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе

једрилице са три степена слободе кретања. Променљива брзина ветра се одређује из одговарајућих семи-емпиријских спектара ветра, прорачунава се привидна брзина ветра и одговарајући временски зависне силе и моменти ветра. Хидродинамичке силе које делују на труп једрилице, одређују се на бази семи-емпиријских полинома тзв. Делфтске серије једрилица, при чему се, као меродавна брзина, узима релативна брзина једрилице у односу на брзину воде. Диференцијалне једначине кретања се решавају нумеричким путем, и одређује залетање, ваљање, заношење и закретање једрилице у функцији времена. Врши се стохастичка анализа добијених кретања, и тражи средња брзина пловидбе, заношења, итд. под различитим условима – у случају да се једра поставе у фиксан (оптималан) положај у односу на стационарно кретање, и у случају да је положај једара променљив, и да одговара тренутном оптимуму. Анализира се утицај брзине и правца ветра, брзине и правца водене струје, положаја једара, и одређује се повећање средње брзине пловидбе које се постиже правилним позиционирањем једара током реалног, нестационарног једрења.

У раду су дати и типични примери који показују како се развијени метод може користити у различитим студијама понашања једрилица у реалном окружење. Поред осталог, могуће је одредити оптимални положај једара под утицајем променљивог ветра. Тако би се могло предвидети могуће повећање средње брзине, ако је скипер у стању да подесити једра правилно током нестационарног кретања једрилице.

Коначно, у раду је указано на могућа будућа истраживања у области нестационарног кретања једрилица.

Кључне речи: једрилица, динамичко једрење, променљив ветар, водена струја, математички модел, нестационарно, нелинеарно кретање, аеро-хидродинамика, једра, оптимизација

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Бродоградња

UDK 629.525 (043.3) / 532.583.4 (043.3)

SAILING YACHT MOTION IN GUSTING WIND

Abstract

The thesis develops an innovative procedure for prediction of sailing yacht motion in water current due to changeable, gusting wind. In addition, the method enables the assessment of optimal position of sails throughout unsteady yacht's motion. Method is based on long-term investigations done by the author in the field of gusting wind influence on ship dynamic stability. The classical procedure for prediction of sailing yacht velocity in constant wind is extended by this novel approach. Algebraic equations are, in that way, transformed to nonlinear coupled differential equation of yacht motion, so the analysis became much more challenging. The procedure leads to a perplex problem, but still enables the main goal: the prediction of sailing yacht unsteady surge, sway and roll in gusting wind and water current. This could be done for different position of sails: constant throughout the motion, or changeable, adjusted optimally to the instantaneous wind. By stochastic analysis of the obtained results, the mean vessel velocity, her mean heel, mean leeway angle, could be assessed, compared and analyzed.

The wind is, generally, a time dependent phenomenon, so (due to the changeable wind forces) a sailing yacht motion cannot be stationary. In spite of that, in a great majority of investigations, the sailing yacht performances (her speed, list etc.) are considered constant, and the influences of wind gusts are neglected.

The present investigation exploits the innovative techniques developed in the analysis of gusting wind influence on ship stability and safety, and includes the wind gusts and the consequent non-stationary yacht motion into the analysis. Also, as a base case, steady motion of sailing yacht in constant wind with, and without the impact of water current is solved, and presented in the form of polar diagrams.

The basic procedure is, briefly, the following. For assumed complex conditions of unsteady sailing yacht motion under the influence of gusting wind and water current, coupled nonlinear differential equations of yacht motion with three degrees of freedom are derived and solved. The changeable wind speed is assessed from appropriate semi-empirical wind spectrums, and the time-dependent wind forces and moments

(depending on the apparent wind speed) are included into nonlinear differential equations of yacht's motion. Hydrodynamic forces acting on the hull are determined on the basis of semi-empirical polynomial of, so called, Delft yacht series, where, yacht speed relative to water is taken as the representative speed. The differential equations are solved numerically, giving the time-history of vessel surge, sway and roll. From the obtained data, the mean vessel speed, her mean list, etc. are derived by a detailed stochastic analysis for a variety of conditions - in case of sails placed in a fixed (optimal) position relative to the stationary motion, and in case of (unsteady) position corresponding to the current optimum. The influence of intensity and direction of wind and water current are analysed, and the increase of mean yacht speed due to proper positioning of sails is determined.

The thesis explains the tools and a procedure used, and gives also some typical examples. It points how the developed method could be used in different studies of sailing yacht's behavior in realistic surrounding. Among other, it could give an optimal position of the sails in changeable wind. It could predict possible gains in mean speed, if the skipper is able to adjust the sails properly throughout the non-stationary yacht motion.

Finally, the thesis indicates possible tasks for the future research.

Key words: sailing yacht, dynamic sailing, gusting wind, current, mathematical model, unsteady, nonlinear movement, aero-hydrodynamics, sails, optimization

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Naval Architecture

UDK 629.525 (043.3) / 532.583.4 (043.3)

САДРЖАЈ

1. Увод	1
1.1. Преглед поглавља	2
1.2. Преглед литературе	6
2. Теоријске основе кретања једрилице	9
2.1. Општи увод у динамику брода	9
2.2. Кретања једрилице у воденој струји при утицају променљивог ветра	18
2.3. Спрегнуте диференцијалне једначине кретања једрилице при дејству променљивог ветра	21
2.4. Троуглови брзина	23
2.5. Хидродинамичке силе	26
2.5.1. Хидростатичке силе и моменти	27
2.5.2. Хидродинамичких коефицијената додатних маса и пригушења	28
2.5.3. Одређивање хидродинамичких сила и момената	35
2.6. Аеродинамичке силе	41
2.6.1. Принцип стварања аеродинамичке узгонске (поривне) силе ...	41
2.6.2. Моделска испитивања једара и приказивање резултата	43
2.6.3. Утицај нагиба једрилице на аеродинамичку силу	51
2.6.4. Начин струјања ваздуха око једара	52
2.6.5. Оптимизација положаја једара	55
2.7. Модел ветра	58
2.8. Коначне једначине кретања једрилице	59
3. Стационарно кретање једрилице у воденој струји	61
3.1. Увод у стационарно кретање – динамичка равнотежа	61
3.2. Једначине динамичке равнотеже са и без утицаја водене струје	65
3.3. Конструкција поларног дијаграма брзине једрилице и поређење резултата са другим доступним софтверима	71
3.4. Водена струја и конструисање поларног дијаграма брзине једрилице	74

3.5. Утицај водене струје на кретање једрилице	81
4. Нестационарно кретања једрилице под дејством променљивог ветра у мирној води	88
5. Нестационарно кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји	96
6. Закључне напомене и смернице за будућа истраживања	104
Литература	107
 Прилози	
1. Опис једрилице коришћене за прорачуне	114
2. Дијаграми	118
3. Увод у мерења у пуној величини (реална мерења)	131
4. Опис програма	136

НОМЕНКЛАТУРА

A	латерална површина	$[m^2]$
A_{WL}	површина водне линије	$[m^2]$
B_{WL}	ширина једрилице на водној линији	$[m]$
BAL	маса баласта	$[kg]$
CA	коэффициент који зависи од односа b/a	$[-]$
C_f	коэффициент отпора трења	$[-]$
C_L	коэффициенти узгона једра	$[-]$
C_D	коэффициенти отпора једра	$[-]$
C_D	коэффициент пригушења правоугаоне плоче	$[-]$
D	ширина траке/плоче	$[m]$
Fn	Фрудов број	$[-]$
F_v	сила узгона једра	$[N]$
F_w	сила отпора у правцу кретања	$[N]$
F_w	бочна сила ветра	$[N]$
F_h	бочна сила на труп у правцу управном на кретање	$[N]$
J_x	масени момент инерције једрилице за осу x	$[kgm^2]$
J_z	масени момент инерције једрилице за осу z	$[kgm^2]$
KC	Keulegan–Carpenter-ов број	$[-]$
\overline{KG}_t	положај тежишта трупа,	$[m]$
\overline{KG}	положај тежишта једрилице	$[m]$

l	растојање од тежишта елемента до тежишта једрилице	$[m]$
l_h	растојање тежишта кобилице до тежишта једрилице	$[m]$
l_j	растојање тежишта јарбола са једрима до тежишта једрилице	$[m]$
L	дужина трупа једрилице	$[m]$
L_{WL}	дужина водне линије	$[m]$
LCB	тежиште истиснућа	$[m]$
LCF	тежиште водне линије	$[m]$
L_k	ширина кобилице	$[m]$
L_r	ширина кормила	$[m]$
L_j	ширина јарбола са једарима	$[m]$
M	висина јарбола	$[m]$
M_d	моменти пригушења ваљања	$[Nm]$
M_{st}	момент стабилитета	$[Nm]$
$M_{w\theta}$	момент ветра око осе x	$[Nm]$
M_{Fh}	момент силе на труп око осе x	$[Nm]$
\overline{MG}	метацентарска висина	$[m]$
m_A	додатна маса флуида	$[kg]$
m_ξ	додатна маса при напредовању	$[kg]$
m_η	додатна маса при заносу	$[kg]$
m_φ	додатна маса при ваљању	$[kgm^2]$
m_θ	додатна маса при закретању	$[kgm^2]$

m_t	маса трупа једрилице	[kg]
m_r	маса кормила	[kg]
m_j	маса јарбола и једара	[kg]
n_ξ	пригушење при залетању	[kg / s]
n_η	пригушење при заношењу	[kg / s]
n_φ	пригушење при ваљању	[kgm ² / s]
n_θ	пригушење при закретању	[kgm ² / s]
Rn	Рејнолдсов број	[-]
Rf	отпор трења	[N]
Rv	вискозни отпор	[N]
Rr	преостали отпор голог трупа	[N]
Ri	сила индукованог отпора	[N]
$\Delta Rr_{h\varphi}$	додатни оптор трупа при нагибу	[N]
$\Delta Rr_{k\varphi}$	додатни оптор кобилице при нагибу	[N]
Sc	оквашена површина	[m ²]
SF	бочна сила	[N]
T	период осциловања	[s]
T_c	газ трупа једрилице	[m]
THR	висина кобилице	[m]
T_R	висина кормила	[m]

U	амплитуда релативне брзине	$[m/s]$
V_B	брзина једрилице	$[m/s]$
V_{Bkv}	брзина залетања кроз воду	$[m/s]$
V_v / TWS	брзина ветра	$[m/s]$
V_{aw} / AWS	привидна брзина ветра	$[m/s]$
VR	референтна запремина флуида	$[m^3]$
x_{Gt}	растојање тежишта трупа до тежишта једрилице	$[m]$
x_h	растојање тежишта кобилице до тежишта једрилице	$[m]$
x_r	растојање тежишта кормила до тежишта једрилице	$[m]$
x_j	растојање тежишта јарбола са једрима до тежишта једрилице	$[m]$
ρ_f	густина флуида	$[kg/m^3]$
ν	кинематска вискозност воде	$[m^2 / s]$
Δ	депласман једрилице	$[kg]$
∇_c	истиснуће трупа	$[m^3]$
∇_k	истиснуће кобилице	$[m^3]$
φ	угао ваљања, угао накретања једрилице	$[rad, ^\circ]$
$\dot{\varphi}$	угаона брзина ваљања	$[rad / s]$
$\ddot{\varphi}$	угаоно убрзање ваљања	$[rad / s^2]$
ξ	залетање	$[m]$
$\dot{\xi}$	брзина залетања	$[m/s]$

$\ddot{\xi}$	убрзање залетања	$[m/s^2]$
η	заношење	$[m]$
$\dot{\eta}$	брзина заносења	$[m/s]$
$\ddot{\eta}$	убрзање заносења	$[m/s^2]$
θ	угао закретања	$[rad, ^\circ]$
$\dot{\theta}$	угаона брзина закретања	$[rad / s]$
$\ddot{\theta}$	угаоно убрзање закретања	$[rad / s^2]$
ε	угао заносења	$[rad, ^\circ]$
δ'	угао стварног ветра и осе једрилице	$[rad, ^\circ]$
δ / TWA	угао стварног ветра	$[rad, ^\circ]$
α'	угао привидног ветра и осе једрилице	$[rad, ^\circ]$
α / AWA	угао привидног ветра	$[rad, ^\circ]$
d_r	угао водене струје и осе једрилице	$[rad, ^\circ]$
d'_{Bkv}	угао релативне брзине и осе једрилице	$[rad, ^\circ]$
d_{Bkv}	угао релативне брзине	$[rad, ^\circ]$
γ	положај једра, угао између осе једра и једрилице	$[rad, ^\circ]$

Индекси

<i>t / hull</i>	труп једрилице
<i>kb / keel</i>	кобилица
<i>kr / rudder</i>	кормило
<i>j / sail</i>	једра

Скраћенице коришћене у раду

ANN	Artificial Neural Network
CFD	Computation Fluid Dynamics
CSYS	Chesapeake Sailing Yacht Symposium
DNV	Det Norske Veritas
GPS	Global Positioning System
HISWA	International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction
HPYD	High Performance Yacht Design Conference
IMO	International Maritime Organization
INNOV'SAIL	International Conference On Innovation in High Performance Sailing Yacht
ITTC	International Towing Tank Conference

1

УВОД

Једрилице су фасцинантни објекти, како за једриличаре, тако и посматрче, поготову на регатном пољу, али су такође и врло сложене машине. Једрилице су објекти који се крећу кроз два флуида (ваздух и воду) и у сталној су интеракцији са њима, преко сила од ветра, таласа или водене струје. За разлику од других типова бродова, једрилице су специфичне и по томе што за њихово кретање је неопходан ветар. На једрилицу при њеном кретању делују сложене аеродинамичке и хидродинамичке силе.

Као природна појава ветар је временски завистан феномен, мења се током времена. Ветар може мењати правац и брзину, тако да (због променљиве силе ветра) кретање једрилице не може бити стационарно. Упркос томе, у већини истраживања, перформансе једрилице (њена брзина, заношење, итд.) сматрају се константним, а утицај удара ветра се занемарује. У оквиру овог истраживања примењују се иновативне технике развијене у анализи утицаја променљивог ветра на стабилитет и сигурност брода, које обухватају ударе ветра и последице на нестационарно кретање једрилице. Утицај таласа на једрилицу није разматран, али је уведен нови утицај водене струје.

Водена струја мења апсолутну брзину пловидбе једрилице, тиме утиче на привидну брзину ветра и мења аеродинамичке силе, што повратно делује на хидродинамичке силе које делују на труп... Проблем је зато неопходно решавати сложеним итеративним поступком, који је приказан у даљој анализи. С обзиром

да нису нађени радови који се баве овом проблематиком (осим једног текста), и да је у класичној бродској хидродинамици (која не укључује ветар) утицај водене струје крајње једноставан, постојала је бојазан да ће добијена решења бити тривијална. Напротив, добијена је веома интересантна и сложена интеракција брзина водене струје, брзине ветра и брзине једрилице, значајна како за пројектовање једрилице, тако и за примену на регатама које се возе по рекама и областима с јаким морским струјама.

Један од циљева истраживања је, за претпостављене сложене услове нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји, извођење спрегнутих нелинеарних диференцијалних једначина пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања. Треба рећи да се у теорији брода користе два приступа при извођењу диференцијалних једначина кретања. Једначине се могу извести у покретном координатном систему везаном за променљиво кретање тежишта брода. Такав поступак се, углавном, користи при решавању проблема везаних за кормиларења брода. Диференцијалне једначине је могуће извести и у инерцијалном координатном систему везаном за стационарно кретање тежишта брода, у односу на који брод врши осциловање. Овај приступ се користи у решавању проблема кретања брода на таласима. За кретање једрилица су се, по правилу, до сада користиле једначине неинерцијалног координатног система. У овом истраживању се, по први пут, изводе једначине динамике једрилице у инерцијалном координатном систему, какав се користи при анализи кретања брода на таласима. Овакав приступ, између осталог, омогућава прецизније одређивање хидродинамичких коефицијената, и коришћење већ постојећих програма за њихов прорачун.

1.1. ПРЕГЛЕД ПОГЛАВЉА

У првом – уводном поглављу дисертације већ је укратко описан предмет истраживања и указано на комплексност аеродинамичких и хидродинамичких појава до којих долази при кретању једрилице. Кроз сажет опис појединих

проблема које је неопходно решити у циљу моделирања кретања једрилице под утицајем променљивог ветра у воденој струји, објашњени су и постављени циљеви истраживања. Осим тога, у уводном поглављу је представљена структура рада, чиме се олакшава праћење изнете материје. Такође је дат и преглед литературе из разматране области са освртом на развој екпериментаних, нумеричких и теоријских метода које се користе.

У другом поглављу „Теоријске основе нестационарног кретања једрилице“ дате су теоријске основе аеро-хидродинамике и динамике једрилице. Приказани су и објашњени поступци за моделирање аеродинамичких сила које делују на једра, и хидродинамичких сила које делују на труп брода. Приказан је и оригинални поступак који узима у обзир утицај водене струје на кретање једрилице. Описан је поступак симулације променљивог, хаотичног ветра на основу енергетског спектра ветра, који до сада није примењиван у проблемима динамике једрилица. Приказан је и поступак оптимизације положаја једара, са циљем добијања максималне узгонске силе једара и повећања брзине пловидбе. На крају су, за претпостављене сложене услове нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји, изведене спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања. Треба рећи да се у теорији брода користе два приступа при извођењу диференцијалних једначина кретања. Једначине се могу извести у покретном координатном систему везаном за променљиво кретање тежишта брода. Такав поступак се, углавном, користи при решавању проблема везаних за кормиларења брода. Диференцијалне једначине је могуће извести и у инерцијалном координатном систему везаном за стационарно кретање тежишта брода, у односу на који брод врши осциловање. Овај приступ се користи у решавању проблема кретања брода на таласима. За кретање једрилица су се, по правилу, до сада користиле једначине неинерцијалног координатног система. По први пут су изведене једначине динамике једрилице у инерцијалном координатном систему какав се користи при анализи кретања брода на таласима. Овакав приступ, између осталог, омогућава прецизније одређивање хидродинамичких коефицијената, и коришћење већ постојећих програма за њихов прорачун.

У трећем поглављу „Стационарно кретање једрилице у воденој струји“ обрађен је проблем стационарне пловидбе једрилице под дејством константног ветра у присуству речне или морске струје различитог интензитета и правца. Водена струја мења апсолутну брзину пловидбе једрилице, тиме утиче на привидну брзину ветра и мења аеродинамичке силе, што повратно делује на хидродинамичке силе које делују на труп... Проблем је зато неопходно решавати сложеним итеративним поступком, који је развијен у оквиру дисертације, и на основу кога је начињен оригинални компјутерски програм. С обзиром да нису нађени радови који се баве овом проблематиком, и да је у класичној бродској хидродинамици (која не укључује ветар) утицај водене струје крајње једноставан, постојала је бојазан да ће добијена решења бити тривијална. Напротив, добијена је веома интересантна и сложена интеракција брзина водене струје, брзине ветра и брзине једрилице, значајна како за пројектовање једрилице, тако и за примену на регатама које се возе по рекама и областима с јаким морским струјама. Приказ утицаја водене струје на кретање једрилице дат је у форми дводимензионалних поларних дијаграма, за различите интензитета и правце вектора брзине водене струје. По први пут су конструисани и тродимензионални поларни дијаграми, помоћу којих су приказани утицаји промене интензитета и правца вектора брзине водене струје. Резултати добијени у овом поглављу се користе и у наредним поглављима као еталон вредности, за поређење са перформансама при нестационарном кретању једрилице под дејством променљивог ветра.

У четвртом поглављу „Нестационарно кретања једрилице под дејством променљивог ветра у мирној води“ одређена су и анализирана решења нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог, хаотичног ветра. Утицај водене струје није узет у обзир. Развијен је оригинални компјутерски програм за нумеричко решавање система спрегнутих, нелинеарних диференцијалних једначина кретања једрилице, и одређивано залетање, ваљање и заносење једрилице у функцији времена. Приказана су и решење модела нестационарног кретања у случају константног ветра, како би се верификовали резултати програма. Треба рећи да модели нестационарног кретања једрилице већ постоје, што се види и из приложеног прегледа литературе. Ипак приступ је и овде оригиналан, користе се „нове“ једначине кретања, дејство ветра се симулира

преко спектра ветра (што се код једрилица до сада није примењивало) и на оригиналан начин одређује део хидродинамичких коефицијената. Симулирана су кретања једрилице за различите правце променљиве брзине ветра. Вршена је стохастичка анализа добијених кретања, и тражена средња брзина пловидбе једрилице под различитим условима – у случају да се једра поставе у фиксан (оптималан) положај у односу на стационарно кретање, и у случају да је положај једара променљив, и да одговара тренутном оптимуму. Анализиран је утицај брзине и правца ветра, положаја једара, и одређвана средња брзина пловидбе која се постиже правилним позиционирањем једара током реалног, нестационарног једрења.

Коначно, у поглављу пет „Нестационарно кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји“, у проблем се укључује и речна, односно морска струја. Поглавље је садржински слично поглављу четири. Програму за решавање нелинеарних спрегнутих диференцијалних једначина кретања једрилице придодат је и утицај водене струје, и помоћу њега решавано залетање, ваљање и заносење једрилице у функцији времена. Међутим, за разлику од поглавља четири, и стационарно кретање на које се резултати свде у случају константног ветра представља веома важан део истраживања и при том потпуно нов. Анализира се утицај брзине и правца ветра, брзине и правца водене струје, положај једара, и одређује средња брзина пловидбе која се постиже правилним позиционирањем једара током реалног, нестационарног једрења. Дата је и симулација пловидбе једрилице на регатном пољу, на ком долази до промене интензитета водене струје, и то када кормилар коригује своје кретање у складу с препорукама програма, и када занемари промену струје. Оваквом анализом показује се да утицај водене струје на перформансе једрилице може бити веома значајан.

У шестом поглављу дати су општи закључци проистекли из приказаних истраживања, као и смернице за усавршавање коришћених метода и програма током будућих истраживања.

Након ових шест поглавља дат је списак референтне литературе коришћене током истраживања.

На крају дисертације дато је неколико прилога. Тако је, у Прилогу 1, дат опис једрилице која је, као типичан пример, коришћена током прорачуна. Затим је, у Прилогу 2, приказан већи број поларних дијаграма стационарног кретања одабране једрилице, за различите брзине ветра и водене струје. У Прилогу 3 дате су смернице за мерења перформанси једрилице и анализу измерених резултата помоћу метода приказаних у оквиру истраживања. У Прилогу 4 дат је кратак опис развијеног програма.

1.2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Иако се ветар већ дуго не користи за погон комерцијалних бродова, а једрилице имају првенствено спортску и рекреативну сврху, истраживања кретања једрилица су веома бројна, и на њих се примењују најсавременије методе аеродинамике и хидродинамике, динамике, и чврстоће брода. Постоји низ часописа и тематских конференција које се баве баш овом проблематиком. Циљ већине радова из ове области је побољшање перформанси једрилица применом савремених метода, новог софтвера и експерименталних мерења. До недавно, истраживања су се углавном бавила стационарним кретањем једрилица под дејством константог ветра.

У литератури се могу наћи књиге и радови који су коришћени при истраживању. Прво треба споменути фундаменталне књиге у области бродоградње и бродској хидродинамици (референце [1],[2],[3]), ту су и фундаменталне књиге из динамике брода [4], [5], али као битну треба споменути и рефернцу [6], иако је књига у припреми, током истраживања је доста коришћена. Свакоко треба споменути и референцу [7], у којој су да дате основе кретања брода на таласима и изведене једначине кретања. Основне књиге су [8] и [9] које се баве аерохидродинамиком једрилица и у којима је дат опширан опис мерења коефицијената једара у ваздушном тунелу. Не сме се изоставити ни књига [10] у којој је дат комплетан поступак пројектовања једрилице YD-40 која је коришћена као еталон једрилица током прорачуна. Најновија књига је [11], можда и најбоља

у овој области, у којој су описане све методе које се данас користе при процени кретања једрилица. Треба нагласити да данашња истраживања углавном покрећу регате (трке једрилица), посебно најпрестижнија Куп Америке (American's Cup) [12]. Тако се формирало више центара у свету који данас воде главну улогу у истраживањима. Тако да имамо истраживачке тимове, један је на Делфтском универзитету, и доста су активни на пољу моделских испитивања, формирању математичких модела, усавршавању изданака, итд. Неке од референци [13], [14], [15], [16], [17],[18]. Друга група се формирала на Новом Зеланду, Универзитет у Окланду, такође се баве мерењима, математичким моделима, као и CFD-ом, неке од референци [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]. Следећу групу предводи Масујама, они се баве и мерењима у природној величини и прављењем математичким модела кретања, једначине које се највише користе при кретању једрилица су њихове [29], [30], [31]. Имамо групу Америчких истраживача, неке од њихових значајнијих референци су [32], [33], [34], [35]. Још једна група је у Италији, предвођени Фосатијем, значајне референце [36], [37], [38], [39], [40]. У Француској исто имамо формирану групу која је бави мерењима у пуној величини и развојем математичких модела помоћу којих пореде резултате, њихове референце [41], [42], [43], [44], [45], [46]. Такође и у Аустралији постоји група истраживача која се аерохидродинамиком једрилица, референце [47], [48], [49], [50], [51], [52]. Што се тиче мерења занимљиве су још и референце [53], [54]. Постоје и радови у којима се разматрају математички модели кретања и примена модела оптимизације кретања, [55], [56], [57],[58]. Референце [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67] су занимљиве са становишта пројектовања, примене разних врста изданака, и изради аутономних једрилица, CFD анализи, као и примене регатних правила.

Предвиђање кретања једрилица је један од основних делова пројектовања једне једрилице. Тако је на Катедри за бродоградњу развијено и неколико поступака за одређивање перформанси једрилица, почевши од референце [68], [69], [70], [71] . Примењене методе и модел ветра дат је у рефернцама [72], [73], а оригинално мерење и модел ветра дат је у референци [74]. Референце [75], [76], [77], [78], [79] се користе код дефинисања хидродинамичких коефицијената. Референце [80], [81], [82], [83] , [84] баве се вештачким неуронским мрежама, како

теоријским основама тако и практичним, примењеним у бродској хидродинамици. Референца [85] је комерцијални софтвер који је коришћен за поређење и валидизацију резултата. Референца [86] је једини рад који је пронађен, а бави се утицајем водене струје на кретање једрилице.

Треба споменути најзначајније конференције из ове области:

- HISWA (International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction) [87] одржава се на сваке две године у Амстердаму, Холандија
- HPYD (High Performance Yacht Design Conference) [88] која се одржава на сваке две године у Окланду, Нови Зеланд
- CSYS (Chesapeake Sailing Yacht Symposium) [89] који се одржава на сваке две године у Анаполису, Мериленд, САД
- INNOV'SAIL (International Conference On Innovation in High Performance Sailing Yacht) [90] која се одржава у Лориену, Француска, је конференција са најкраћим стажовом, али већ има значајну улогу у области перформанси једрилица.

Организациони одбори последње три конференције се договорили да се конференције одржавају у трогодишњим циклусима, сваке године по једна конференција почевши од 2015 године.

2

ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ КРЕТАЊА ЈЕДРИЛИЦЕ

2.1. ОПШТИ УВОД У ДИНАМИКУ БРОДА

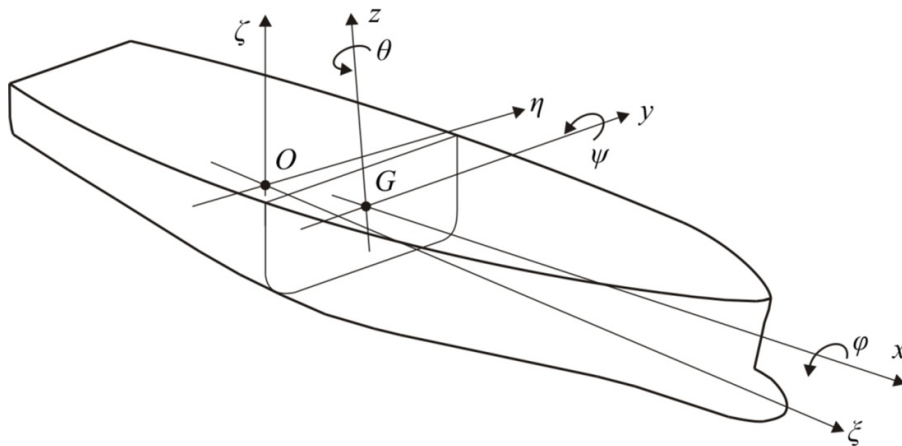
Брод на олујном мору представља, језиком Механике, типичан пример кретања крутог тела са свих шест степени слободе. Силе које ствара ветар, узбуркана вода и таласи делују неухватљиво за било какву теоријску анализу, а љуљање изгледа застрашујуће не само за људе на броду, већ и за нас који треба да га прорачунавамо.

Како решити овакав проблем? Кренућемо од самих почетака – од фундаменталних једначина динамике крутог тела. Користићемо хидродинамику, статистику, али и низ упрошћења и полу-емпиријских формула...

Данас се област динамике брода (љуљања, понашања брода на таласима) највише развија у области бродоградње. Постоји низ књига и радова из ове области. Неке од фундаменталних књига дате су у списку литературе, референце [1], [2], [3], [4], новија књига је референца [5]. Такође је веома значајан и рад који се бави кретањем брода и хидродинамичким силама [7]. Референца [6] је књига у припреми професора Хофмана „Понашање брода на таласима“, која на веома лак и једноставан начин читаоцу дочарава веома компликовану проблематику динамике брода. Тако да је општи увод у динамику брода делимично преузет из те књиге.

Брод, док плови по узбурканом мору представља (језиком Механике) круто тело које врши опште кретање. При проучавању оваквог кретања, као што је познато, уводе се два координатна система: покретни (сопствени) координатни систем везан за тело, и непокретни - инерцијални координатни систем. Избор ових система је донекле произвољан и прилагођава се проблему који треба решити.

При анализи љуљања брода, покретни координатни систем x, y, z се везује за брод, а његов почетак усваја у тежишту брода G . При томе је оса x уздужна оса усмерена ка прамцу брода, а оса y попречна оса брода. Трећа оса z лежи у равни симетрије брода и усмерена је навише (слика 2.1). У случају равнотежне пловидбе брода (пловидбе по мирној води без љуљања, али и без трима и нагиба) уведене осе x и y биле би хоризонталне, а оса z вертикална. На таласима, током љуљања, све три осе задржавају свој правац у односу на брод, али стално мењају свој положај у простору.



Слика 2.1. Координатни системи при анализи љуљања брода: сопствени систем x, y, z и инерцијални систем ξ, η, ζ

Други координатни систем који уводимо није, како је то уобичајено у механици, непокретан, већ се креће транслаторно константном брзином напредовања брода v_0 . Тако уведени систем, иако није непокретан, јесте инерцијалан. Координатни почетак овог система O и његове осе ξ, η, ζ усвојене су тако да се при равнотежној пловидби два уведена координатна система поклапају. При љуљању брода, тежиште G се током времена t помера у односу на

координатни почетак O , а брод се, као круто тело, обрће (љуља) око својих оса x , y и z . Координате тежишта G су током љуљања функције времена $\xi_G(t)$, $\eta_G(t)$ и $\zeta_G(t)$, а углови обртања (углови нагиба) брода око његових сопствених оса су $\varphi(t)$, $\psi(t)$, $\theta(t)$. Овако уведене координате претстављају померања брода у односу на равнотежни положај пливања. Језиком механике, то су шест генералисаних координата које описују свих шест степени слободe општег кретања крутог тела.

У проблему љуљања брода, свака од шест генералисаних координата (шест компоненти љуљања) има и своје име. То су:

ξ_G - залетање (*surge*),

η_G - заношење (*sway*),

ζ_G - понирање (*heave*),

φ - ваљање (*roll*),

ψ - посртање (*pitch*),

θ - закретање (*yaw*),

где су у загради дати и одговарајући енглески називи.

Читалац би овде требало да застане, размисли, и сроди се са уведеним координатним системима и кретањима брода. Не само да замисли брод на узбурканом мору гледан споља (да буде непокретан посматрач), већ да замисли да је на броду, да се држи за неки од бродских јарбола (који би могао бити оса z), и да, изложен ветру и таласима, осети уведене компоненте љуљања.

За одређивање компоненти љуљања брода примењује се Њутнов закон

$$m_B \cdot \vec{a}_G = \vec{F}_R, \quad (1.1)$$

где је m_B маса брода, \vec{a}_G убрзање његовог тежишта, а \vec{F}_R резултујућа сила која делује на брод. Уз то, примењује се и закон о промени момента количине кретања

$$\frac{d\vec{L}_G}{dt} = \vec{M}_G, \quad (1.2)$$

где је \vec{L}_G момент количине кретања, а \vec{M}_G резултујући момент свих сила за тежиште брода. Сила \vec{F}_R се (у принципу) састоји из три дела: из тежине брода $\vec{W} = m_B \cdot \vec{g}$, где је \vec{g} убрзање Земљине теже, силе с којом вода делује на труп брода \vec{F}_W , а чије пројекције на непокретне осе обележавамо са $F_{W\xi}, F_{W\eta}, F_{W\zeta}$, и коначно из силе ветра \vec{F}_V , а чије пројекције на непокретне осе обележавамо са $F_{V\xi}, F_{V\eta}, F_{V\zeta}$. Силу ветра у скоро свим радовима и књигама које се баве љуљањем брода аутори занемарујемо, што у оквиру овог рада неће бити случај, а ова проблематика више је обрађена у наредним поглављима.

Векторске једначине (1.1) и (1.2) треба пројектовати на осе уведених координатних система. Њутнов закон пројектујемо на осе инерцијалног система ξ, η, ζ и, након што искористимо чињеницу да је маса брода једнака његовом депласману $m_B = \Delta$, добијамо три диференцијалне једначине

$$\begin{aligned} \Delta \cdot \ddot{\xi}_G &= F_{W\xi} + F_{V\xi} \\ \Delta \cdot \ddot{\eta}_G &= F_{W\eta} + F_{V\eta} \\ \Delta \cdot \ddot{\zeta}_G &= F_{W\zeta} + F_{V\zeta} - \Delta \cdot g \end{aligned} \quad (1.3)$$

где су са $\ddot{\xi}_G, \ddot{\eta}_G, \ddot{\zeta}_G$ обележене три пројекције убрзања тежишта брода. Добијене једначине су, редом, диференцијалне једначине залетања, занешења и понирања брода.

Закон о промени момента количине кретања пројектујемо на сопствене осе x, y, z и добијамо следеће три једначине

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\phi} + (J_z - J_y) \dot{\psi} \dot{\theta} - J_{xz} (\ddot{\theta} + \dot{\phi} \dot{\psi}) &= M_x, \\ J_y \ddot{\psi} + (J_x - J_z) \dot{\phi} \dot{\theta} + J_{xz} (\dot{\phi}^2 - \dot{\theta}^2) &= M_y, \\ J_z \ddot{\theta} + (J_y - J_x) \dot{\psi} \dot{\phi} - J_{xz} (\ddot{\phi} - \dot{\psi} \dot{\theta}) &= M_z. \end{aligned} \quad (1.4)$$

То су, редом, једначина ваљања, посртања и закретања брода. У овим једначинама J_x, J_y, J_z су аксијални, а $J_{xz} = J_{zx}$ центрифугални моменти инерције брода. Са M_x, M_y и M_z обележене су пројекције вектора \vec{M}_G , односно резултујући моменти за координатне осе x, y и z . Треба уочити да је оса y (као оса управна на раван симетрије) главна оса инерције брода. С тога важи

$$J_{xy} = J_{yx} = 0, \quad J_{yz} = J_{zy} = 0,$$

па се у једначинама (1.4) не јављају чланови које множе ова четири центрифугална момента инерције.

Једначине (1.4) су изузетно сложене. Могуће је, међутим, увести два битна упрошћења, једно везано за облик брода, а друго за величину љуљања.

Потребно је, прво, уочити да је и преостали центрифугални момент инерције брода J_{xz} мали у односу на аксијалне моменте инерције. Наиме, када би прамчани и крмени делови брода били једнаки (када би постојала симетрија брода у односу на главно ребро), оса x би била главна оса инерције брода, а центрифугални момент инерције J_{xz} не би постојао. Геометрија и распоред маса уобичајених бродова не задовољава овај услов, али извесна груба симетрија прамац – крма ипак постоји. Стога је центрифугални момент J_{xz} мали, битно мањи од аксијалних момената инерције брода J_x, J_y, J_z , а чланови у једначинама (1.4) које он множи су занемарљиви.

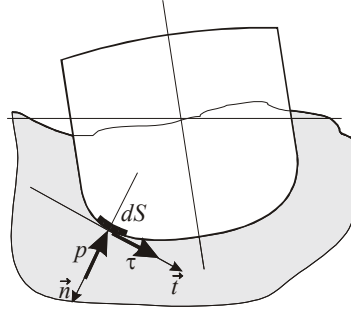
Претпоставимо, даље, да су углови ваљања, посртања и закретања брода $\varphi(t), \psi(t), \theta(t)$, за све време кретања мали. Тада су и угаоне брзине $\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}$ мале величине, па одговарајући нелинеарни чланови на левој страни једначина (1.4) постају занемарљиви. Након њиховог занемарења, односно након извршене линеаризације, једначине ваљања, посртања и закретања гласе

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\varphi} &= M_x, \\ J_y \ddot{\psi} &= M_y, \\ J_z \ddot{\theta} &= M_z. \end{aligned} \tag{1.5}$$

Претпоставка о малим угловима (у радијанима) је оправдана до углава од приближно 5° . Углови посртања и закретања ψ , θ ретко прелазе ову вредност. Насупрот томе, угао ваљања φ је у многим технички важним проблемима знатно већи од ове вредности, и с тог аспекта линеаризација леве стране једначина (1.4) није увек коректна. Ипак, треба уочити да извршена линеаризација диференцијалне једначине ваљања јесте коректна и у случају већих углава φ , ако при ваљању нема посртања или закретања брода.

Системи диференцијалних једначина (1.3) и (1.5) могу се, након уведених упрошћења, учинити једноставни. На жалост, једначине не делују “опасно” само зато што није дотакнута њихова десна страна. Хидродинамичке силе и моменти, као и сила ветра и моменти који су груписани на десној страни једначина садрже, међутим, сложену интеракцију флуида (са слободном површином и таласима на њој) и тела (брода) које врши опште кретања, као и утицај ветра. Поједине компоненте ових сила и момента не само да могу бити нелинеарне, већ могу истовремено зависити од више генерализаних координата (од више компоненти кретања) и на тај начин спрезати диференцијалне једначине љуљања.

Из хидромеханике је познато да се сила с којом течност делује на елементарну површину тела може поделити на притисак p (управан на површину и усмерен ка њој) и смичући напон τ (који делује у тангенцијалној равни насупрот брзини струјања), слика 1.2. Оваква подела је физички оправдана, с обзиром да је смичући напон искључиво последица вискозности, односно да не може постојати у идеалној (невискозној) течности. Занемарењем вискозности не само да се искључује τ напон, већ се омогућава и увођење функције потенцијала брзине струјања, чиме се вишеструко олакшава теоријска анализа хидродинамичког проблема. Модел идеалне течности је зато примамљив, али доводи понекад и до апсурдних резултата (сетимо се нпр. отпора тела у идеалном флуиду). На срећу, у проблемима љуљања брода, утицај вискозности јесте мали, односно апроксимација идеалне течности је релативно добра и оправдана. Изузетак је ваљање брода, где тангенцијалне силе играју значајнију улогу, и где ћемо бити принуђени да, при прорачунима пригушења, узмемо у обзир и утицај вискозних ефеката.



Слика 2.2. Силе које делују на елемент површине подводног дела брода у попречној равни.

Да би се, у принципу, одредила сила с којом идеални флуид делује на брод, потребно је интегралити притисак по целој оквашеној површини S

$$\vec{F}_V = - \int_S p \vec{n} dS, \quad (1.6)$$

где је \vec{n} јединични вектор нормале на елементарну површину оплате dS , на коју делује притисак p . Притисак следи из тзв. Коши-Лагранжевог интеграла Ојлерове једначине

$$p(\xi, \eta, \zeta, t) = p_{at} - \rho g \zeta - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right)^2 \right], \quad (1.7)$$

где је p_{at} атмосферски притисак који влада на слободној површини течности, док је $\phi = \phi(\xi, \eta, \zeta, t)$ потенцијал брзине струјања. С тога, да би се одредила сила која делује на брод, неопходно је (претходно) одредити потенцијал брзине, односно решити Лапласову парцијалну диференцијалну једначину која описује ову величину. У уведеном инерцијалном координатном систему, Лапласова једначина гласи

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \zeta^2} = 0, \quad (1.8)$$

при чему треба наћи оно њено решење ове једначине које задовољава граничне услове проблема – у посматраном случају на оплати брода и на слободној површини течности.

Приказани пут за одређивање хидродинамичке силе, нарочито део који се односи на решавање саме Лапласове једначине, је изузетно сложен. Овде је дат само формално, и треба га схватити само као алгоритам унутар кога ће бити потребно извршити цео низ додатних претпоставки и апроксимација, везаних за конкретне случајеве љуљања брода.

Вратимо се на диференцијалне једначине (1.3) и (1.5) и кретања која оне описују. Свих шест кретања, како је и речено, представљају померања тела у односу на његов равнотежни положај. Важно је, међутим, уочити да се природа равнотеже за поједина кретања суштински разликује. За три кретања: понирање, ваљање и посртање, реч је о положају стабилне равнотеже, док је за преостала кретања: залетање, заношење и закретање, у питању индиферентни положај равнотеже. Само у случају када се тело изведе из положаја стабилне равнотеже, долази до његовог осциловања, односно кретање поседује одговарајућу сопствену фреквенцију. С друге стране, само ако постоји сопствена фреквенција осциловања може, уколико постоји и одговарајућа осцилаторна побуда, доћи до појаве резонанције. Значи, у проблему љуљања брода постоје само сопствене фреквенције ваљања, понирања и посртања, и до резонанције на таласима може доћи само код ова три кретања. Резонанција при залетању, заношењу и закретању, не постоји. С резонанцијом су се читаоци већ добро упознали и препознају је као важну и опасну појаву која се јавља у многим областима технике. Тако је и код љуљања брода на таласима, где резонанција може довести до великих и изузетно опасних нагиба, померања и убрзања...

Силе које делују на брод. Резултујућа сила F_R се састоји од три компоненте: тежине брода, хидродинамичке силе (силе којом вода делује на труп) и аеродинамичке силе (силе којима ветар делује на надводни део брода, у разматраном случају силе које дају погон једрилици).

Силе којима вода делује на брод могу се поделити на неколико група:

- **хидростатичке силе** – јављају се и при мировању, теже да врате брод у равнотежни положај и пропорционалне су померањима брода при љуљању, то су узгон при понирању, момент стабилитета и момент трима;
- **хидродинамичке силе** – јављају се при кретању брода и могу се поделити на:

- **силе отпора и пригушења** - иако је вискозност воде најчешће занемарена, силе отпора и пригушења ипак постоје тј. при кретању брода на слободној површини се индукују таласи који се шире од бокова брода и односе енергију кретања; ове силе су пропорционалне брзинама које настају при љуљању
- **инерцијалне силе** су пропорционалне убрзањима која настају при љуљању брода и могу се изразити преко одговарајућих додатних маса (јер при љуљању труп брода доводи у кретање одређену количину воде);
- **принудне силе**, које карактеришу утицај заталасане површине воде на брод; ове силе су функција времена, и могу се поделити на:
 - главни део принудних сила, који се одређује из претпоставке да у свакој тачки потопљене површине делује притисак који би деловао и да се присуство брода занемари (Хипотеза Фруда и Крилова);
 - допунски део принудних сила, који узима у обзир присуство брода, тј. обухвата и дифракцију таласа (појаву таласа одбијених од трупа брода који је препрека њиховом простирању).

Силе којима ветар делује на брод могу се поделити на:

- силу у правцу кретања, која у разматраном случају даје погон једрилици
- бочну силу, која у разматраном случају накреће једрилицу

Хидродинамички коефицијенти љуљања. Већ је речено да су хидродинамичке силе дате преко одговарајућих додатних маса и пригушења. Ове величине добијамо свођењем тродимензионалног проблема (струјања око брода) на равански проблем струјања око „траке“ (елемент трупа брода дужине dx). Лако је доказати да док су углови посртања мали (а претпостављамо да јесу) и брод довољно витак и без наглих прелаза, поремећај струјања око брода је у вертикалним равнима тј. струјање је раванско. Значи треба одредити додатну масу и пригушење ребра односно „траке“ (m' , n') (STRIP теорија), а онда је лако одредити све коефицијенте за брод интеграљењем по дужини брода. Међутим ни овај $2D$ проблем није баш једноставан, јер ребра брода немају облик математичке функције, а и индукују се таласи на површини воде. Решење се добија Луисовом трансформацијом, то је апроксимација облика стварног ребра Луисовим ребром

(које дефинишемо параметрима V/T и β). Додатна маса и пригушење зависе и од фреквенције, па се бројне вредности могу добити из испрограмираног теоријског решења или из одговарајућих дијаграма. За одређивање ових коефицијената се могу користити већ постојећи комерцијални програми, али мора бити позната форма трупа брода (план бродских линија). У поглављу 2.5.2. је приказан и приближни поступак за одређивање ових коефицијената.

На основу општих теоријских основа динамике брода формираће се математички модел кретања једрилице под утицајем променљивог, хаотичног ветра у воденој струји.

2.2. КРЕТАЊА ЈЕДРИЛИЦЕ У ВОДеноЈ СТРУЈИ ПРИ УТИЦАЈУ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА

Једрилице су фасцинантни објекти, како за једриличаре, тако и посматрче, поготову на регатном пољу, али су такође и врло сложене машине. Једрилице су објекти који се крећу кроз два флуида (ваздух и воду) и у сталној су интеракцији са њима, преко сила од ветра, таласа или водене струје. За разлику од других типова бродова, једрилице су специфичне и по томе што за њихово кретање је неопходан ветар.

Ветар је, генерално, временски завистан феномен, тако да (због променљиве силе ветра) кретање једрилице не може бити стационарно. Упркос томе, у већини истраживања, перформансе једрилице (њена брзина, заношење, итд.) сматрају се константним, а утицај удара ветра се занемарује. У оквиру овог истраживања примењују се иновативне технике развијене у анализи утицаја променљивог ветра на стабилитет и сигурност брода [72],[73], а анализа обухвата ударе ветра и последице на нестационарно кретање једрилице. Утицај таласа на једрилицу није разматран, али је уведен нови утицај водене струје.

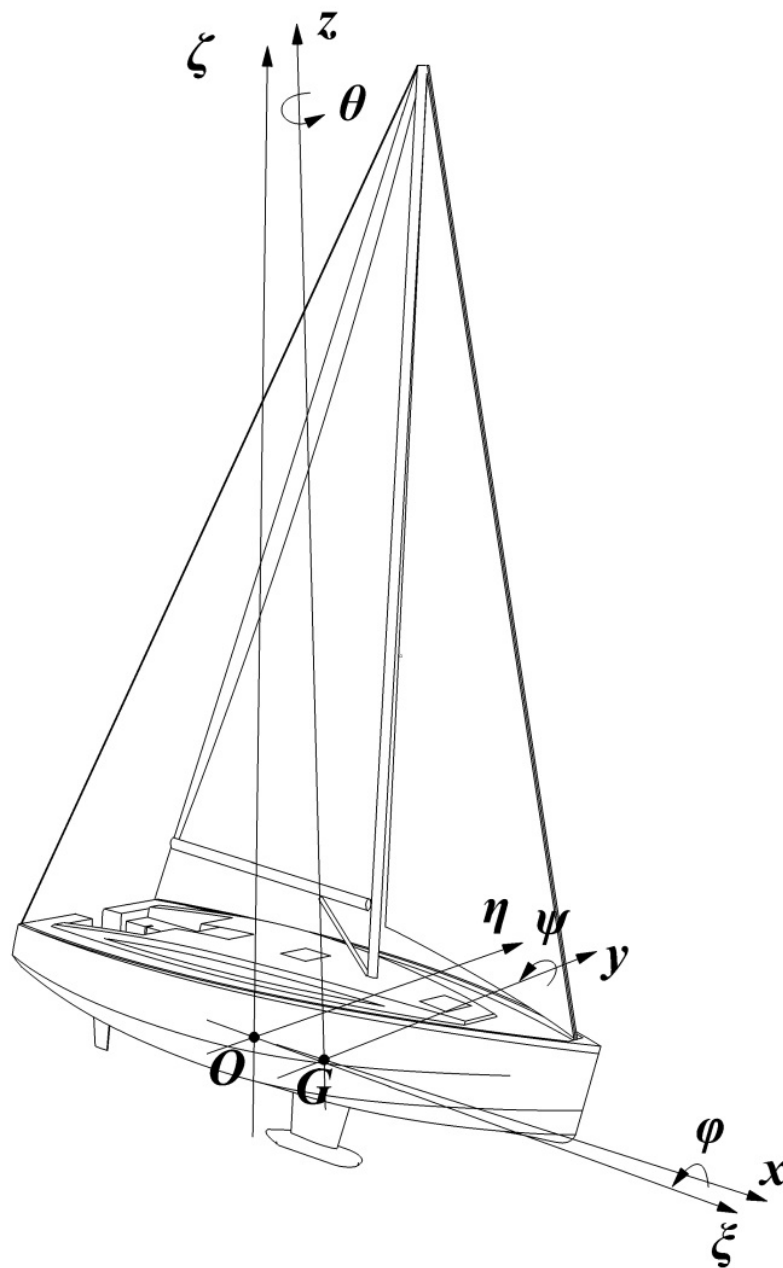
Водена струја мења апсолутну брзину пловидбе једрилице, тиме утиче на привидну брзину ветра и мења аеродинамичке силе, што повратно делује на

хидродинамичке силе које делују на труп... Проблем је зато неопходно решавати сложеним итеративним поступком, који је приказан у даљој анализи. С обзиром да нису нађени радови који се баве овом проблематиком (осим једног текста [86], о чему ће више речи бити у поглављу 3), и да је у класичној бродској хидродинамици (која не укључује ветар) утицај водене струје крајње једноставан, постојала је бојазан да ће добијена решења бити тривијална. Напротив, добијена је веома интересантна и сложена интеракција брзина водене струје, брзине ветра и брзине једрилице, значајна како за пројектовање једрилице, тако и за примену на регатама које се возе по рекама и областима с јаким морским струјама.

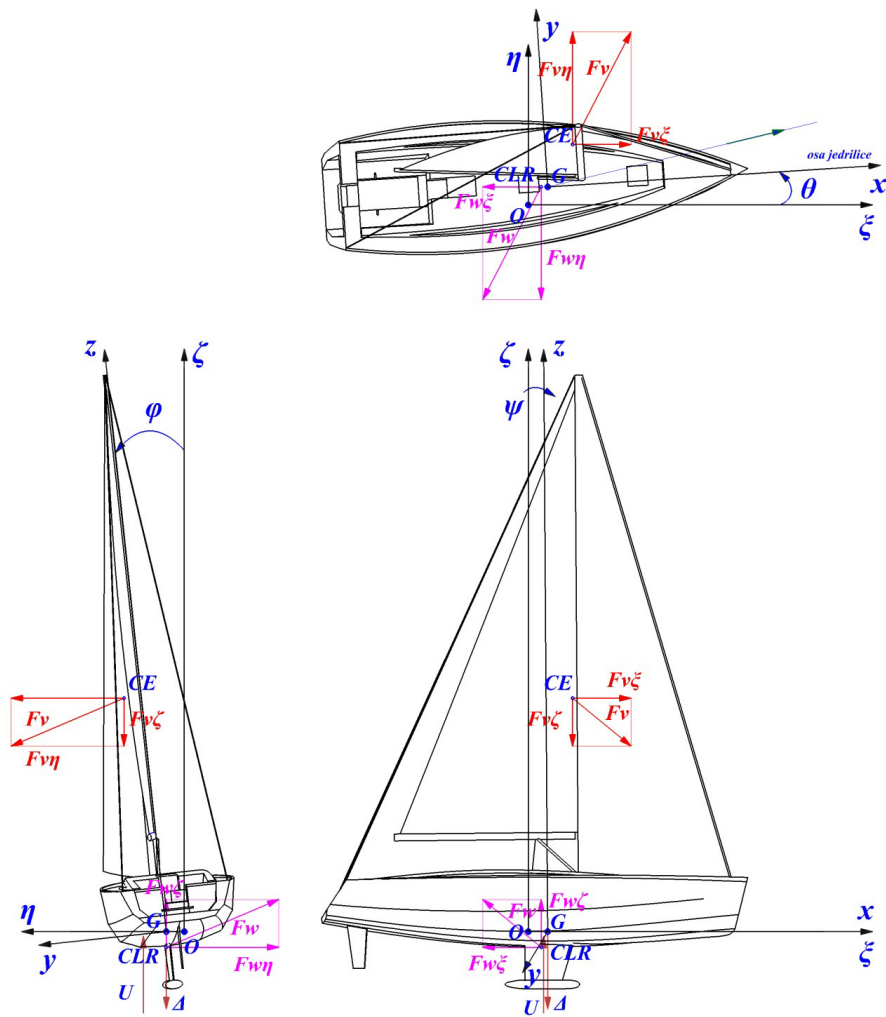
Сада, за претпостављене сложене услове нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји, треба извести спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања. Треба рећи да се у теорији брода користе два приступа при извођењу диференцијалних једначина кретања. Једначине се могу извести у покретном координатном систему везаном за променљиво кретање тежишта брода. Такав поступак се, углавном, користи при решавању проблема везаних за кормиларења брода. Диференцијалне једначине је могуће извести и у инерцијалном координатном систему везаном за стационарно кретање тежишта брода, у односу на који брод врши осциловање. Овај приступ се користи у решавању проблема кретања брода на таласима. За кретање једрилица су се, по правилу, до сада користиле једначине неинерцијалног координатног система, референца [29]. У овом истраживању се, по први пут, изводе једначине динамике једрилице у инерцијалном координатном систему, слика 2.3., какав се користи при анализи кретања брода на таласима. Овакав приступ, између осталог, омогућава прецизније одређивање хидродинамичких коефицијената, и коришћење већ постојећих програма за њихов прорачун.

За постављене услове кретања треба извести спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања и то залетање, ваљање, заносење и закретање једрилице. Преостала два кретања (понирање и посртање) нису релевантна за кретање на мирној води, тј. кад нема утицаја таласа. Из ових разлога на слици 2.4. осе ζ и x остају у хоризонталној равни. На слици 2.4. су приказане и резултате и компоненте сила које делују на

једрилицу. На једрилицу делују аеродинамичке и хидродинамичке силе, начини њиховог одређивања дати су у даљој анализи.



Слика 2.3. Координатни системи при анализи кретања једрилице: сопствени систем x, y, z и инерцијални систем ξ, η, ζ



Слика 2.4. Пројекције координатних система и сила које делују на једрилицу

2.3. СПРЕГНУТЕ ЈЕДНАЧИНЕ КРЕТАЊА ЈЕДРИЛИЦЕ ПРИ ДЕЈСТВУ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА

Како би се најбоље сагледали сви утицаји, мора се посматрати кретање једрилице у неком временском периоду. На основу општих једначина динамике брода (1.3) и (1.5) добијају се, за сложене услове нестационарног кретања једрилице под дејством хаотичног ветра у воденој струји, спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе једрилице са четири степена слободe кретања:

- Залетање

$$\begin{aligned} (\Delta + m_\xi) \cdot \ddot{\xi} + n_\xi \cdot \dot{\xi} &= \\ &= F_{w\xi}(V_{aw}) - F_\xi(\dot{\xi}) - F_\xi(\varphi) - F_\xi(\dot{\eta}) - F_\xi(\theta) \end{aligned} \quad (1.9)$$

- Заношење

$$\begin{aligned} (\Delta + m_\eta) \cdot \ddot{\eta} + n_\eta \cdot \dot{\eta} &= \\ &= F_{w\eta}(V_{aw}) - F_\eta(\dot{\eta}) - F_\eta(\varphi) - F_\eta(\dot{\xi}) - F_\eta(\theta) \end{aligned} \quad (1.10)$$

- Ваљање

$$\begin{aligned} (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + M_d(\dot{\varphi}) + M_{st}(\varphi) &= \\ &= M_w(V_{aw}) + M_{Fh}(\dot{\eta}) + M_{Fh}(\dot{\varphi}) \end{aligned} \quad (1.11)$$

- Закретање

$$\begin{aligned} (J_z + m_\theta) \cdot \ddot{\theta} + M_n(\dot{\theta}) &= \\ &= M_{w\theta}(V_{aw}) + M_{Fh}(\dot{\eta}) + M_{Fh}(\dot{\varphi}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Δ је депласман једрилице, m_ξ је додатна маса при залетању и n_ξ је пригушење при залетању, $F_{w\xi}(V_{aw})$ и $F_\xi(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \theta)$ су сила узгона једра и сила отпора у правцу кретања, респективно. Додатна маса при заносу је m_η и n_η је пригушење при заносу, $F_{w\eta}(V_{aw})$ и $F_\eta(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \theta)$ су бочна сила ветра и бочна сила на труп у правцу управном на кретање, респективно. J_x је момент инерције једрилице за осу x , m_φ је додатна маса при ваљању; M_d и M_{st} су моменти пригушења ваљања и момент стабилитета, J_z је момент инерције једрилице за осу z , m_θ је додатна маса при закретању, а $M_{w\theta}(V_{aw})$ и $M_{Fh}(\dot{\eta}, \dot{\varphi})$ момент ветра и момент силе на труп око осе x , респективно.

Диференцијалне једначине кретања се решавају нумеричким путем, коришћењем методе Рунге-Кута (*Runge-Kutta method*), и одређује залетање, ваљање, заносу и закретање једрилице у функцији времена. Модел ветра који се примењује симулира стварни ветар, а промена интензитета брзине ветра не може се унапред предвидети, а добијени резултати у себи садрже дозу случајности, зато је неопходно резултате статистички анализирати. Зато се врши

стохастичка анализа добијених кретања, и тражи средња брзина пловидбе, средњи угао ваљања, средњи угао заношења једрилице под различитим условима – у случају да се једра поставе у фиксан (оптималан) положај у односу на стационарно кретање, и у случају да је положај једара променљив, и да одговара тренутном оптимуму. Анализира се утицај брзине и правца ветра, брзине и правца водене струје, положаја једара, и одређује евентуално повећања средње брзине пловидбе које се постиже правилним позиционирањем једара током реалног, нестационарног једрења. Анализа резултата је дата и поглављима 4 и 5.

Такође, као основни случај динамичке равнотеже, треба решити и стационарно кретање једрилице, са и без утицаја водене струје, за константан ветар, што је дато у поглављу 3.

Силе које делују на једрилицу, и аеродинамичке и хидродинамичке, веома су сложене и у сталној интеракцији током кретања, тако да треба објаснити поступке за моделирање аеродинамичких сила које делују на једра, и хидродинамичких сила које делују на труп брода. За моделирање утицаја водене струје на кретање једрилице дат је оригинални поступак, а описан је и поступак симулације променљивог, хаотичног ветра на основу енергетског спектра ветра, који до сада није примењиван у проблемима динамике једрилица. Објашњен је и поступак оптимизације положаја једара, са циљем добијања максималне узгонске силе једара и повећања брзине пловидбе.

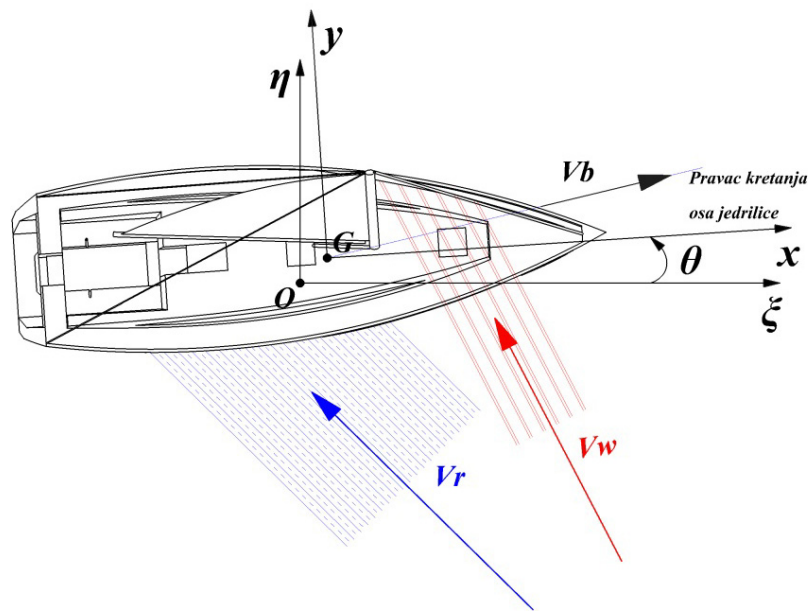
Када су објашење појединачне компоненте и поступци њиховог одређивања, могуће је једначине (1.9)-(1.12) написати у развијеном облику.

2.4. ТРОУГЛОВИ БРЗИНА

Већ је наглашено да се једрилица креће кроз два флуида и да је у сталној интеракцији са њима, поготово што за кретање једрилице је неопходан ветар. У овом истраживању се примењује променљиви ветар што ће касније бити објашњено, али сад ћемо приказати као да делује константан ветар, тј.

посматраћемо један временски тренутак и видети шта се дешава са једрилицом која једри у воденој струји. Принцип важи и за променљиве брзине, само се вредности мењају.

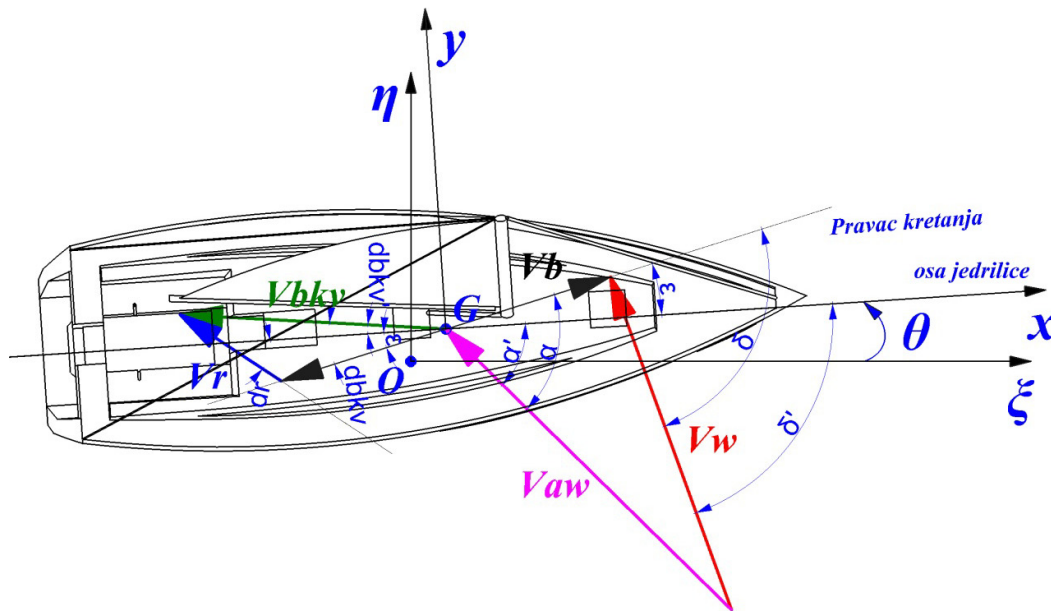
У класичној динамици флуида, обично се разматра случај у коме објекат мирује а на њега наструјава струја флуида, или се објекат креће кроз флуид, а флуид мирује. У случају кретања једрилице није тако, имамо кретање и објекта и флуида, при чему се јављају привидне брзине наструјавања. Проблем се још више компликује ако разматрамо кретање једрилице у воденој струји, где сад имамо различите брзине кретања кроз водену струју и кроз струју ваздуха (ветар). Тешко се на први поглед сродити са оваквим кретањем. На слици 2.5. приказане су брзине у односу на непокретног посматрача и то брзина кретања тежишта једрилице V_B (која зависи од брзина ветра и водене струје), брзина стварног ветра V_w (користи се и ознака TWS , од енглеског *true wind speed*) и брзина водене струје V_r .



Слика 2.5. Брзине кретања једрилице, ветра и водене струје

На основу брзина кретања једрилице, ветра и водене струје могу се увести и релативна брзина кретања једрилице кроз водену струју и привидна брзина ветра која наструјава на једра. Тако да за прорачуне хидродинамичких сила треба

узимати, као меродавну, релативну брзину једрилице у односу на водену струју V_{Bkv} , а за одређивање аеродинамичких сила, као меродавну треба узети привидну брзину ветра V_{aw} (користи се и ознака AWS , од енглеског *apparent wind speed*). На слици 2.6. су приказани векторски троуглови брзина, са пратећим угловима наструјавања који су битни за даља извођења једначина. Углови су дефинисани у односу на осу једрилице (имају ознаку $'$), али и у односу на правац кретања. Прва дефиниција је битна при анализи мерења у реалним условима (прилог 1), а друга је битна за статичку равнотежу, тј. то је уобичајени начин дефинисања при кретању једрилица.



Слика 2.6. Троуглови брзина

Имамо следеће углове:

- Угао заносења ε - угао између осе једрилице и правца кретања
- Угао стварног ветра δ' - угао између правца стварног ветра и осе једрилице
- Угао стварног ветра $\delta = \delta' + \varepsilon$ - угао између правца стварног ветра и правца кретања (користи се и ознака TWA , од енглеског *true wind angle*)
- Угао привидног ветра α' - угао између правца привидног ветра и осе једрилице

- Угао привидног ветра $\alpha = \alpha' + \varepsilon$ - угао између правца привидног ветра и правца кретања (користи се и ознака AWA , од енглеског *apparent wind angle*)
- Угао водене струје d_r - угао између правца водене струје и осе једрилице
- Угао релативне брзине d'_{Bkv} - угао између правца релативне брзине и осе једрилице
- Угао релативне брзине $d_{Bkv} = d'_{Bkv} + \varepsilon$ - угао између правца релативне брзине и правца кретања једрилице

Може се успоставити и веза између брзина и углова. Овде ћемо је приказати помоћу синусне и косинусне теореме, а веза се може добити и пројектовањем брзина на осе координатног система. Везе су:

- Привидна брзина ветра

$$V_{aw}^2 = V_B^2 + V_w^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_w \cdot \cos \delta \quad \text{и} \quad \frac{V_{aw}}{\sin \delta} = \frac{V_w}{\sin \alpha} \quad (1.13)$$

- Релативна брзина једрилице

$$V_{Bkv}^2 = V_B^2 + V_r^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_r \cdot \cos(d_r + \varepsilon) \quad \text{и} \quad \frac{V_{Bkv}}{\sin(d_r + \varepsilon)} = \frac{V_r}{d_{Bkv}} \quad (1.14)$$

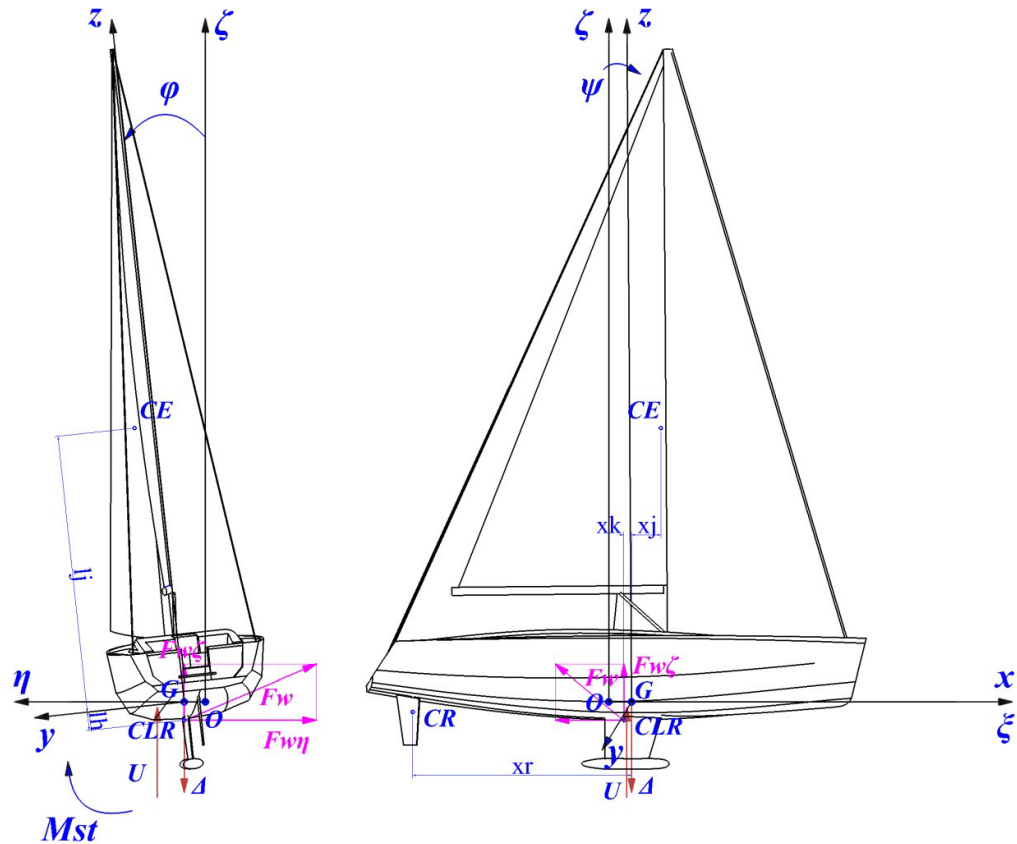
Брзине и правци ветра и водене струје су улазне величине, а брзина и правац кретања једрилице су решење, али се због сложености појава морају претпостави и проблем решавати итеративно, све док се претпостављене и израчунате вредности не поклопе. Више о овоме је дато у наредним поглављима.

2.5. ХИДРОДИНАМИЧКЕ СИЛЕ

Силе којима вода делује на труп једрилице, као што смо видели могу се поделити на хидростатичке силе (узгон, момент стабилитета, момент трима) и хидродинамичке (силе отпора и пригушења, инерцијалне силе и принудне силе). На слици 2.7. приказане су геометријске карактеристике једрилице и

хидродинамичке силе које делују на једрилицу, а детаљне карактеристике су дате у прилогу 1.

Хидродинамичке силе отпора које делују на труп једрилице одређују на бази семи-емпирујских полинома тзв. Делфтске серије једрилица, при чему се, као меродавна брзина, узима релативна брзина једрилице у односу на водену струју. Хидродинамичке инерцијалне силе и силе пригушења су дате преко одговарајућих хидродинамичких коефицијената додатних маса и пригушења.



Слика 2.7. Геометријске карактеристике

2.5.1. Хидростатичке силе и моменти

Хидростатичке силе и моменти који делују на једрилицу су сила узгона и момент стабилитета. Сила узгона је супротна сили тежине једрилице и природно је уравнотежена, тако да неће ући у разматрање. С друге стране момент стабилитета једрилице је веома важан, описује способност једрилице да се супротстави спољним мометима од ветра и воде (таласа).

Коришћен је упрошћен израз за момент стабилитета M_{st} , који лако може да се добије за било коју метацентарску висину је:

$$M_{st}(\varphi) = g \Delta \cdot \overline{MG} \cdot \sin \varphi \quad (1.15)$$

Потпуно је оправдано, код једрилица, узети момент стабилитет на овај начин, пошто једрилице имају скоро кружна ребра и уколико палуба не урања у воду. Уколико су углови нагиба велики и уколико долази до урањања палубе, треба одредити стварну криву момента стабилитета за разматрану једрилицу.

2.5.2. Хидродинамички коефицијенти додатних маса и пригушења

У бродској хидродинамици хидродинамичке инерцијалне силе и силе пригушења узимају се преко одговарајућих хидродинамичких коефицијената додатних маса и пригушења. Како су једначине изведене у инерцијалном координатном систему, могуће је користити поступак и програме за одређивање хидродинамичких коефицијената додатне масе и пригушења раније развијене у оквиру изучавања поморствености брода [4]. Ипак примена на једрилице захтева и мало прилагођавање тих поступака, због изданака који се код једрилица јављају (кобилица, кормило, једра,...).

Масени момент инерције једрилице J_x за осу x је рашчлањен на момент инерције трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$J_x = J_{xt} + J_{xkb} + J_{xkr} + J_{xj} \quad (1.16)$$

Масени момент инерције за труп је узет на основу препорука из [4] као:

$$J_{xt} = (0.4 \cdot (B_{WL} + 0.5))^2 \cdot m_t + (\overline{KG}_t - \overline{KG})^2 \cdot m_t \quad (1.17)$$

где је B_{WL} ширина једрилице на водној линији, m_t маса трупа једрилице, \overline{KG}_t положај тежишта трупа, \overline{KG} положај тежишта једрилице. Уведена је корекција ширине једрилице, пошто је препорука за бродове са усправним ребрима код којих су ширина брода и ширина на воденој линији једнаке, а код једрилица није тај случај већ имамо ширење трупа изнад водене линије.

Масени момент инерције за кобилицу J_{xkb} и кормило J_{xkr} узет је за правоугаону плочу, према формули:

$$J_{xkb} = \frac{1}{12} \cdot BAL \cdot THR^2 + BAL \cdot l_h^2 \text{ и } J_{xkr} = \frac{1}{12} \cdot m_r \cdot T_R^2 + m_r \cdot (T_R / 2)^2 \quad (1.18)$$

где су BAL маса баласта, THR висина кобилице, l_h растојање тежишта кобилице до тежишта једрилице, m_r маса кормила и T_R висина кормила.

Масени момент инерције за јарбол са једрима J_{xj} узет је као за штап еквивалентне укупне масе јарбола и једара, према формули:

$$J_{xj} = \frac{1}{6} \cdot m_j \cdot M^2 + m_j \cdot l_j^2 \quad (1.19)$$

где је m_j маса јарбола и једара, M висина јарбола, l_j растојање тежишта јарбола са једрима до тежишта једрилице.

Масени момент инерције једрилице J_z за осу z је рашчлањен на момент инерције трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$J_z = J_{zt} + J_{zkb} + J_{zkr} + J_{zj} \quad (1.20)$$

Масени момент инерције за труп J_{zt} је узет као [4]:

$$J_{zt} = (0.24 \cdot L)^2 \cdot m_t + x_{Gt}^2 \cdot m_t \quad (1.21)$$

где је L дужина трупа једрилице, m_t маса трупа једрилице, x_{Gt} растојање тежишта трупа до тежишта једрилице.

Масени момент инерције за кобилицу и кормило узет је за правоугаону плочу, према формули:

$$J_{zkb} = \frac{1}{12} \cdot BAL \cdot L_k^2 + BAL \cdot x_h^2 \text{ и } J_{zkr} = \frac{1}{12} \cdot m_r \cdot L_r^2 + m_r \cdot x_r^2 \quad (1.22)$$

где су BAL маса баласта, L_k ширина кобилице, x_h растојање тежишта кобилице до тежишта једрилице, m_r маса кормила, L_r ширина кормила и x_r растојање тежишта кормила до тежишта једрилице.

Масени момент инерције за јарбол са једрима узет је као за штап еквивалентне укупне масе јарбола и једара, према формули:

$$J_{zj} = \frac{1}{6} \cdot m_j \cdot L_j^2 + m_j \cdot x_j^2 \quad (1.23)$$

где је m_j маса јарбола и једара, L_j ширина јарбола са једрима, x_j растојање тежишта јарбола са једрима до тежишта једрилице.

Додатна маса при ваљању m_φ , заношењу m_η и закретању m_θ рашчлањена је на додатну масу трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$\begin{aligned} m_\varphi &= m_{\varphi t} + m_{\varphi kb} + m_{\varphi kr} + m_{\varphi j} \\ m_\eta &= m_{\eta t} + m_{\eta kb} + m_{\eta kr} + m_{\eta j} \text{ и} \\ m_\theta &= m_{\theta t} + m_{\theta kb} + m_{\theta kr} + m_{\theta j} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Додатна маса при ваљању, заношењу и закретању трупа претпостављене су приближно као:

$$m_{\varphi t} \approx 0.1 \cdot J_x, \quad m_{\eta t} \approx 0.1 \cdot \Delta \text{ и } m_{\theta t} \approx 0.1 \cdot J_z, \quad (1.25)$$

а постоји и поступак којим се ове вредности могу боље одредити, али је неопходно познавати детаљну форму трупа.

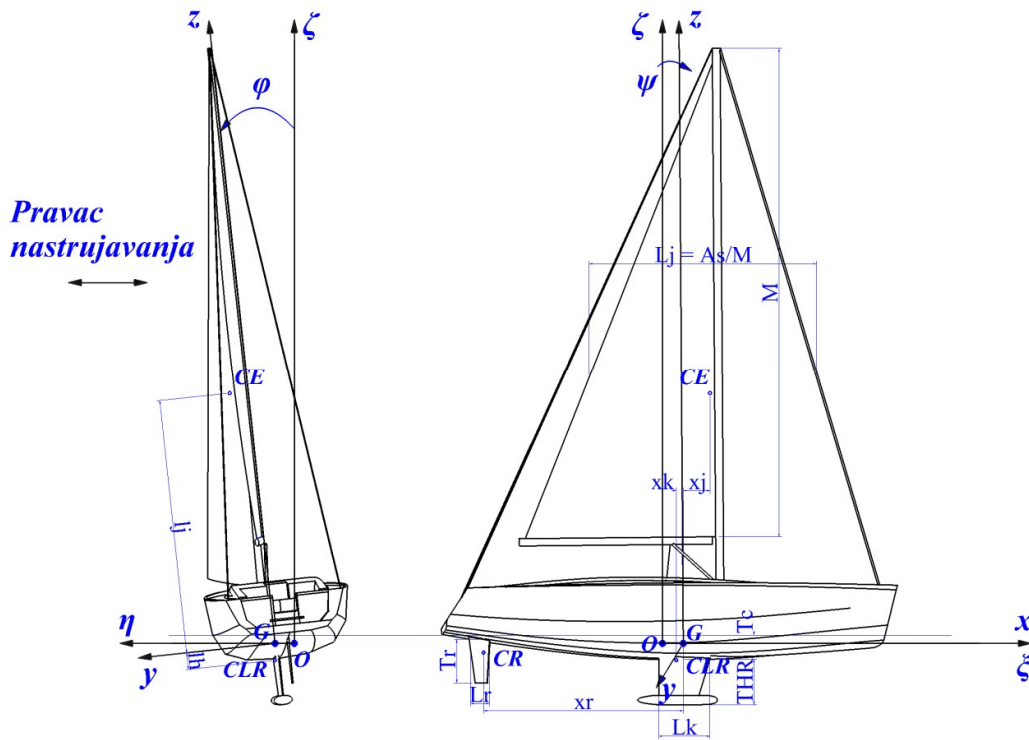
Додатна маса при ваљању, заношењу и закретању кобилице, кормила и јарбола са једарима је узета према препорукама DNV-а [77], како би се добило на општости и широј примени модела кретања, за кретање тродимензионалних објеката у бесконачном флуиду у правцу струјања и то као:

$$\begin{aligned} m_\varphi &= m_A \cdot l_c^2 = \rho_f \cdot CA \cdot VR \cdot l_c^2 \\ m_\eta &= m_A \cdot l_c = \rho_f \cdot CA \cdot VR \cdot l_c \\ m_\theta &= m_A \cdot x_c^2 = \rho_f \cdot CA \cdot VR \cdot x_c^2 \end{aligned} \quad (1.26)$$

Где се m_A [kg] додатна маса флуида, ρ_f [kg/m³] густина флуида, CA [-] коефицијент који зависи од односа b/a , VR [m³] референтна запремина флуида, и


$l_c [m]$ и $x_c [m]$ растојања тежишта флуида до одговарајућих оса које пролаже кроз тежиште једрилице.

Претпостављено је да су кобилица, кормило и јарбол са једарима правоугаоне плоче еквивалентних димензија. На слици 2.8. приказане су димензије које су узете при одређивању додатних маса. Такође је претпостављено да се сви флуидни делићи крећу брзином тежишта кобилице, кормила и јарбола са једарима. Вредности коефицијента C_A у зависности од односа b/a дати су у табели T2.1.



Слика 2.8. Еквивалентне димензије кобилице, кормила и јарбола са једарима

Табела T2.1. Вредности коефицијента C_A у зависности од односа b/a [52]

Rectangular plates 	Vertical	b/a	C_A	b/a	C_A	$\frac{\pi}{4} a^2 b$
		1.00	0.579	3.17	0.840	
1.25	0.642	4.00	0.872			
1.50	0.690	5.00	0.897			
1.59	0.704	6.25	0.917			
2.00	0.757	8.00	0.934			
2.50	0.801	10.00	0.947			
3.00	0.830	∞	1.000			

Претпостављено је нелинеарно пригушење ваљања и то на следећи начин:

$$M_d = n_\varphi \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| \quad (1.27)$$

где се n_φ коефицијент пригушења при ваљању. Рашчлањен је на коефицијент пригушења трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$n_\varphi = n_{\varphi t} + n_{\varphi kb} + n_{\varphi kr} + n_{\varphi j} \quad (1.28)$$

Коефицијент пригушења при ваљању трупа једрилице узет је према препорукама датим у ИМО Временском критеријуму [78], [79] и то као:

$$n_{\varphi t} = C_\varphi \cdot (J_x + m_\varphi), \quad C_\varphi = 0.5 \cdot (k \cdot X_1 \cdot X_2)^{-2} \quad (1.29)$$

где су k, X_1, X_2 коефицијенти који се одређују из препорука [78] и [79].

Коефицијенти пригушења при ваљању кобилице, кормила и јарбола са једрима узети су као:

$$n_{\varphi i} = 0.5 \cdot \rho_f \cdot C_{Di} \cdot A_i \cdot l_i^3 \quad (1.30)$$

где је $\rho_f [kg/m^3]$ густина флуида, $C_D [-]$ коефицијент пригушења правоугаоне плоче, $A [m^2]$ латерална површина, l растојање од тежишта елемента до тежишта једрилице, а индекс $i = (kb, kr, j)$ се односи на кобилицу, кормило и јарбол са једрима.

Коефицијент пригушење правоугаоне плоче одређује се из експерименталних података [75], изворна референца [76] и то као:

$$C_D = 8 \cdot KC^{-0.333}, \quad KC = \frac{UT}{D} \quad (1.31)$$

где је KC Keulegan–Carpenter-ов број, који је за правоугаоне плоче мањи од 10, а максимална вредност коефицијента C_D је 8, U је амплитуда релативне брзине, T је период осциловања, а D је ширина траке/плоче. У оквиру истраживања утврђено је да за разматрани случај кретања једрилице и њене димензије треба узети максималну вредност коефицијента C_D .

Коефицијент пригушења при заношењу n_η рашчлањен је на коефицијент пригушења трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$n_\eta = n_{\eta t} + n_{\eta kb} + n_{\eta kr} + n_{\eta j} \quad (1.32)$$

Између ваљања и заношења постоји веза, тј. кретања су спрегнута, тако да су спрегнути коефицијенти пригушења и може успоставити веза, тако да се коефицијент пригушења при заношењу трупа једрилице може узети као:

$$n_{\eta t} = \frac{n_{\theta t}}{(0.5 \cdot T_c)^3} \quad (1.33)$$

Коефицијенти пригушења при заношењу кобилице, кормила и јарбола са једрима узети су као:

$$n_{\eta i} = 0.5 \cdot \rho_f \cdot C_{Di} \cdot A_i \quad (1.34)$$

где су све величине исте као и код ваљања.

Коефицијент пригушења при закретању n_θ рашчлањен је на коефицијент пригушења трупа, кобилице, кормила и јарбола са једрима.

$$n_\theta = n_{\theta t} + n_{\theta kb} + n_{\theta kr} + n_{\theta j} \quad (1.35)$$

Као и код ваљања, и заношење и закретање су спрегнута кретања, тако да се коефицијент пригушења при закретању трупа једрилице може узети као:

$$n_{\theta t} = n_{\eta t} \cdot x_{Gt}^3 \quad (1.36)$$

Коефицијенти пригушења при закретању кобилице, кормила и јарбола са једрима узети су као:

$$n_{\theta i} = 0.5 \cdot \rho_f \cdot C_{Di} \cdot A_i \cdot x_i^3 \quad (1.37)$$

где су све величине исте као и код ваљања, осим x_i које је растојање од тежишта елемента до тежишне осе z .

Додатна маса m_ε при напредовању се мало мења, за прво приближење користи се емпиријска формула SARGENT&KAPLAN 1974 [4], где се узима да је

додатна маса директно пропорционална депласману, а коефицијент пропорције зависи од односа L/B :

$$m_{\xi} = \frac{a}{2-a} \cdot \rho_f \cdot \nabla = \frac{a}{2-a} \cdot D \quad (1.38)$$

$$a = \frac{1-b^2}{b^3} \cdot \left[\ln\left(\frac{1+b}{1-b}\right) - 2b \right], b = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{L}\right)^2}$$

Пригушење при напредовању n_{ξ} се одређује према препоруци Journeu [4] и то као:

$$n_{\xi} = \frac{dR(v)}{dv} \quad (1.39)$$

што представља тангенту на криву отпора за одређену брзину, слика 2.9.

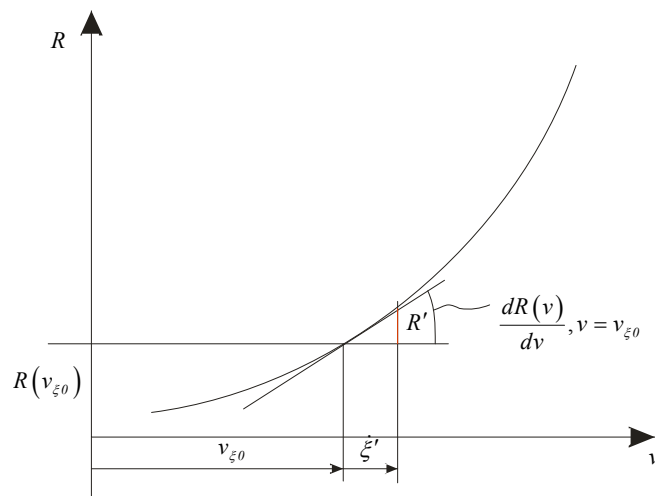
Ако се брзина кретања рашчлани на средњу константну брзину кретања и на флукутирајућу компоненту брзине као последицу нестационарног кретања имаћемо:

$$v_{\xi} = v_{\xi 0} + \xi' \quad (1.40)$$

$$R(v_{\xi 0} + \xi') = R(v_{\xi 0}) + R' \quad (1.41)$$

$$R' \approx n_{\xi} \cdot \xi'$$

$R(v_{\xi 0})$ - пругушење (отпор) које је већ узето у полиномима Делфтске серије.



Слика 2.9. Тангента на криву отпора за одређену брзину

Поменута рашчлана брзине је понекад корисна, поготово ако се врши линеаризација или ако се решавају само флукуације брзина. Али у разматраном случају није потребно радити рашчлану брзине, већ треба узети тренутну вредност брзине v_{ξ} . Са слике 2.9. се види да је разлика отпора за укупну брзину залетања v_{ξ} и збира отпора за средњу брзину и флукуацију брзине мала, тако да се може направити одређено приближење, и сматрати да је пригушење при залетању већ узето у полиномима Делфтске серије, преко промене брзине укупне брзине залетања.

2.5.3. Одређивање хидродинамичких сила и момената

У бродској хидродинамици се хидродинамичке силе које делују на труп брода не могу аналитички одредити, због тога се спроводе моделска испитивања у базени, помоћу којих се одређују жељене величине. На бази моделских испитивања (обично систематска серија модела) развијају се семи-епиријски поступци, помоћу који се резултати могу интерполирати, чак и екстраполирати, и тиме проширити примена. Данас се све више пимењују и нове технике, нпр. CFD (Computation Fluid Dynamics) [27], за одређивање и оптимизацију хидродинамичких сила, али најчешће у комбинацији са класичним моделских испитивањима.

За одређивање хидродинамичких сила које делују на труп једрилице користиће се семи-емпирујски полиноми тзв. Делфтске серије једрилица [13]. Делфтска серија је најпознатија систематска серија једрилица, чија су испитивања почела још 1974., да би финалне полиноме објавили 1998. [13]. Након тога било још усавршавања полинома, али они за сад нису узети у обзир, побољшања су у домену одређивања бочне силе и закретања.

На основу полинома Делфтске серије могуће је одредити отпор кретању једрилице и бочну силу, уз корекције за нагиб. Отпор и бочна сила у Делфтској серији добијену су за константне брзине залетања, и на основу резултата формирану су полиноми. Захваљујући полиномима могуће је одредити вредност отпора и бочне силе и током нестационарног кретања, у сваком тренутку времена.

Приказаћемо укратко поступак одређивања отпора и бочне силе, који је већ примењен у [14], а затим применити на разматрани случај.

Фрудов број се узима као $Fn = \frac{|V_{Bkv\xi}|}{\sqrt{gL_{WL}}}$, где је $V_{Bkv\xi}$ брзина залетања кроз

воду у правцу осе једрилице.

Отпор кретању једрилице

Отпор трења голог трупа је узет према препоруци ИТТС-57, а Рејнолдсов број је узет за 70% дужине водне линије, тако да имамо:

$$Rf_{hull} = \frac{1}{2} \rho \cdot Sc \cdot C_f \cdot V_{Bkv\xi}^2, \text{ где је } C_f = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2}, \text{ а } Rn = \frac{V_{Bkv\xi} \cdot 0.7L_{WL}}{\nu} \quad (1.42)$$

Преостали отпор голог трупа је дат преко полинома, а коефицијенти су дати у табели Т2.2:

$$\frac{Rr_{hull}}{\nabla_c \cdot \rho \cdot g} = a_0 + \left(a_1 \frac{LCB}{L_{WL}} + a_2 C_P + a_3 \frac{\nabla_c^{2/3}}{A_{WL}} + a_4 \frac{B_{WL}}{L_{WL}} + a_5 \frac{\nabla_c^{2/3}}{Sc} + a_6 \frac{LCB}{LCF} + a_7 \left(\frac{LCB}{LCF} \right)^2 + a_8 C_P^2 \right) \cdot \frac{\nabla_c^{1/3}}{L_{WL}} \quad (1.43)$$

Табела Т2.2. Коефицијенти полинома преосталог отпора трупа

Fn	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
a0	-0.0014	0.0004	0.0014	0.0027	0.0056	0.0032	-0.0064	-0.0171	-0.0201	0.0495	0.0808
a1	0.0403	-0.1808	-0.1071	0.0463	-0.8005	-0.1011	2.3095	3.4017	7.1576	1.5618	-5.3233
a2	0.0470	0.1793	0.0637	-0.1263	0.4891	-0.0813	-1.5152	-1.9862	-6.3304	-6.0661	-1.1513
a3	-0.0227	-0.0004	0.0090	0.0150	0.0269	-0.0382	0.0751	0.3242	0.5829	0.8641	0.9663
a4	-0.0119	0.0097	0.0153	0.0274	0.0519	0.0320	-0.0858	-0.1450	0.1630	1.1702	1.6084
a5	0.0061	0.0118	0.0011	-0.0299	-0.0313	-0.1481	-0.5349	-0.8043	-0.3966	1.7610	2.7459
a6	-0.0086	-0.0055	0.0012	0.0110	0.0292	0.0837	0.1715	0.2952	0.5023	0.9176	0.8491
a7	-0.0307	0.1721	0.1021	-0.0595	0.7314	0.0223	-2.4550	-3.5284	-7.1579	-2.1191	4.7129
a8	-0.0553	-0.1728	-0.0648	0.1220	-0.3619	0.1587	1.1865	1.3575	5.2534	5.4281	1.1089

Узима се вискозни отпор кобилице, и то као:

$$Rv_{keel} = Rf_{keel} \cdot (I + k_k), \text{ где је } (I + k_k) = \left(I + 2 \frac{t_k}{c_k} + 60 \left(\frac{t_k}{c_k} \right)^4 \right), \quad (1.44)$$

$$Rf_{keel} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_k \cdot C_{fk} \cdot V_{Bkv\xi}^2, \text{ где је } C_{fk} = \frac{0.075}{(\log Rn_k - 2)^2}, \text{ а } Rn_k = \frac{V_{Bkv\xi} \cdot L_k}{\nu},$$

а преостали оптор кобилице преко полинома, а где су коефицијенти дати у табели 2.3.:

$$\frac{Rr_k}{\nabla_k \cdot \rho \cdot g} = C_0 + C_1 \frac{T_c + b_k}{B_{WL}} + C_2 \frac{T_c + Z_k}{\nabla_k^{1/3}} + C_3 \frac{\nabla_c}{\nabla_k} \quad (1.45)$$

Табела Т2.3. Коефицијенти полинома преосталог отпора кобилице

<i>Rr - Keel</i>											
F _n	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
C0	0	0	-0.00104	-0.00550	-0.01110	-0.00713	-0.03581	-0.00470	0.00553	0.04822	0.01021
C1	0	0	0.00172	0.00597	0.01421	0.02632	0.08649	0.11592	0.07371	0.00660	0.14173
C2	0	0	0.00117	0.00390	0.00069	-0.00232	0.00999	-0.00064	0.05991	0.07048	0.06409
C3	0	0	-0.00008	-0.00009	0.00021	0.00039	0.00017	0.00035	-0.00114	-0.00035	-0.00192

За кормило узима се вискозни, и то као:

$$Rv_{rudder} = Rf_{rudder} \cdot (I + k_r), \text{ где је } (I + k_r) = \left(I + 2 \frac{t_r}{c_r} + 60 \left(\frac{t_r}{c_r} \right)^4 \right), \quad (1.46)$$

$$Rf_{rudder} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_r \cdot C_{fr} \cdot V_{Bkv\xi}^2, \text{ где је } C_{fr} = \frac{0.075}{(\log Rn_r - 2)^2}, \text{ а } Rn_r = \frac{V_{Bkv\xi} \cdot L_r}{\nu},$$

Све претходно наведено је отпор једрилице у усправном положају, али једрилица скоро никад не једри у усправном положају и зато се уведе додатне корекције за нагиб.

Додатни оптор трупа при нагибу узима се преко полинома, а коефицијенти су дати у табели 2.4.:

$$\frac{\Delta Rr_{h\phi}}{\nabla_c \cdot \rho \cdot g} = \left(u_0 + u_1 \frac{L_{WL}}{B_{WL}} + u_2 \frac{B_{WL}}{T_c} + u_3 \left(\frac{B_{WL}}{T_c} \right)^2 + u_4 LCB + u_5 LCB^2 \right) \cdot 6 \cdot \phi^{1.7} \quad (1.47)$$

Табела Т2.4. Коефицијенти полинома додатног отпора трупа при нагибу

<i>ΔRh₂₀</i>											
коефицијенти су множени са 1000											
F _n	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
u0	0	0	0	-0.0268	0.6628	1.6433	-0.8659	-3.2715	-0.1976	1.5873	1.5873
u1	0	0	0	-0.0014	-0.0632	-0.2144	-0.0354	0.1372	-0.1480	-0.3749	-0.3749
u2	0	0	0	-0.0057	-0.0699	-0.1640	0.2226	0.5547	-0.6593	-0.7105	-0.7105
u3	0	0	0	0.0016	0.0069	0.0199	0.0188	0.0268	0.1862	0.2146	0.2146
u4	0	0	0	-0.0070	0.0459	-0.0540	-0.5800	-1.0064	-0.7489	-0.4818	-0.4818
u5	0	0	0	-0.0017	-0.0004	-0.0268	-0.1133	-0.2026	-0.1648	-0.1174	-0.1174

Додатни оптор кобилице при нагибу узима се преко полинома, а коефицијенти су дати у табели 2.5.:

$$\frac{\Delta Rr_{k\varphi}}{\nabla_k \cdot \rho \cdot g} = \left(H_1 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} + H_2 \frac{B_{WL}}{T_c} + H_3 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} \frac{B_{WL}}{T_c} + H_4 \frac{L_{WL}}{\nabla_c^{1/3}} \right) \cdot Fn^2 \cdot \varphi \quad (1.48)$$

Табела Т2.5. Коэффицијенти полинома додатног отпора кобилице при нагибу

$\Delta Rk-h$	
H1	-3.5837
H2	-0.0518
H3	0.5958
H4	0.2055

Додатни отпор трења трупа при нагибу узима се преко промене оквашене површине, за коју је дат полином а коэффицијенти су дати у табели 2.6.:

$$Sc_\varphi = Sc \left(1 + \frac{I}{100} \left(s_0 + s_1 \frac{B_{WL}}{T_c} + s_2 \left(\frac{B_{WL}}{T_c} \right)^2 + s_3 C_m \right) \right) \quad (1.49)$$

Табела Т2.6. Коэффицијенти полинома промене оквашене површине при нагибу

φ	5	10	15	20	25	30	35
s0	-4.1120	-4.5220	-3.2910	1.8500	6.5100	12.3340	14.6480
s1	0.0540	-0.1320	-0.3890	-1.2000	-2.3050	-3.9110	-5.1820
s2	-0.0270	-0.0770	-0.1180	-0.1090	-0.0660	0.0240	0.1020
s3	6.3290	8.7380	8.9490	5.3640	3.4430	1.7670	3.4970

Бочна сила

Бочна сила која су делује на једрилицу састоји је од силе узгона и силе индукованог отпора. За њихово одређивање се користе полиноми и то:

- Бочна сила

$$SF = Fh \cos \varphi \quad (1.50)$$

$$Fh \cos \varphi =$$

$$\left(b_1 \frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} + b_2 \left(\frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} \right)^2 + b_3 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} + b_4 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} \frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} \right) \cdot \left(-\frac{V_{Bkv\eta}}{V_{Bkv\xi}} + \varepsilon_{Fh=0} \right) \cdot \frac{I}{2} \rho V_{Bkv}^2 Sc$$

$$\varepsilon_{Fh=0} = 0.0092 \frac{B_{wl}}{T_c} \frac{T_c}{(T_c + b_k)} \varphi^2 Fn$$

Табела Т2.7. Коефицијенти полинома бочне силе

φ	0	10	20	30
b1	2.025	1.989	1.980	1.762
b2	9.551	6.729	0.633	-4.957
b3	0.631	0.494	0.194	-0.087
b4	-6.575	-4.745	-0.792	2.766

- Сила индукованог отпора

$$Ri = \frac{(Fh)^2}{\frac{1}{2} \rho \pi T_e^2 V_{Bkv}^2} \quad (1.51)$$

$$\frac{T_e}{(T_c + b_k)} = \left(A_1 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} + A_2 \left(\frac{T_c}{(T_c + b_k)} \right)^2 + A_3 \frac{B_{wl}}{T_c} + A_4 TR \right) \cdot (B_0 + B_1 Fn)$$

Табела Т2.8. Коефицијенти полинома индукованог отпора

φ	0	10	20	30
d1	3.7455	4.4892	3.9592	3.4891
d2	-3.6246	-4.8454	-3.9804	-2.9577
d3	0.0589	0.0294	0.0283	0.0250
d4	-0.0296	-0.0176	-0.0075	-0.0272
e0	1.2306	1.4231	1.5450	1.4744
e1	-0.7256	-1.2971	-1.5622	-1.3499

Сад на основу полинома можемо дефинисати хидродинамичке силе које делују на једрилицу, и повезати их са одговарајућим брзинама кретања, пошто се разматра једрење у воденој струји.

Брзина кретања једрилице кроз воду V_{Bkv} са утицајем водене струје може се пројектовати на осе ξ и η :

$$V_{Bkv\xi} = -\dot{\xi} - V_r \cos(dr)$$

$$V_{Bkv\eta} = -\dot{\eta} + V_r \sin(dr) + l_h \cdot \dot{\varphi} + l_j \cdot \dot{\theta} \quad (1.52)$$

Силе у правцу ξ осе:

- услед залетања

$$F_\xi(V_{Bkv\xi}) = -Rf_{hull}(V_{Bkv\xi}) - Rr_{hull}(V_{Bkv\xi}) - Rv_{keel}(V_{Bkv\xi}) - Rr_{keel}(V_{Bkv\xi}) - Rv_{rudder}(V_{Bkv\xi}) \quad (1.53)$$

- услед заношења

$$F_{\xi}(\dot{\eta}) = SF(\dot{\eta}, \varphi) \sin\left(-\frac{-\dot{\eta} + V_r \sin(dr)}{V_{Bkv\xi}}\right) - Ri(\dot{\eta}, \varphi) \cos\left(-\frac{-\dot{\eta} + V_r \sin(dr)}{V_{Bkv\xi}}\right) \quad (1.54)$$

- услед нагиба

$$F_{\xi}(\varphi) = -\Delta Rr_{hull}(\varphi) - \Delta Rf_{hull}(\varphi) - \Delta Rr_{keel}(\varphi) \quad (1.55)$$

$$F_{\xi}(l_h \dot{\varphi}) = SF(l_h \dot{\varphi}) \sin\left(-\frac{l_h \dot{\varphi}}{V_{Bkv\xi}}\right) - Ri(l_h \dot{\varphi}) \cos\left(-\frac{l_h \dot{\varphi}}{V_{Bkv\xi}}\right) \quad (1.56)$$

- услед закретања

$$F_{\xi}(l_h \dot{\theta}) = SF(l_h \dot{\theta}, \varphi) \sin\left(-\frac{l_h \dot{\theta}}{V_{Bkv\xi}}\right) - Ri(l_h \dot{\theta}, \varphi) \cos\left(-\frac{l_h \dot{\theta}}{V_{Bkv\xi}}\right) \quad (1.57)$$

Силе у правцу η осе:

- услед заношења

$$F_{\eta}(\dot{\eta}) = SF(\dot{\eta}, \varphi) \cos\left(-\frac{-\dot{\eta} + V_r \sin(dr)}{V_{Bkv\xi}}\right) - Ri(\dot{\eta}, \varphi) \sin\left(-\frac{-\dot{\eta} + V_r \sin(dr)}{V_{Bkv\xi}}\right) \quad (1.58)$$

- услед нагиба

$$F_{\eta}(l_h \dot{\varphi}) = SF(l_h \dot{\varphi}) \cos\left(-\frac{l_h \dot{\varphi}}{\xi - V_r \cos(dr)}\right) - Ri(l_h \dot{\varphi}) \sin\left(-\frac{l_h \dot{\varphi}}{\xi - V_r \cos(dr)}\right) \quad (1.59)$$

- услед закретања

$$F_{\eta}(l_h \dot{\theta}) = SF(l_h \dot{\theta}, \varphi) \cos\left(-\frac{l_h \dot{\theta}}{V_{Bkv\xi}}\right) - Ri(l_h \dot{\theta}, \varphi) \sin\left(-\frac{l_h \dot{\theta}}{V_{Bkv\xi}}\right) \quad (1.60)$$

Један од битних параметара је и угао заношења (leeway angle), угао између правца кретања и осе једрилице и може се изразити као:

$$\varepsilon = -\frac{\dot{\eta}}{\xi} = -\frac{V_{B\eta}}{V_{B\xi}}, \quad (1.61)$$

као и угао заношена кроз воду

$$d_{Bkv} = -\frac{V_{Bkv\eta}}{V_{Bkv\xi}} = -\frac{-\dot{\eta} + V_r \sin(dr) + l_h \cdot \dot{\varphi} + l_j \cdot \dot{\theta}}{-\dot{\xi} - V_r \cos(dr)}. \quad (1.62)$$

Момент накретања услед силе која накреће једрилицу, а где сила зависи од укупног угла заносења кроз воду је следећи:

$$M_{Fh}(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, V_r, d_r) = Fh(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot l_h \quad (1.63)$$

где је l_h вертикално растојање од тежишта подводног дела до тежишта једрилице, а сила је:

$$Fh(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, V_r, d_r) = \left(b_1 \frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} + b_2 \left(\frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} \right)^2 + b_3 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} + b_4 \frac{T_c}{(T_c + b_k)} \frac{(T_c + b_k)^2}{Sc} \right) \cdot \left(-\frac{V_{Bkv\eta}}{V_{Bkv\xi}} + \varepsilon_{Fh=0} \right) \cdot \frac{I}{2} \rho V_{Bkv}^2 Sc_\varphi \frac{I}{\cos \varphi} \quad (1.64)$$

У хидродинамичке силе спада и додатна сила на кормилу, коју генерише кормилар током једрења када отклопни кормило, у оквиру овог истраживања су испитане могућности примене разних модела кормилара, али овде неће бити приказани, из разлога што још увек не дају поуздана решења.

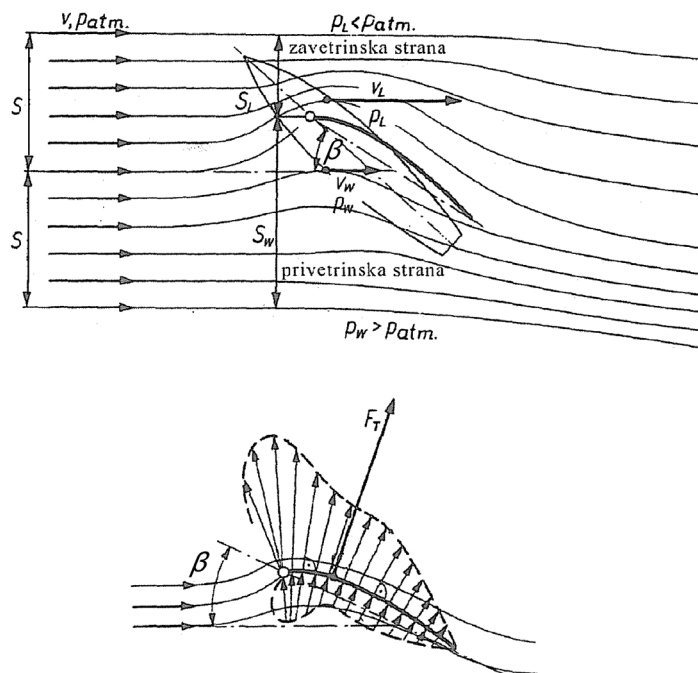
2.6. АЕРОДИНАМИЧКЕ СИЛЕ

2.6.1. Принцип стварања аеродинамичке узгонске (поривне) силе

Многи су се сигурно запитали како је могуће да једрилица једри у ветар, и сигурно су мислили да једрилицу ветар „гура“. Напротив једрилицу ветар у једрењу у ветар „вуче“, разлог томе је стварање аеродинамичке сила која настаје као последица различитог притиска на приветринској и заветринској површини једра. Разлика у притиску настаје због различите брзине струјања ваздуха. На приветринској страни једра је брзина струјања мања па је притисак већи него на заветринској страни. На слици 2.10. је приказано скретање струје ваздуха, брзина

и расподела притиска на површинама једра. Нападни угао ветра β се мери између линије која спаја улазни и излазни поруб једра и правца привидног ветра.

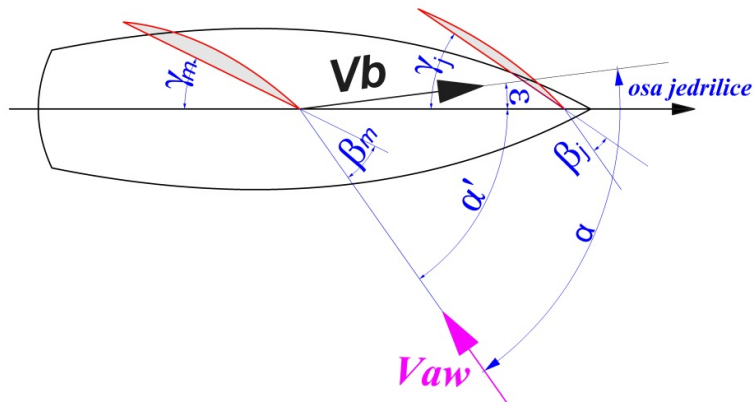
Правац укупне силе \vec{F}_w је близак нормали на једро.



Слика 2.10. Аеродинамичка сила као последица разлике у притиску на приветринској и заветринској страни једра [8]

Захваљујући томе што је пројекција укупне аеродинамичке силе на осу једрилице $F_{w\xi}$ позитивна већ при углу $\alpha - \varepsilon = (20 \div 30^\circ)$ једрилица може да једри у ветар. Компонента $F_{w\eta}$ се конпензује хидродинамичком силом на кобилици и кормилу и одговорна је за занешење једрилице.

На слици 2.11. дати су углови наструјавања привидног ветра на једра, а такође су дати и углови отклона једара од осе једрилице, на које може да утиче скипер (кормилар).



Слика 2.11. Означавање углова између привидног ветра и осталих праваца

2.6.2. Моделска испитивања једара и приказивање резултата

Кроз историју једрењаци су бродови који се најдуже користе, али наука о једрима се интензивно развија тек у XX века, када се и једрењаци поново враћају, али са другачијом функцијом од оне коју су имали кроз историју. Једрењаци се сада користе за спорт и разоноду, а не више као ратни бродови или бродови трговачке флоте. Спортска такмичења попримају шире размере, нису више ограничена на одређени број земаља (Енглеска, САД, итд.). Овим се отвара и простор за даље усавршавање једара (плана једара), коју подстиче све већа конкуренција. Тако се јавља и потреба да се о једрима зна више, прелази се искуствених метода на моделска испитивања једара (план једара, облик, димензије, материјали, итд.). У ваздушним тунелима почину да се испитују једра и одређују аеродинамичке силе и прерачунавају коефицијенти.

Хронолошки, прва испитивања једара је спровео С.А. Marchaj [8] 1970. године на Универзитету у Саутемтону (Southampton University) и Ваздушном тунелу „Сер Ричард Фери“ (Sir Richard Fairey Wind Tunnel) у Великој Британији и тиме поставио темеље за даља испитивања. Недавно Универзитет у Саутемтону је формирао истраживачу јединицу (Wolfson Unit) која пружа консултантске услуге поморском сектору, а што се тиче једрилица, за различите тимове (конзорцијуме) учествују на престижним регатама. Почетком деведесетих година прошлог века, захваљујући спонзорству Краљевске Новозеландске једриличарске ескадриле (Royal New Zealand Yacht Squadron), изграђен је ваздушни тунел на Универзитету

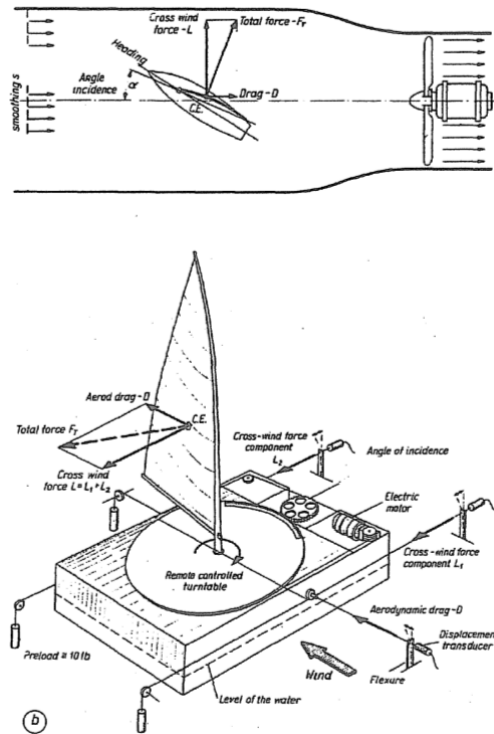
у Оукланду (University of Auckland) када је тим Новог Зеланда изазвао противнике за регату Америчког купа 1995. године (1995 American's cup). Формирана је истраживачка група у ваздушном тунелу, која је веома активна и данас, која је допринела развоју метода и технологија за експериментална испитивања једара заснованих на основним принципима које је поставио Марчај (Marchaj) 1970. године. Још скорије, од септембра 2001. године, формирана је истраживачка група у ваздушном тунелу на Миланском Политехничком факултету (Milan Polytechnic wind tunnel). Ова група има активну улогу у научним истраживањима у новије време у домену једриличарства/једрења, поготову у регатама Америчког купа 2003. и 2007. године. Из претходног се може закључити, да су мерења у овој области иницирана најпрестижнијим регатама и да тимови улажу велика средства у истраживања. Такође, треба нагласити да је и мало ових истраживања објављено и да нема много доступних података.

Испитивање једара и одређивање аеродинамичке силе је знатно мање поуздано од одређивања хидродинамичких сила. За разлику од хидродинамичких сила, аеродинамичке се изузетно тешко мере на готовој једрилици, што онемогућава проверу и корекцију методе. Са друге стране, у ваздушним тунелима је немогуће постићи услове идентичне реалним. Због смањења брзине ветра уз површину воде делови једра су у струји ваздуха различите брзине, а због кретања једрилице се и смер струјања мења по вертикали. У тунелу је могуће остварити градијент брзине по висини, али је немогуће остварити и промену угла. Овај проблем се делимично решава тако да се извијање (twist) једра, који је приликом испитивања успостављен коригује за реалне услове. Остаје, међутим, проблем дистрибуције аеродинамичких сила, односно угао под којим делује укупна сила, с обзиром да се извијање у тунелском испитивању и у реалним условима може разликовати и до 20°.

За одређивање сила које делују на једро се користе и компјутерски програми, слични онима за одређивање хидродинамичких сила. Заснивају се на представљању једра уз помоћ тачкастих или линијских сингуларитета, вртлога, извора и понора, који одређују струјање око једра (CFD – Computational fluid dynamics). Метода не даје поуздане резултате у случају одвајања струје од једра, тако да се користи искључиво за мале нападне углове (једрење оштро у ветар).

Чак и тада је проблематична употреба програма за оптимизацију, јер долази до грешака због избора параметара и занемаривања многих ефеката. У протеклих десетак година све се више пажње посвећује моделирању једара и анализи помоћу CFD програма, што се из најнових истраживања може и видети [27], али још увек нема података који се могу искористити код моделовања аеродинамичким сила код временски променљивог ветра.

У овом раду се за одређивање аеродинамичке силе ослања на моделска испитивања која је изводио С.А. Marchaj и публикувао их у књизи "Sail performance" [9]. Уређај за мерење аеродинамичке силе је приказан на слици 2.12. Модели једара су прављени од платна и максималне димензије модела (висина јарбола) су око два метра.



Слика 2.12. Начин мерења аеродинамичких сила у ваздушном тунелу [9]

У референци [11] је доста добро описано одређивање коефицијената узгона и отпора једара, дато је много слика из ваздушног тунела (неке од слика, слика 2.13.), али нису дати коефицијенти за нова, модернија једра, тзв. поларе једара.



Слика 2.13. Приказ мерења аеродинамичких сила у ваздушном тунелу [11]

У тунелу се при одређеним условима мери сила у правцу струје F_D и нормално на њу F_L . И у овом случају се, као и код пераја/крила, ове силе називају отпор и узгон. И овде су уведени бездимензиони коефицијенти:

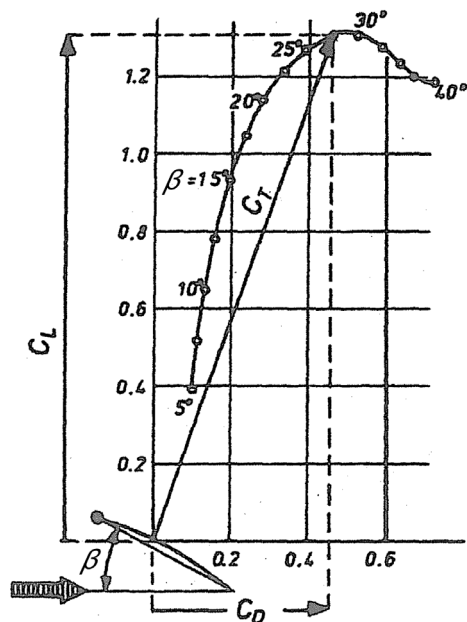
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_v S \cdot V_v^2} \text{ и } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_v S \cdot V_v^2} \quad (1.65)$$

где су F_L и F_D силе узгона и отпора, ρ_v густина ваздуха, S површина једра и V_v брзина струје ваздуха.

Коефицијенти узгона и отпора одређеног једра C_L и C_D су константе за одређен нападни угао β . Ово поједностављење има смисла због укупне мале тачности методе одређивања аеродинамичких сила. Уобичајен начин представљања резултата мерења је поларни дијаграм или полара једра (слика 2.14.). Свака тачка дијаграма одговара једном нападном углу β и представља крај вектора укупне аеродинамичке силе, односно њеног коефицијента.

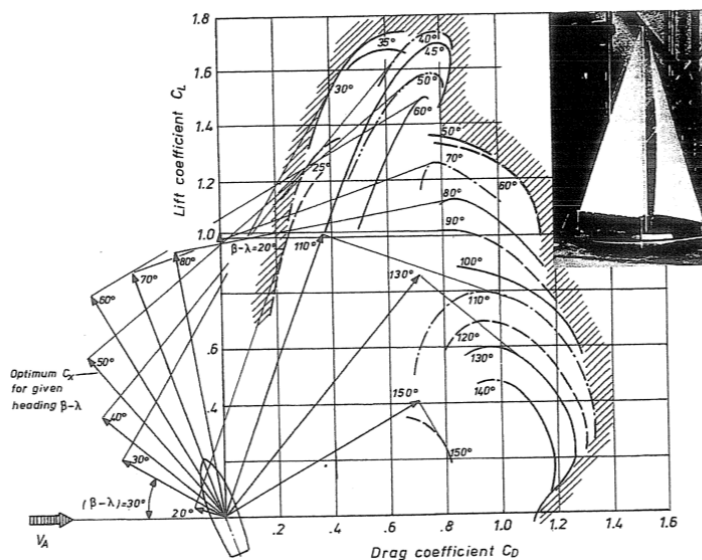
Раније су се коефицијенти прерачунавали за константну брзину ветра у ваздушном тунелу и за целу површину једра. У новије време се све више тежи реалнијем одређивању сила у једрима. У ваздушном тунелу све симулира променљиви ветар, тј. променљива брзина ветра. Узима се и градијент брзине по

висини. Ради се на што поузданијим моделима аеродинамичких сила, али до резултата није тако лако доћи.



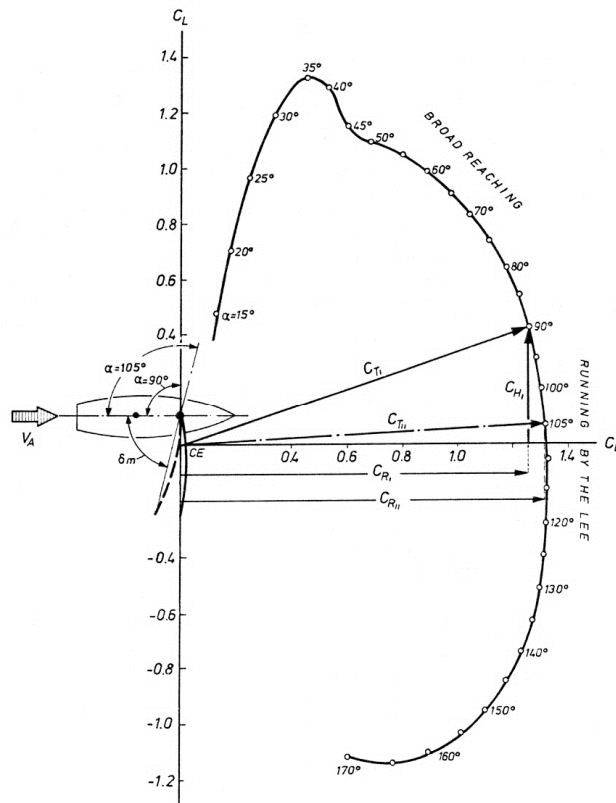
Слика 2.14. Начин приказивања коефицијената узгона и отпора [9]

Поларни дијаграм може бити нацртан и за једра и труп заједно (слика 2.15.). У том случају је на дијаграму фамилија полара цртаних за различите углове између осе једрилице и правца ветра.

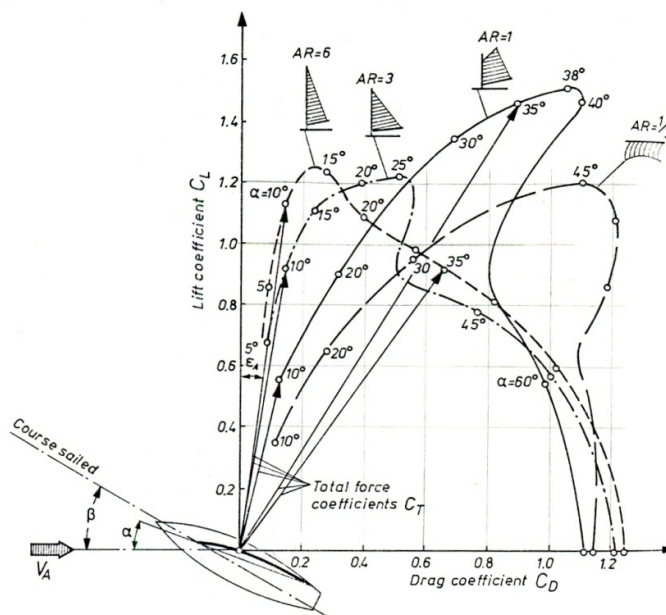


Слика 2.15. Поларни дијаграм за једрилицу и једро [9]

У овом истаживању су се прво користиле, широко распрострањене поларе једара које су већ оптимизоване како би се остварила максимална сила узгона. Поступак оптимизације положаја једара тако да се оствари максимални коефицијент силе узгона, тј. максимална сила угона дат је у поглављу 2.6.5. Ове поларе су биле корисне у делу кад је програм требало поредити са постојећим комерцијалним програмима, дато у поглављу 3. Оптимизоване поларе не дају могућност додатне оптимизације током време, па се прешло на нешто старије поларе једара дате у референци [9]. Тако да су узете поларе приказане на сликама 2.16. и 2.17. за различите односе виткости једра.



Слика 2.16. Поларни дијаграм за једро AR=4 [9]



Слика 2.17. Поларни дијаграм за једро AR=6 и AR=3 [9]

Како би се прорачун аутоматизовао треба наћи математичку зависност поларе у функцију угла наструјавања на једро. За ово се обично користи регресиона анализа, и добијају се полиноми, врши се „фитовање“ кривих. У овом случају ће се применити метод вештачких неуронских мрежа (погледати [80],[81]), које су се добро показале у бродској хидродинамици. Током истраживања овај метод је примењен на низ различитих проблема (референце [83],[84]) и направљена је математичка зависност, тако да се током даље примене више не морају користити програми за тренирање вештачких неуронских мрежа. Ово је корисно за кориснике, који не морају познавати теорију вештачких мрежа, а могу користити математичке зависности базиране на њима. Овде се неће улазити у детаље, за више погледати референцу [83]. Програм који је коришћен при тренирању неуронских мрежа је “aNETka” [82], који је директно добијен од аутора програма. На основу вештачке неуронске мреже може се направити математичка зависност, нешто слично полиному, у облику:

$$C_x = \frac{\text{sig}\left(b_1 + \sum_{j=1}^7 B_{j1} \cdot \text{sig}\left(a_j + A_{1j} \cdot (P_1 \cdot \beta + R_1)\right)\right) - G_i}{L_i} \quad (1.66)$$

где је C_x може бити коефицијент узгона C_L или отпора C_D једара (главног или предњег), а само се разликују коефицијенти $a_j, A_{lj}, b_l, B_{jl}, P_l, R_l, G_l, L_l$, који су дати у табелама 2.9. и 2.10.

Математичка зависност/полином је истог облика, само се коефицијенти разликују. Овакав приступ у даљем истраживању отвара могућност да се не врши само фитовање појединачних полара једара, већ да се на низу полара различитих једара направи математичка зависност и тиме прошири могућност одабира једара, како према облику, виткости, закривљености профила једра. Такође, проширила би се и могућност оптимизације положаја и тримовања једара током нестационарног једрења, сада по више параметара. Предност оваквих полинома огледа се у њиховој диференцијабилности, а да при том коефицијенти остају исти. То је веома битна чињеница јер олакшава одређивање оптималног положаја једара.

Диференцијабилност обезбеђују активационе (трансфер) функције, овде је коришћена сигмоидна функција $sig(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$, и она је вишеструко диференцијабилна.

Табела Т2.9. Коефицијенти полинома поларе за главно једро AR=6

MAIN SAIL							
A_{lj}	a_j						
-32.839360	10.716160						
-6.713264	0.504353						
3.566809	-2.317984						
5.662978	0.838867						
12.564580	-13.573080						
31.683670	-11.193140						
9.236631	-5.646935						
B_{jl}							b_2
-8.1996290	-5.4837620	2.7885370	6.8736770	-15.7017200	-8.5978320	-4.1243910	3.3632460
-0.6260514	-3.0294830	3.7056880	1.9081160	1.5517240	-0.5937178	1.2359000	-2.4539520
P	0.008182						
R	0.050000						
L_i	0.64794816	0.68441065					
G_i	0.0875810	0.05000000					
	CLmain	CDmain					

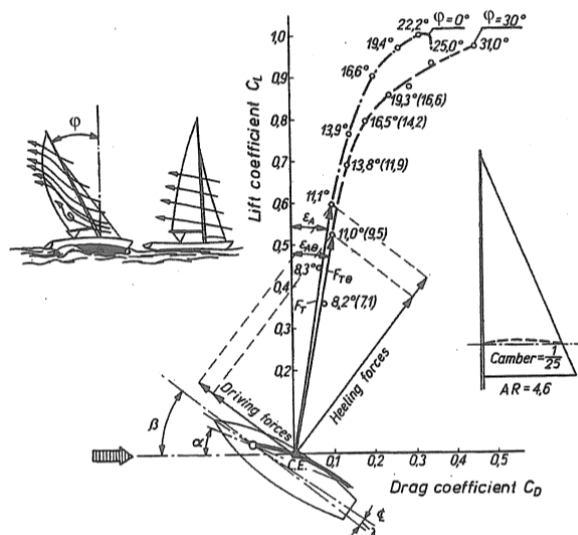
Табела Т2.10. Коэффициенти полинома поларе за предње једро AR=4

JIB SAIL							
A_{1j}		a_j					
3.653706		-1.417736					
-0.360570		0.054087					
-34.884140		5.929999					
-1.127303		1.147925					
-9.772244		10.267760					
-26.387260		3.881765					
-3.758313		3.141155					
B_{j2}							b_2
-4.5191840	-0.5392196	10.6035100	-0.2524379	9.0750930	-12.7072200	-0.5551931	-4.9814700
2.6410720	-0.4178704	1.6608000	-1.3555810	-0.8149140	-3.6671840	-3.3747340	3.4681250

P	0.010588	
R	-0.002941	
Li	0.72289157	0.78125000
Gi	0.05000000	-0.0226563
	CLjib	CDjib

2.6.3. Утицај нагиба једрилице на аеродинамичку силу

Нагиб једрилице негативно утиче на аеродинамичку силу. Са повећањем угла нагиба φ се смањује ефективни нападни угао β из геометријских разлога и тиме смањује ефикасност једра. Поред тога, при нагињању једрилице се спушта тежиште једара у зону мање брзине ветра, а смањује се и изложена површина једра. Ове појаве су до угла нагиба од 20° занемарљиве а са даљим нагињањем постају све израженије. На слици 2.18. је приказана разлика у поларама истог једра при угловима нагиба $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$.



Слика 2.18. Утицај нагиба једрилице на аеродинамичке силе [9]

Приликом одређивања брзине једрилице занемариће се утицај нагиба на аеродинамичку силу јер описани алгоритам важи за угао нагиба мањи до 20° .

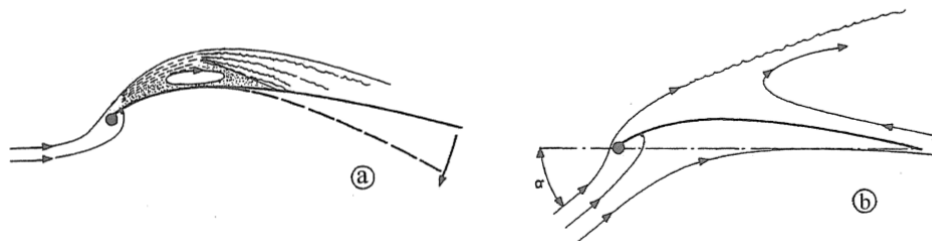
2.6.4. Начин струјања ваздуха око једара

Турбуленција и сепарација струје

Струјање око једра у реалним условима је веома слично струјању воде око трупа, само што се облици струјања у ваздуху теже могу опазити. И на површини једра, као и на површини трупа, долази до стварања граничног слоја који је ламинаран само у околини улазног поруба једра а према излазном постаје турбулентан.

Гранични слој се под одређеним условима одваја од једра и долази до вртложења ваздуха. До одвајања граничног слоја најчешће долази одмах иза јарбола који јако деформише струју ваздуха. На том месту је гранични слој ламинаран и лако се одваја од површине. Преласком граничног слоја на турбулентни, који има особину да се боље држи криве површи од ламинамог, може доћи до поновног спајања са површином једра, као што је приказано на слици 2.19а. У том случају се образује вртлог који само локално смањује брзину струјања а тиме и аеродинамички узгон.

При повећању нападног угла ветра вртлог повећава димензије и тачка поновног спајања граничног слоја са једром се помера према излазном порубу. Са даљим повећањем нападног угла се гранични слој неповратно одваја од једра и цела заветринска површина се нађе у вртложној струји (слика 2.19б). Струјање



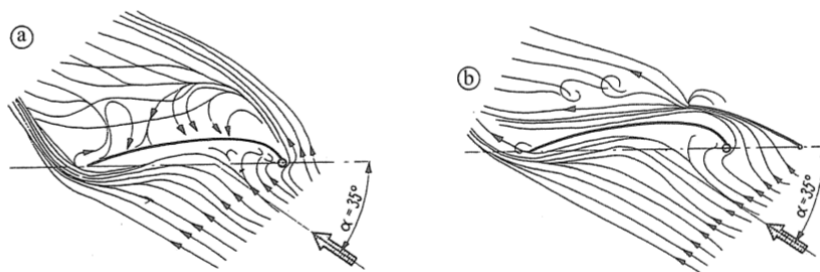
Слика 2.19. Сепарација струје ваздуха од површине једра: а) са поновним спајањем, б) неповратна сепарација [9]

је тада на излазном делу једра супротног смера (повратна струја), а укупно смањење брзине ваздуха на површини једра је значајно. Смањење аеродинамичког узгона настало услед ове појаве веома добро је уочљиво на полари једра (слика 2.14.), и јавља се при нападним угловима $\beta = 30^\circ \div 40^\circ$.

Међудејство главног једра и пречке

Коефицијент аеродинамичког узгона комбинације главног једра и пречке је већи од коефицијената узгона сваког једра посебно. Позитиван ефекат међудејства једара је најизраженији код једрења оштро у ветар, и смањује се са повећањем нападног угла привидног ветра. Код једрења низ ветар ефекат је негативан због преклапања главног једра и пречке, али се тај режим пловидбе ионако сматра мање битним. Крсташи постижу задовољавајуће брзине низ ветар, а могуће је побољшање коришћењем специјалних једара за крмени ветар (спинакер, асиметрични спинакер - генакер, big boy).

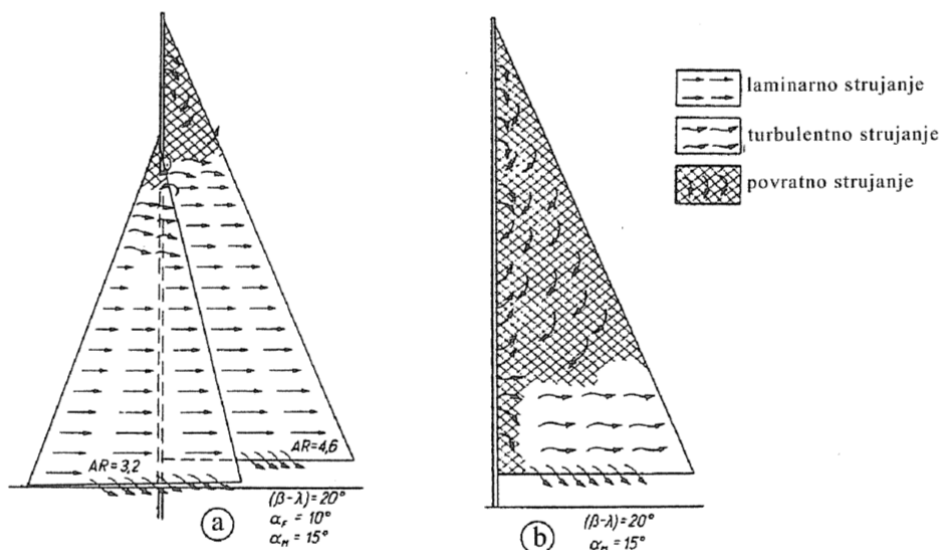
Објашњење међудејства главног једра и пречке је контраверзна тема међу једриличарима. Проблем је комплексан а најједноставније се може објаснити приказом струјница. Повећањем притиска у критичној области главног једра, односно скретањем струјница, пречка спречава сепарацију струје на заветринској страни главног једра, као што се види на слици 2.20. Са друге стране, струјање око главног једра повећава нападни угао привидног ветра који долази до пречке и тиме јако повећава њену ефикасност.



Слика 2.20. Струјање око главног једра без пречке а) и са пречком б) [9]

На слици 2.21. је приказано струјање на заветринској страни главног једра самог и комбинације са пречком при истим условима. Занимљиво је да код пречке не долази до одвајања струје ваздуха, као што је случај са главним једром. Узроци

доброг понашања пречке су оштар улазни поруб (челична сајла уместо јарбола) и боља прилагодљивост струји ваздуха. Доњи поруб пречке се поставља слободно у струји а и материјал од којег је пречка направљена је редовно тањи и савитљивији него код главног једра.



Слика 2.21. Утицај пречке на униформност струјања око главног једра (заветринска страна) [9]

У референци [10] је дат поступак за изачунавање укупних коефицијената узгона и отпора у једрима при међусобном дејству више једара, у разматраном случају то су главно и предње једро и за њих имамо следеће изразе за:

- Површину једара

- Главно једро (Main)

$$A_M = 0.62 \cdot P \cdot E \quad (1.67)$$

- Предње једро (Jib)

$$A_J = 0.5 \cdot \sqrt{M^2 + J^2} \cdot L_P \quad (1.68)$$

- Укупна површина једара

$$A_S = A_M + A_J \quad (1.69)$$

- Тежишта једара по висини од палубе

- Главно једро (Main)

$$CE_M = 0.39 \cdot P + BAS \quad (1.70)$$

- Предње једро (Jib)

$$CE_J = 0.39 \cdot M \quad (1.71)$$

- Укупно тежиште једара по висини

$$CE = \frac{A_M \cdot CE_M + A_J \cdot CE_J}{A_S} \quad (1.72)$$

- Тежишта једара по дужини од јарбола

- Главно једро (Main)

$$XCE_M = -0.33 \cdot E \quad (1.73)$$

- Предње једро (Jib)

$$XCE_J = 0.33 \cdot J \quad (1.74)$$

- Укупно тежиште једара по висини

$$XCE = \frac{A_M \cdot XCE_M + A_J \cdot XCE_J}{A_S} \quad (1.75)$$

- Коefицијенти сила

- Узгон

$$C_L = \frac{A_M \cdot C_{LM} + A_J \cdot C_{LJ}}{A_S} \quad (1.76)$$

- Отпор

$$C_{DP} = \frac{A_M \cdot C_{DM} + A_J \cdot C_{DJ}}{A_S} \quad (1.77)$$

- Индуковани отпор

$$C_{DI} = C_L^2 \left(\frac{1}{\pi \cdot AR} + 0.005 \right), \quad AR = \frac{(1.1 \cdot (P + BAS))^2}{A_S} \quad (1.78)$$

- Укупни коefицијент силе отпора

$$C_D = C_{DP} + C_{DI} \quad (1.79)$$

Све величине су дате у прилогу 1.

2.6.5. Оптимизација положаја једара

На слици 2.10. дефинисани су улгови везани је једра, њихов положај, правац наструјавања ветра, итд. Током једрења кормилар правилним позиционирањем једара може повећати брзину кретања. Променом положаја

једара он мења угао наструјавања, а тиме и силе, тј. коефицијенте. На слици 2.22. тачке А, В и С претстављају вредности коефицијената узгона и отпора за различите углове наструјавања β . Можемо видети да ако кормилар постави једра у тачку А имаће највећу силу узгона, већу него да је у тачки В или С. Вредност коефицијента силе узгона за тачку А је највећи, тј. позиција једара је оптимална. Може се приметити да се највећа сила потиска у правцу кретања добија ако је тангента на полару нормална на правац кретања.

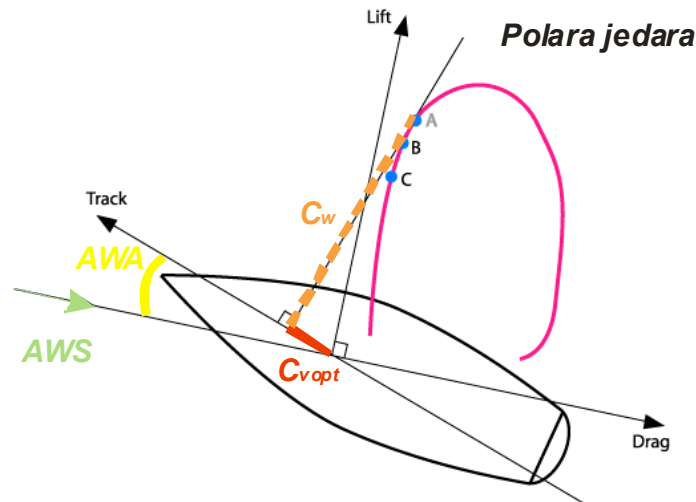
Класични поступак за одређивање оптималног положаја једара је баш оптимизовање силе потиска, тако што на правац кретања повучемо нормалу која треба да тангира полару једара. Графички се то може лако урадити, али да би аутоматизовали поступак треба наћи аналитичку везу. Кренућемо од везе коефицијената узгона C_L и отпора C_D једра и коефицијената силе у правцу кретања C_v и коефицијента силе управне на правац кретања C_w .

$$\begin{aligned} C_v &= C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \\ C_w &= C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \end{aligned} \quad (1.80)$$

Као што је речено тражимо оптимални угао наструјавања на једру, да би добили максималну вредност (екстрем) коефицијента силе у правцу кретања C_v , тј. треба одредити C_{vopt} . Познато је, да би се одредила екстремна вредност неке функције треба урадити први извод те функције и затим га изједначити са нулом. Сада треба наћи први извод по углу наструјавања β коефицијента силе у правцу кретања C_v и изједначити га са нулом. Решење ће бити оптимални положај једра и максимална вредност коефицијента силе у правцу кретања C_v .

$$\begin{aligned} \frac{dC_v}{d\beta} &= \frac{dC_L(\beta)}{d\beta} \sin \alpha - \frac{dC_D(\beta)}{d\beta} \cos \alpha \\ \frac{dC_v}{d\beta} = 0 &= \frac{dC_L(\beta)}{d\beta} \sin \alpha - \frac{dC_D(\beta)}{d\beta} \cos \alpha \\ \frac{dC_L(\beta)}{d\beta} &= \frac{dC_D(\beta)}{d\beta} \operatorname{ctg} \alpha \Leftrightarrow \frac{dC_L(\beta)}{d\beta} = \frac{dC_D(\beta)}{d\beta} \operatorname{tg}(\pi/2 - \alpha) \end{aligned} \quad (1.81)$$

Коефицијенти C_L и C_D зависе од угла наструјавања β и одређујемо их помоћу приказаних полинома, добијених вештачким неуронским мрежама, а пошто су диференцијабилни можемо одредити и прве изводе. За решавање једнакости користи се метода половљења сегмената, како би се пронашао пресек, тј. решење.



Слика 2.22. Полара једара - поступак оптимизације

Када се добије оптимални угао наструјавања из полинома се одређују коефицијенти узгона C_L и отпора C_D једра и на основу њих и коефицијенти сила у правцу кретања C_v и управни на правац кретања C_w . Оптимизација се ради посебно за главно, а посебно за предње једро, и срачунавају се укупни коефицијенти према раније описаном поступку. Тако да сад можемо прећи на одређивање аеродинамичких сила и момената који делују на једрилици.

Сила отпора ветра у једрима узима се у облику:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cdot V_{aw}^2 \quad (1.82)$$

где је ρ_v густина ваздуха, A површина једара, C_w коефицијент, V_{aw} привидна брзина ветра.

Момент ветра који накреће једрилицу је:

$$M_w = F_w \cdot l_j \quad (1.83)$$

где је l_j вертикално растојање од тежишта једрилице до тежишта једара.

Момент ветра који закреће једрилицу је:

$$M_{w\theta} = F_w \cdot x_j \quad (1.84)$$

где је x_j хоризонтално растојање од тежишта једрилице до тежишта једара.

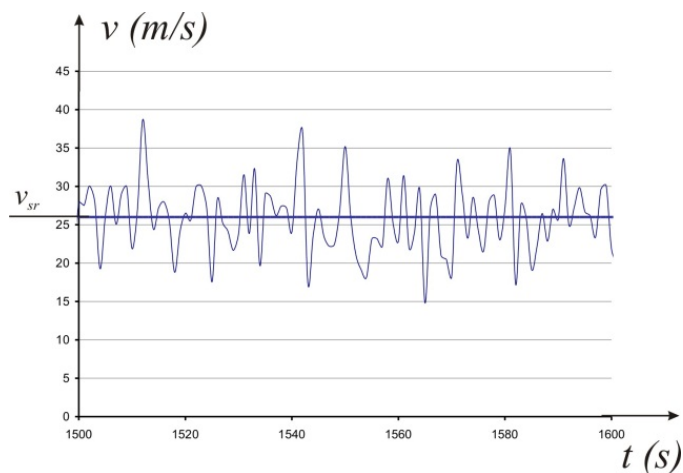
Сила потиска, у правцу кретања узима се на следећи начин:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \cdot V_{av}^2 \quad (1.85)$$

где је ρ_v густина ваздуха, A површина једара, C_v коефицијент, V_{av} привидна брзина ветра.

2.7. МОДЕЛ ВЕТРА

Ветар је природна појава, која настаје услед кретања ваздушних маса, тј. разлике притисака између њих. Карактер ветра најбоље ће описати следећа слика 2.23. Ветар није појава са сталном брзином и правцем, већ ветар има налете.



Слика 2.23. Дијаграм брзине ветра у функцији времена

Са слике 2.23. може се уочити да се брзина ветра може разложити на средњу брзину и брзину флукутација.

Брзина стварног ветра (true wind speed) одређује се на следећи начин:

$$V_v(t) = \bar{V}_v + V'(t) = \bar{V}_v + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \quad (1.86)$$

где је \bar{V}_v средња брзина ветра, ω_n и α_n су фреквенција и фазни померај n -те флукутирајуће компоненте ветра чија је амплитуда A_n одређена из спектра ветра $S(\omega_n)$ као:

$$A_n = \sqrt{2S(\omega_n) \cdot d\omega} \quad (1.87)$$

Различити аутори препоручују различите спектре ветра (видети нпр. [73]). У овој анализи коришћен је, најрелевантнији, Девенпортов спектар ветра [74]., за различите средње брзине ветра:

$$S(\omega_n) = \frac{4 \cdot \kappa \cdot \bar{V}^2 \cdot X_n^2}{\omega_n (1 + X_n^2)^{4/3}}, \quad X_n = \frac{600\omega_n}{\pi \cdot \bar{V}} \quad (1.88)$$

где је κ коефицијент храпавости терена ($\kappa = 0.015$), зависи од конфигурације земљишта поред река (приобаља). Фазни помераји α_n не могу се одредити на основу спектра, и узимају се као случајне величине, чиме се обезбеђује да је сваки ветар у функцији времена другачији.

Током времена поред промене брзине ветра мења се и његов правац. Закон промене правца стварног ветра током времена може се у првом пролазу занемарити и узимати средњи угао правца средње брзине ветра.

2.8. КОНАЧНЕ ЈЕДНАЧИНЕ КРЕТАЊА ЈЕДРИЛИЦЕ

Коначно после свих објашњења појединачних величина и утицаја могуће је написати коначне једначине кретања (1.89). Због сложености полинома Делфтске серије, отпор и бочна силе неће бити написани у развијеном облику. Треба нагласити да још једна спољна сила није узета у обзир, а то је додатна сила на кормилу којом кормилар може променити правац кретања. Тестирани су разни модели, али још увек нису дали поуздате резултате.

Једначина залетања

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{(1+m_\xi) \cdot \Delta} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \cdot \\ & \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \\ & - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \cos(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \\ & + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \sin(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \end{aligned} \right]$$

Једначина заношења

$$\ddot{\eta} = \frac{1}{(1+m_\eta) \cdot \Delta} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \cdot \\ & \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \\ & - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \\ & - F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) - n_\eta \dot{\eta} |\dot{\eta}| \end{aligned} \right]$$

Једначина ваљања

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{(J_x + m_\varphi)} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \cdot \\ & \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \\ & \cdot l_j \cos \varphi + \left(R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \right. \\ & \left. + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \right) \cdot l_h \cos \varphi \\ & - n_\varphi \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| - g \Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi \end{aligned} \right]$$

Једначина закретања

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{(J_z + m_\theta)} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \cdot \\ & \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi} + x_j \dot{\theta}}{\dot{\xi}} + \theta \right) \right) \\ & \cdot x_j \cos \theta + \left(R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \right. \\ & \left. + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv} + \theta) \right) \cdot x_h \cos \theta - n_\theta \dot{\theta} |\dot{\theta}| \end{aligned} \right]$$

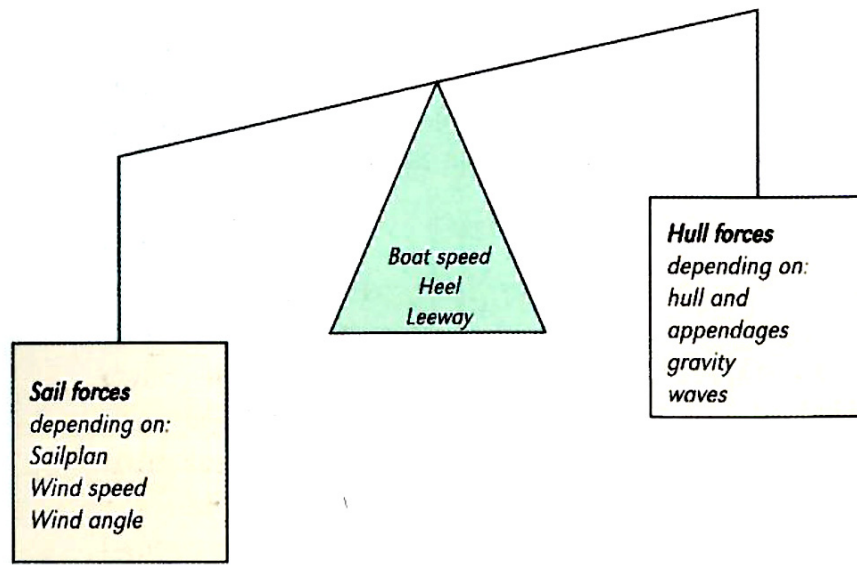
3

СТАЦИОНАРНО КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ У ВОДЕНОЈ СТРУЈИ

3.1. УВОД У СТАЦИОНАРНО КРЕТАЊЕ – ДИНАМИЧКА РАВНОТЕЖА

Проблем стационарног кретања једрилице своди се на налажење динамичке равнотеже аеродинамичких и хидродинамичких сила које делију на једрилицу при дејству константног ветра (видети слику 2.3). Проблем предвиђања перформанси при стационарном једрењу датира још из 1930. године, када је развијен први метод за прорачун брзине брода и правца кретања, који је претеча модерних метода. Почетком седамдесетих година прошлог века група истраживача са МИТа је усавршила метод прорачуна брзине једрилице на бази линија трупа, опреме и плана једара [11]. Ово је био први програм за предвиђање брзине (Velocity Prediction Program – скраћено VPP), накнадно је усавршаван и развијан, али основни аспекти који чине језгро методе и данас важе.

Суштина метода и програма за предвиђање перформанси једрилица (VPP) је да нађе равнотежу између аеродинамичких и хидродинамичких сила које делују на једрилицу. Да би се што боље објаснила филозофија метода искористиће се илистрација (слика 3.1) из референце [11] (оригинал [31]).



Слика 3.1. Равнотежа аеро-хидродинамичких сила [11],[31]

Метод решава максималну брзину једрилице за све правце кретања и задати ветар одабиром најбоље комбинације расположивих једара и њиховим оптимални позиционирањем.

Метод и програм за предвиђање перформанси (брзине) једрилица (VPP) су врло користан алат и имају широку примену. На пример, код пројектовања тркачких једрилица могу се користити на више начина:

- За одабир димензија и форме једрилице,
- За систематску варијацију плана једара, опреме и изданака са циљем налажења најбоље комбинације,
- Да се испита утицај на различите опције дизајна,
- За анализу резултата добијених из моделских испитивања у базенима и ваздушним тунелима,
- За процену утицаја на перформансе приликом структурних промена једрилице.

Поред наведених примена, које су типичне при оптимизацији тркачких перформанси, постоји и низ других примена при пројектовању једрилица и усавршавању изданака, као на пример:

- Одабир димензија и типа изданака трупа (кобилица, кормила, крила, ...),
- Одабир димензија и типа једриља (јарбол, једра, ...),
- Утицај побољшања аеродинамике и хидродинамике изданака на перформансе једрилице,
- Користи се и за процену отпора при кретању једрилице за одабир помоћног мотора.

Као што се може видети примена програма за предвиђање перформанси (VPP) је широка и разноврсна. Може се користити како у првим фазама пројектовања, финалним фазама пројектовања, тако и у анализама постојећих једрилица и побољшавању њихових перформанси.

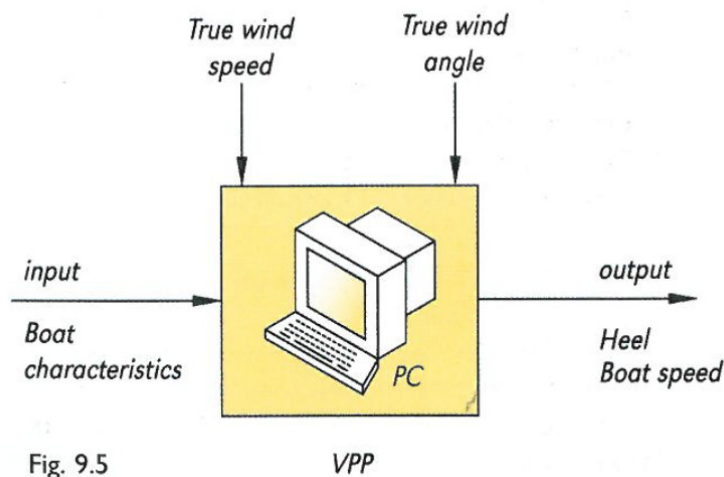
Већина програма за предвиђање перформанси (VPP) решава стационарни (равнотежни) положај једрилице, одређује брзину и нагиб једрилице за задату брзину и правац стварног ветра (TWS/TWA). Такође, постоје програми који решавају нестационарно кретање, о чему је било речи у Поглављу 2 а чија је анализа дата у поглављима 4 и 5.

Данас постоји доста VPP програма, који се разликују по корисничком интерфејсу, броју једначина равнотеже, алгоритму решавања једначина, моделовању аеро-хидродинамичких сила, итд., али сви ови програми имају заједничке елементе, сви садрже:

- сет улазних параметара (карактеристике једрилице, брзина и правац ветра)
- математички модел брода
- алгоритам за решавање једначина
- сет излазних параметара (брзина и нагиб једрилице, али може бити и занешење, оптимални положај једра итд.)

што је илустративно показано на слици 3.2.

Најважнији део сваког VPP алгоритма је рутина за решавање равнотежног положаја (слика 2.3), када се једрилица креће праволинијски константном брзином, при томе суме свих сила и момената који делују на једрилицу су једнаки



Слика 3.2. Општа шема VPPa [11]

нули. Ако ово разложимо на три главне тежишне осе x , y и z имамо следеће услове динамичке равнотеже:

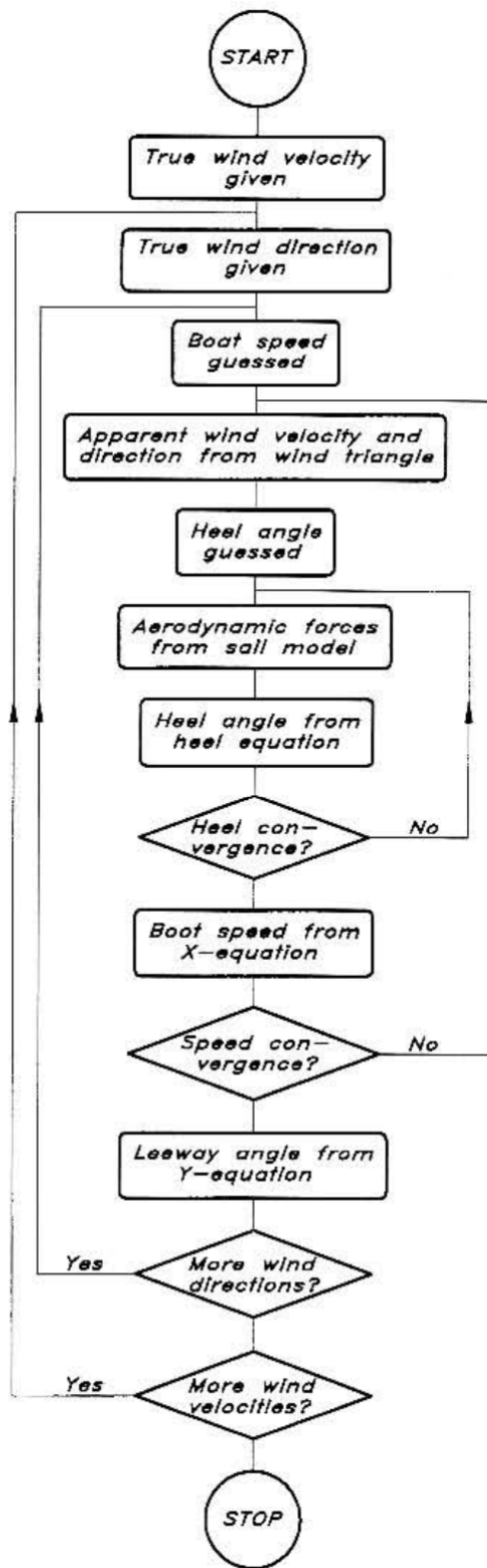
- Дуж осе x , у правцу кретања, имамо равнотежу сила укупног отпора трупа R_x и узгонске силе у једрима F_{wx}
- Дуж осе y , управно на правац кретања у хоризонталној равни, имамо равнотежу бочне сила подводног дела трупа F_h и бочне силе у једрима F_{wy}
- Дуж осе z , вертикално на правац кретања, имамо равнотежу силе узгона U (истиснућа) и тежине W једрилице и вертикалних компоненти сила у једрима F_{wz} и подводни део трупа F_{lz}
- Око осе x имамо равнотежу момента попречног стабилитета и накретног мометна од бочних сила
- Око осе y имамо равнотежу момента подужног стабилитета и накретног мометна посртања од сила у правцу кретања
- Око осе z имамо равнотежу момента закретања, као последицу уравнотежења аеро и хидродинамичких сила које делују дуж истог правца, што обезбеђује сила на кормилу

Као што можемо да видимо постоји динамичка равнотежа свих 6 степени слободе. У пракси силе у вертикално правцу су аутомаски уравнотежене, као и моменти око осе y . Тако да се систем своди на 4 степена слободе. Мало је

програма који у обзир узимају и равнотежу момента закретања, али најнапреднији програми имају модел закреног положаја кормила и могу тај утицај узети у разматрање. У већини случајева систем се своди на равнотежу са три степена слободe (напредовање, заносење и ваљање). Само решење једначина, због сложености проблема, није сасвим очигледно, тако да би се решиле једначине нешто се мора претпоставити и радити итеративно док се не дође до решења. Као што је већ речено вредности неких променљивих се морају претпоставити, најчешће то је интензитет и правац брзине, тј. брзина и угао заносења, а некад се мора претпоставити и угао нагиба. На основу претпостављених вредности добија се решење система једначина (равнотежа) које се може разликовати од претпостављених, тако да се поступак понавља све док се претпостављене и добије вредности непоклопе, тј. док систем неуравнотежи. На слици 3.3 дата је блок шема једног VPP алгоритма [10], алгоритам систематски мења стварну брзину и правац ветра, а резултати се могу приказати у форми поларних дијаграма о чему ће бити речи у поглављу 3.3.

3.2.ЈЕДНАЧИНЕ ДИНАМИЧКЕ РАВНОТЕЖЕ СА И БЕЗ УТИЦАЈА ВОДЕНЕ СТРУЈЕ

У оквиру овог истраживања развијен је метод и програм за предвиђање перформанси (брзине) једрилица (VPP), који узима у обзир и утицај водене струје на перформансе једрилице. У литератури нема много података о утицају водене струје (морска и речна водена струја) на кретање једрилице при једрењу. Током истраживања утицаја водене струје на кретање једрилице наишло се на занимљив текст аутора Виктора Козлова [86] „Ветар и водена струја“ (Wind and current). Пошто је био једриличар, Козлов је приметио да није исто када се једри на мирној води и ако постоји водена струја, у тексту је описао и илустровао тај утицај. Описао је како је прилагодио једрење утицају водене струје, и да му је то помогло да освоји прво место на трци „Golden Cup“ у Францујској 1966. Као што видимо сама појава је доста давно примећена, али је мало обрађена у литератури.

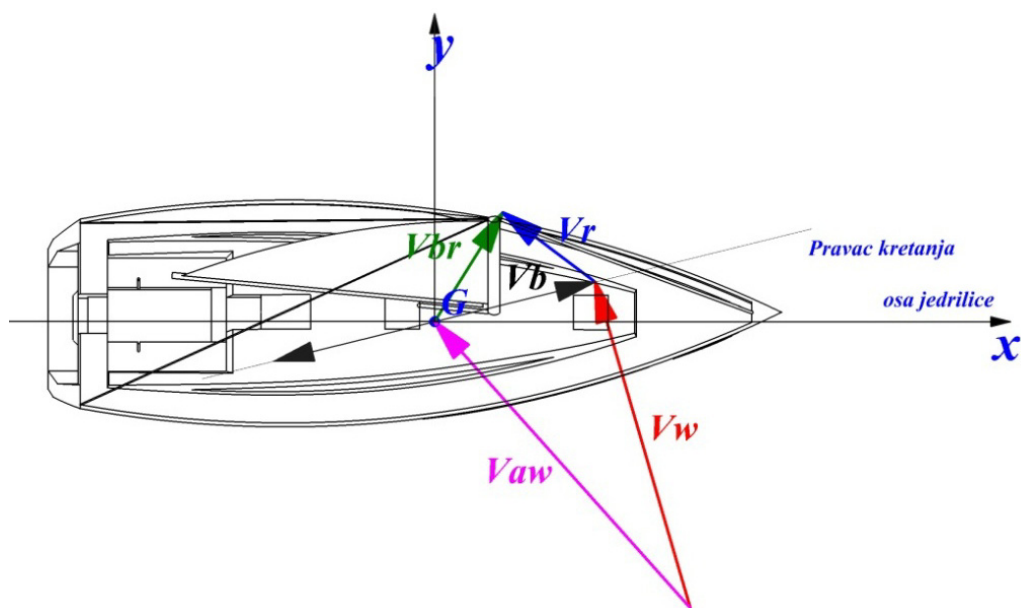


Слика 3.3. Блок шема VPPa [10]

За разлику од метода који је Козлов представио у свом раду, у овом истраживању биће дата два нова начина анализе утицаја водене струје. Први начин је приближан и сличан методу датом у [86], али утицај водене струје се преноси на брзину једрилице, а не на брзину ветра, тако да се нова брзина кретања једрилице добија векторским прерачунавањем брзине кретања и брзине водене струје (слика 3.4). Поступак је крајње једноставан, и помоћу њега се могу прерачунати постојећи поларни дијаграми брзина једрилице без утицаја водене струје на нове приближне поларне дијаграме са утицајем водене струје, што ће бити и приказано у поглављу 3.4.

Други начин је много сложенији и у обзир узима утицај водене струје и на хидродинамичке силе, али и на аеродинамичке силе, чиме се добије знатно реалнији и тачнији модел кретања. Као што је већ описано и поглављу 2, утицај водене струје се одража на све параметре кретања.

У самом истраживању прво се кренуло од стационарног решења проблема кретања једрилице са и без утицаја водене струје, што је послужило за моделовање и решење нестационарног кретања. У овом раду приказаћемо обрнути поступак, свођење једначина нестационарног кретања (изведене у поглављу 2) на једначине стационарног кретања.



Слика 3.4. Векторско прерачунавање брзине једрилице

Ако претпоставимо да је кретање стационарно, тј. да се једрилица креће праволинијски константном брзином под дејством ветра константне брзине и правца, спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине (једначине 1.9-1.12) пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања своде се на:

$$0 = F_{w\xi}(V_{aw}) - F_{\xi}(\dot{\xi}) - F_{\xi}(\varphi) - F_{\xi}(\dot{\eta})$$

$$M_{st}(\varphi) = M_w(V_{aw}) + M_{Fh}(\dot{\eta}) \quad (1.90)$$

$$0 = F_{w\eta}(V_{aw}) - F_{\eta}(\dot{\eta}) - F_{\eta}(\varphi) - F_{\eta}(\dot{\xi})$$

Код стационарног кретања све флукутирајуће компоненте ветра и кретања постају 0, координатни системи $Gxyz$ и $O\xi\eta\zeta$ се поклапају. Ако све ово применимо на коначне једначине (1.89) добићемо:

$$\dot{\xi} \Rightarrow V_x, \quad \dot{\eta} \Rightarrow V_y, \quad V_B = \dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2, \quad \frac{\dot{\eta}}{\dot{\xi}} \Rightarrow \varepsilon$$

Једначина залетања

$$0 = \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \cos \varepsilon - \frac{1}{2} \rho_w C_w A \cos \varphi \sin \varepsilon \right) \cdot (V_B^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_v \cos \delta) - R(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \cos(\varepsilon - d_{Bkv}) + F_h(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \sin(\varepsilon - d_{Bkv})$$

Једначина заношења

$$0 = \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \varepsilon - \frac{1}{2} \rho_w C_w A \cos \varphi \cos \varepsilon \right) \cdot (V_B^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_v \cos \delta) - R(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv}) - F_h(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv})$$

Једначина ваљања

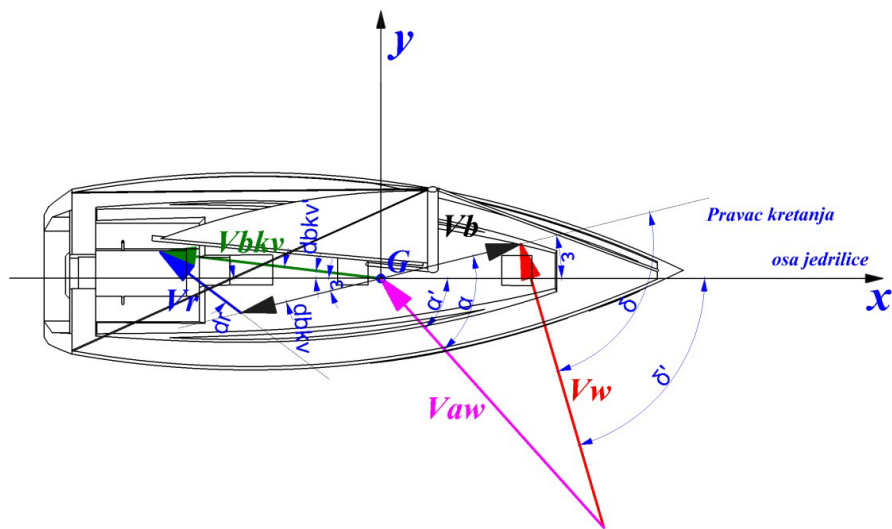
$$0 = \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \varepsilon - \frac{1}{2} \rho_w C_w A \cos \varphi \cos \varepsilon \right) \cdot (V_B^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_v \cos \delta) \cdot l_j \cos \varphi + \left(R(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv}) + F_h(V_B, \varepsilon, \varphi, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv}) \right) \cdot l_h \cos \varphi - g \Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi$$

Ако се сада једначина заношења замени у једначину ваљања (накретања) имаћемо:

$$0 = \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \varepsilon - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \varepsilon \right) \cdot (V_B^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_B \cdot V_v \cos \delta) \cdot (l_j + l_h) \cos \varphi - g \Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi$$

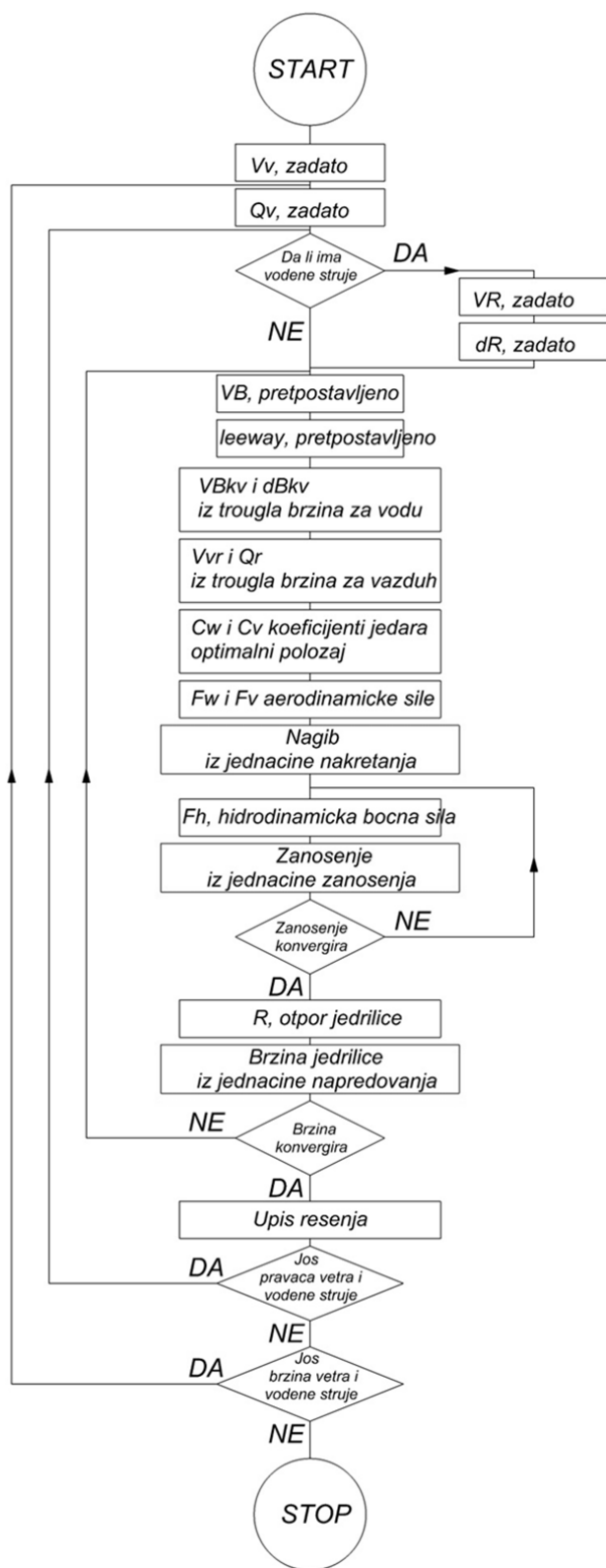
где је $l_j + l_h = H_s$ растојање од тежишта подводне до тежишта надводне латералне површине.

На слици 3.5. приказани су троуглови брзина са угловима за стационарно кретање. Иако много једноставније од нелинеарних диференцијалних једначина, и ове једначине се морају решавати итеративно. За задате брзину и правац стварног ветра, брзину и правац водене струје, мора се претпоставити брзина једрилице и угао заношења, и кроз итерације приближавати претпостављене вредности са израчунатим.



Слика 3.5. Приказ троуглова брзине

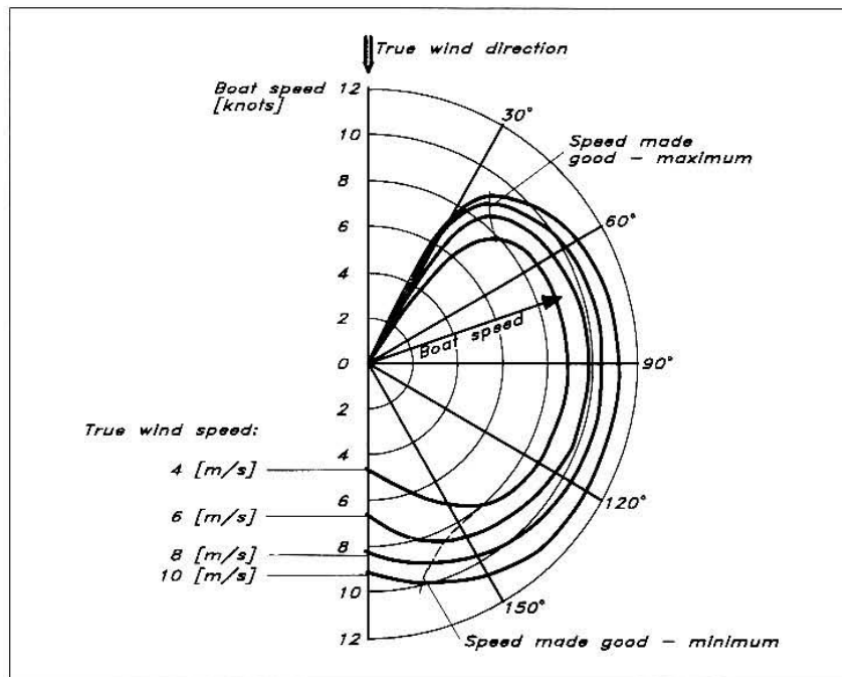
На основу свега изложеног развијен је оригинални софтвер којим се може решавати динамичка равнотежа кретања једрилице са и без утицаја водене струје. На слици 3.6. приказана је блок шема програма. Као што се види програм омогућава решавање динамичке равнотеже, може се одабрати да ли ће се утицај водене струје узети у обзир или не. Такође, могуће је решити појединачни случај кретања, али је могуће добити и решења за низ случајева брзина и правца ветра, као и брзине и правца водене струје. У прилогу 4 је дат кратак опис програма, а у поглављима која следе дати су примери.



Слика 3.6. Блок шема програма

3.3. КОНСТРУКЦИЈА ПОЛАРНОГ ДИЈАГРАМА БРЗИНЕ ЈЕДРИЛИЦЕ И ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА СА ДРУГИМ ДОСТУПНИМ СОФТВЕРИМА

Поларни дијаграм брзина једрилице је излаз из скоро сваког VPP програма и дијаграм који свако ко се бави једрењем зна да користи. На дијаграму су приказане брзине једрилице у зависности од више праваца и више брзина ветра, што се може видети на слици 3.7. Типично је да је дијаграм симетричан у односу на правац ветра, када нема утицаја водене струје.

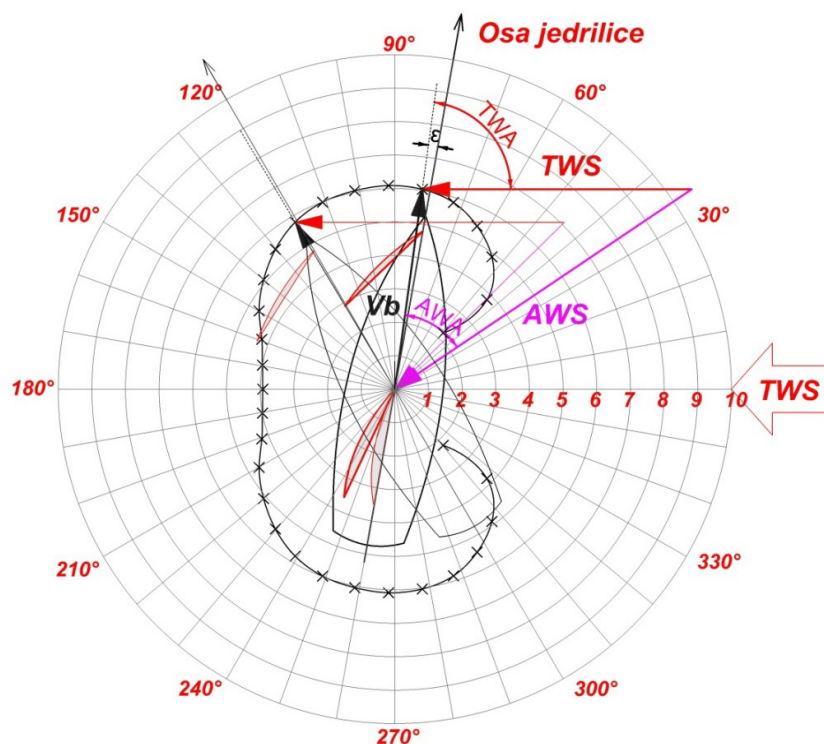


Слика 3.7. Поларни дијаграм брзине једрилице [10]

Да би што боље разумели поларни дијаграм са и без утицаја водене струје, конструисаћемо један поларни дијаграм. На сваком поларном дијаграму фиксира се положај стварног ветра и у односу на њега се одређује правац пловидбе а самим тим и угао стварног ветра који делије на једрилицу. За сваки правац пловидбе у односу на правац стварног ветра и интензитета брзине ветра, конструисе се троугао брзина кроз ваздух (о чему је било речи у поглављу 2), а

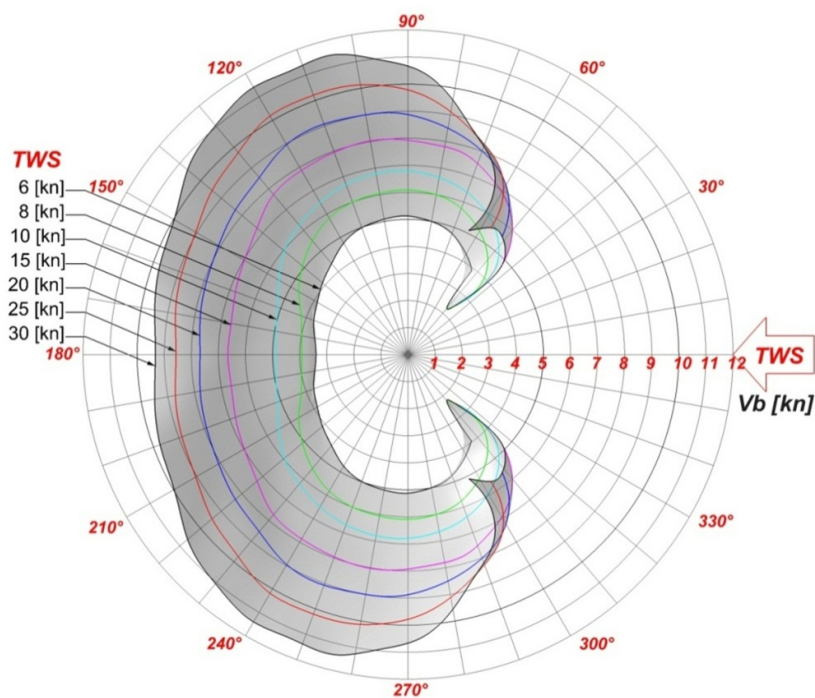
VPP програм налази максималну брзину пловидбе са расположивим једрима и оптималним положајем једара.

На слици 3.8. приказано је конструисање једног поларног дијаграма, приказана су два правца пловидбе у односу на стварни ветар са пратећим величинама које улазе у прорачун. Треба запазити да се оса једрилице не поклопа са правцем кретања, због занешења које се јавља.



Слика 3.8. Конструкција поларног дијаграма

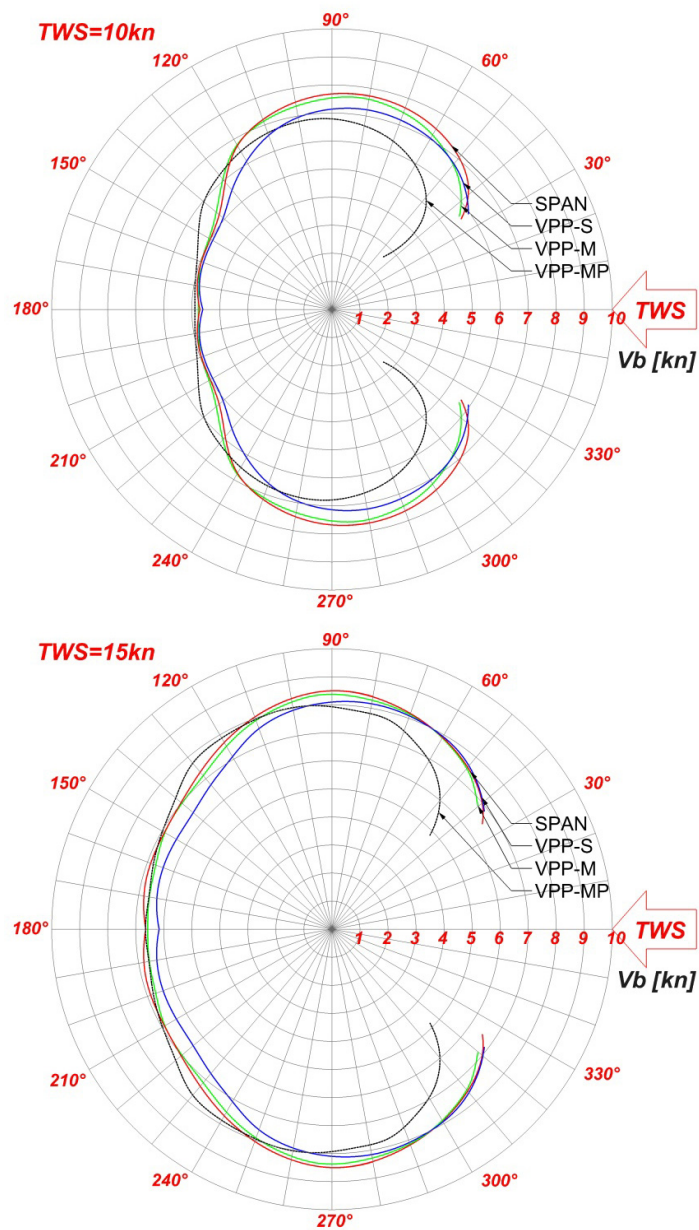
Ако овај поступак поновимо за све углове правца пловидбе у односу на стварни ветар и ако при том изваримо и брзину стварног ветра добићемо један уобичајени поларни дијаграм, који је приказан на слици 3.9. Дијаграм је излаз из програма VPP-M који је развијен током истраживања, а резултати су дати за једрилицу YD-40 из референце [10], која је била родитељ Делфтске серије, а у књизи [10] је дат цео процес пројектовања. Ова једрилица је и у оквиру истраживања коришћена као еталон, у прилогу 1 дата је кратак опис једрилице са свим потребним димензијама, генералним планом и планом једара.



Слика 3.9. Поларни дијаграм једрилице у мирној води, прорачунат програмом VPP-M

Провера добијених резултата из поларног дијаграма за исту једрилицу је урађена и поређење резултата је дато на слици 3.10. за две брзине стварног ветра. За проверу су коришћени доступни VPP програми, један развијен раније на катедри за бродоградњу VPP-S [70] а други је SPAN [85] из програмског пакета MAXSURF. Резултати су приказани за поларе једара које се најчешће користите (оптимизоване поларе), али дати су подаци и за изворне поларе једара (VPP-MP), које нису оптимизоване и над којима се примењује оптимизација, о чему је било речи у поглављу 2. Може се приметити да се резултати са сличним полара доста добро поклапају, а да резултати са изворним поларама, због разлике у геометрији једара, у зони једрења у ветар одсупају, тј. једрилица лошије једри у ветар, али у зони једрења низ ветар показује боље резултате.

Сви до сад приказани резултати су без утицаја водене струје на кретање једрилице, што на морима и јесте најчешћи случај, али постоје и зоне у којима се утицај водене струје не може занемарити.

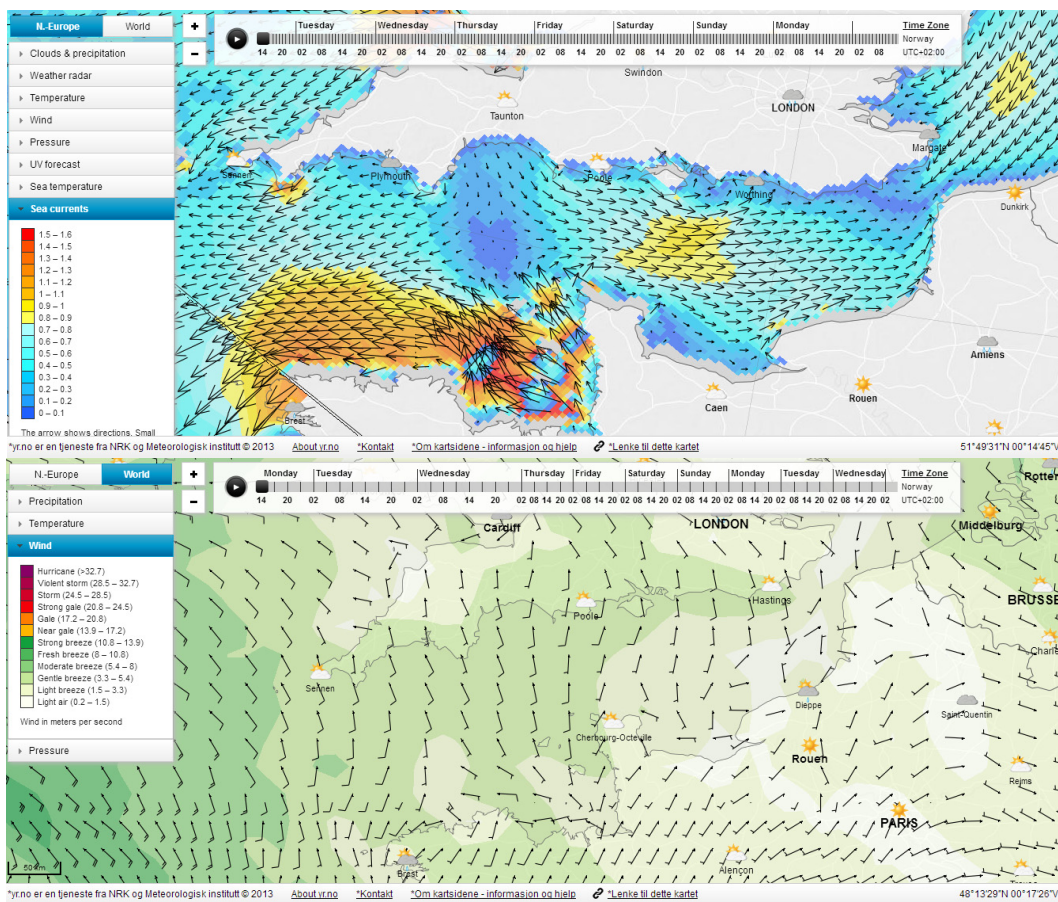


Слика 3.10. Поређење резултата VPP програма

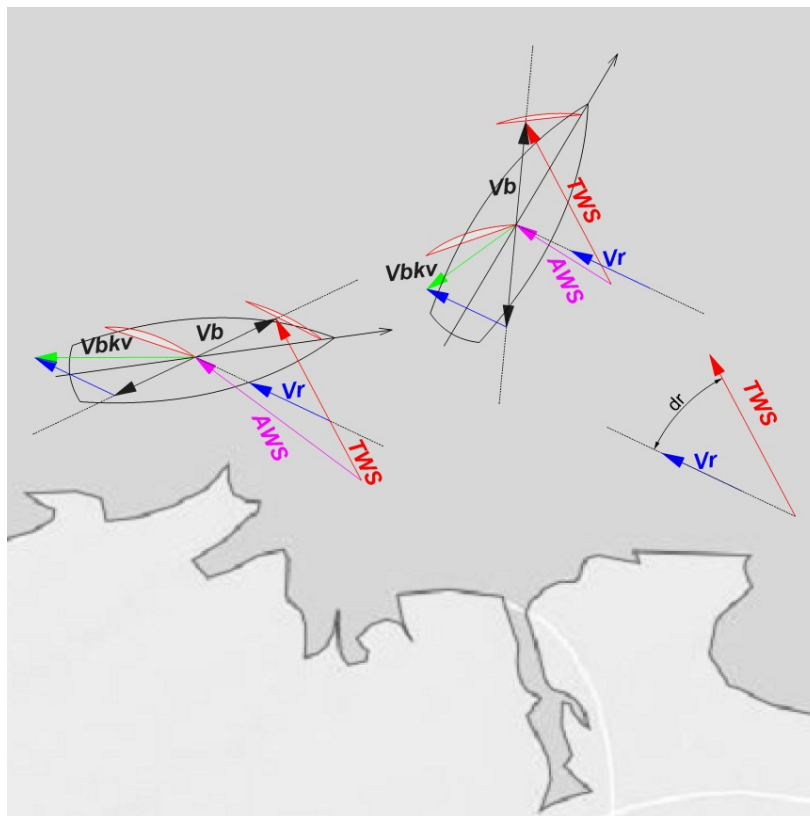
3.4. ВОДЕНА СТРУЈА И КОНСТРУИСАЊЕ ПОЛАРНОГ ДИЈАГРАМА БРЗИНЕ ЈЕДРИЛИЦЕ

Код утицаја водене струје могу се разматрати два приступа, када је правац водене струје константан у односу на правац стварног ветра и када је константан у односу на осу једрилице.

Приступ I, када је правац водене струје константан у односу на правац стварног ветра, је приступ који се може користити код једрења у приобалном морском подручју у ком постоји водена струја и за коју постоје подаци о брзини и правцу. Подаци о воденој струји, као и о ветру, могу се добити у Хидрометеоролошком заводу и најчешће су приказани као на слици 3.11. (пример НРК метеоролошки институт, сајт www.yr.no, позиција канал Ламанш). На основу ових података могуће је добити податке за кретање једрилице у било ком правцу у односу на водену струју и ветар, ако њихов однос остаје исти (угао α је константан), слика 3.12.



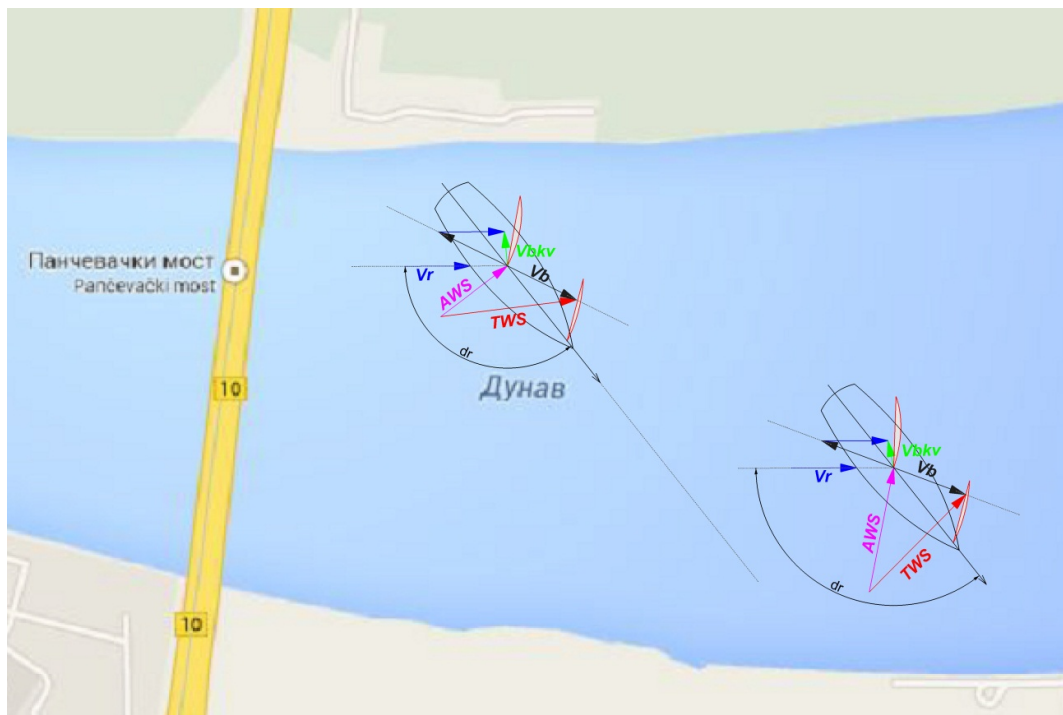
Слика 3.11. Приказ водене струје и ветра на локацији канала Ламанш, извор НРК <http://www.yr.no/>



Слика 3.12. Однос водене струје и ветра

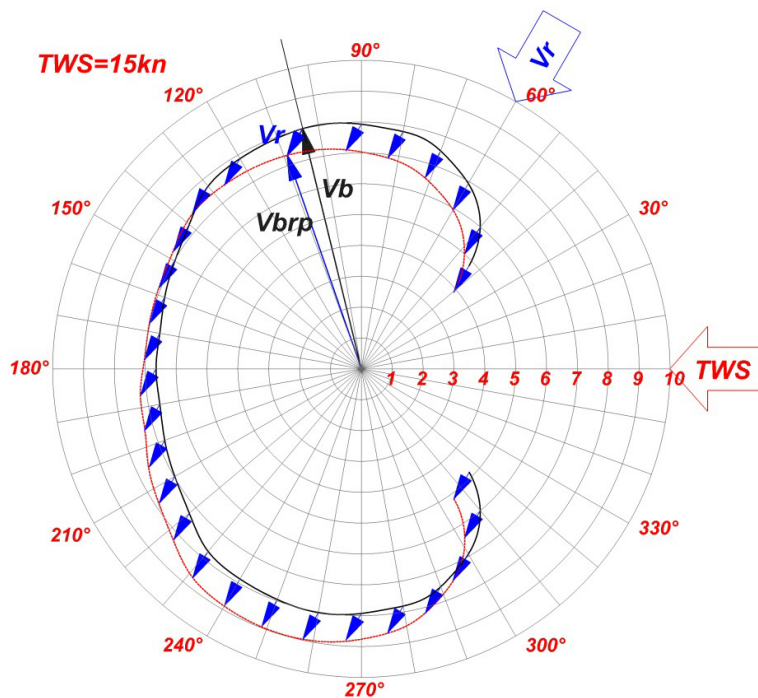
Приступ II, када је правац водене струје константан у односу на осу једрилице, је приступ који се може користити када посматрач/кормилар може да препозна правац водене струје, пример једрење на реци, нпр. када треба прећи са једне обале на другу (слика 3.13.). Брзина водене струје (реке) може да се одреди ако се пусти једрилица да плута и вредност се очита на показивачу брзине или GPS уређају или на основу података Хидрометеоролошког завода. У овом случају стварни ветар може да мења свој правац током пловидбе због конфигурације терена/обала.

И један и други приступ су у суштини исти, исте се вредности добију за један случај равнотеже, само је представљање резултата другачије. Некад је лакше приказати резултате на један начин, а некад на други начин, исто тако и код примене дијаграма од стране корисника током реалног једрења. Из поменутих разлога резултате ћемо приказати на основу оба приступа.



Слика 3.13. Однос водене струје и осе једрилице

Утицај водене струје на кретање једрилице посматрамо на два начина, као што је већ речено у поглављу 3.2., први начин је приближан и састоји се из векторског прерачунавања постојећих резултата, а други прорачунава утицај на све параметре кретања помоћу програма VPP-M. На слици 3.14. је дат поступак прерачунавања брзине и правца кретања једрилице кад постоји утицај водене струје, ако се претпостави да је угао између водене струје и правца стварног ветра константан. Узрцамо било који произвољни правац кретања једрилице и на крај вектора брзине једрилице нанесемо вектор брзине водене струје. Ако то поновимо за цео интервал правца добићемо прерачунати поларни дијаграм брзине једрилице под дејством водене струје константног правца у односу на правац стварног ветра.



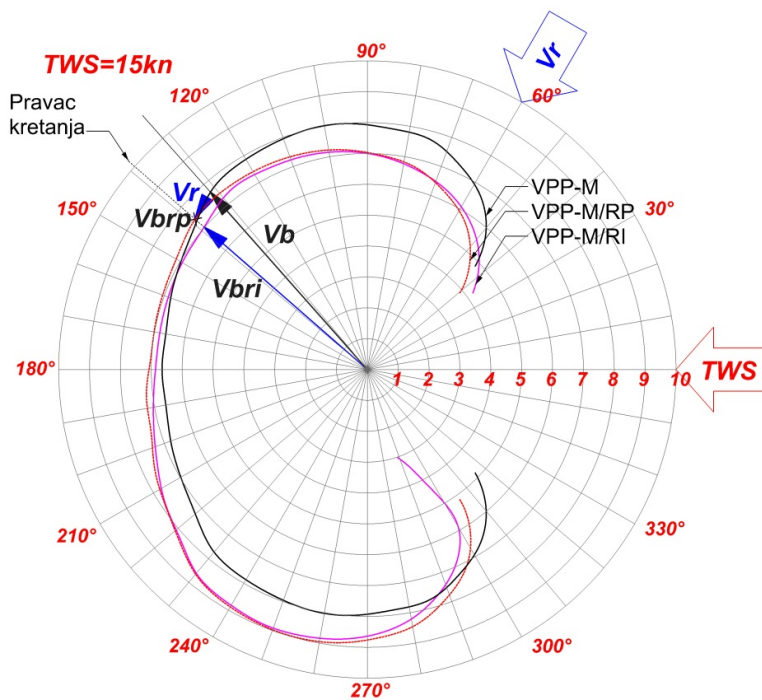
Слика 3.14. Конструисање дијаграма под дејством водене струје

Приказани дијаграм је за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), брзину водене струје 1 kn (0.5144 m/s), и стални правац водене струје у односу на правац ветра од 60°. На исти начин се може прерачунати и за било коју другу брзину водене струје и било који угао правца водене струје у односу на правац старог ветра. Остали дијаграми су дати у прилогу 2.

На први поглед се може учинити да је ово тривијалан проблем, али корисник за сада је одредио брзину и правац кретања, али не зна како то и да постигне, пошто не зна остале вредности (нагиб, положај једара, итд.). На овај начин корисник зна шта треба да постигне и којим вредностима треба да тежи, и ово може бити врло користан приступ за брзо одређивање утицаја водене струје током трка.

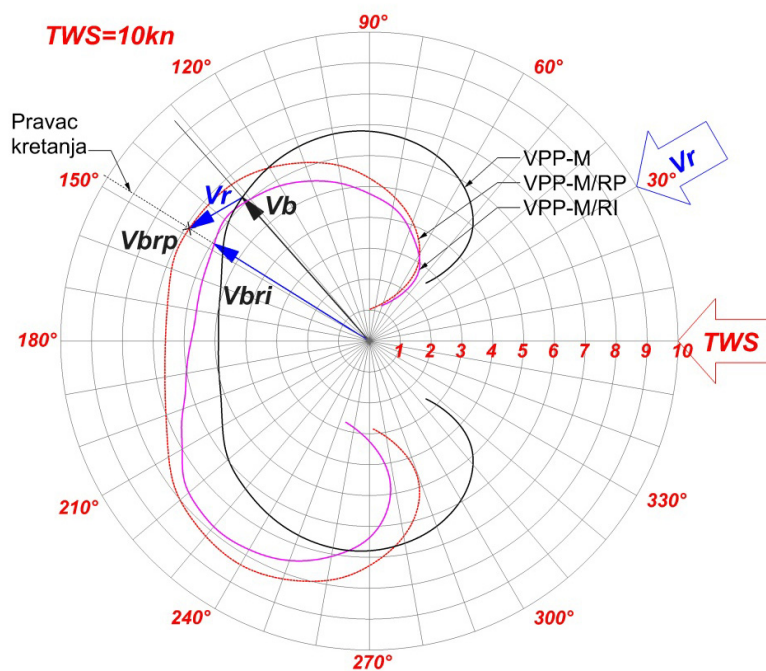
Ако сада упоредимо ове резултате са резултатима добијеним из програма VPP-M, који узима стварни утицај водене струје на све параметре добићемо дијаграм на слици 3.15. (приказани дијаграм је за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), брзину водене струје 1 kn (0.5144 m/s), и стални правац водене струје у односу на правац ветра од 60°). Може се приметити да

постоје разлике у израчунатим (VPP-M/RI) и прерачунатим (VPP-M/RP) резултатима, у неким зонама су мање, а у неким веће вредности брзине једрилице. Разлика се повећава са повећањем брзине водене струје, а са смањењем брзине водене струје разлика се смањује. Тренд је обрнут ако се посматра брзина ветра, са порастом брзине ветра разлике су мање, а са смањењем брзине ветра разлике су веће, а да се при томе брзина водене струје не мења. Ако посматрамо угао између правце водене струје и правца стварног ветра, исто долази до разлике у резултатима.



Слика 3.15. Поређење два начина прорачуна утицаја водене струје

На слици 3.16. приказане су разлике у резултатима, ако променимо брзину и правца водене струје (приказани дијаграм је за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 10 kn (5.144 m/s), брзину водене струје 2 kn (1.0288 m/s), и стални правац водене струје у односу на правац ветра од 30°). У прилогу 2 дато је још дијаграма који приказују разлике у резултатима при варијацији улазних параметара (брзина и правац водене струје, брзина ветра,...).



Слика 3.16. Поређење два начина прорачуна, за друге улазне параметре

Из приложених дијаграма могу се извести општи закључци:

- Ако је однос брзине водене струје и брзине ветра мали, разлике у резултатима су такође мале. Код довољно малог односа (до 0.1) поуздано је користити и приближни поступак.
- Ако је однос брзине водене струје и брзине ветра велики (већи од 0.1), разлике у резултатима се повећавају и у овом случају приближни поступак више не даје поуздане резултате
- Утицај промене правца водене струје на разлике у резултатима, такође зависи од односа брзине водене струје и брзине ветра, и ако је однос мали разлике су мале, а ако је однос велики разлике су веће

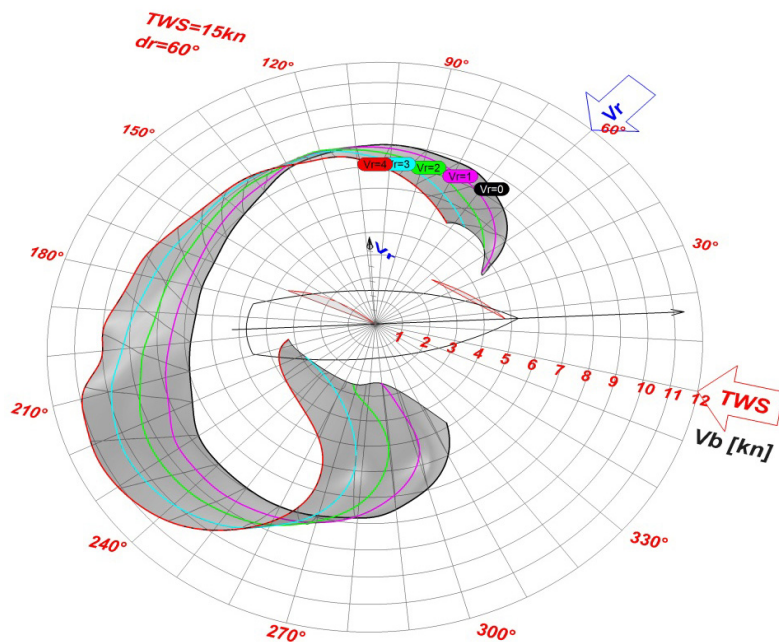
Након анализе два начина прорачуна утицаја водене струје, може се закључити да приближни поступак, поред своје једноставности, није довољно поуздан и не треба га користити. У даљој анализи користиће се други начина који узима утицај водене струје на све параметре кретања једрилице.

3.5. УТИЦАЈ ВОДЕНЕ СТРУЈЕ НА КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ

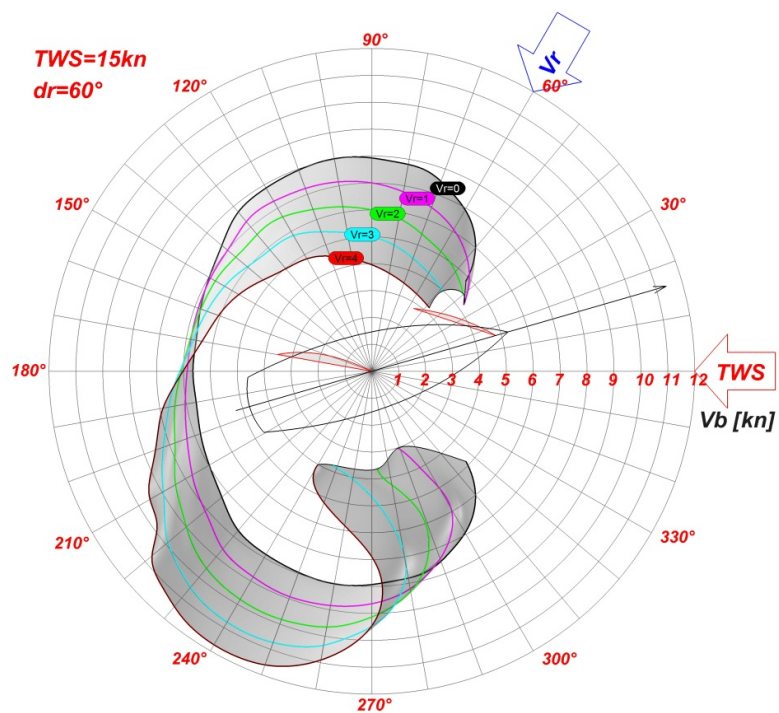
Треба сагледати утицај промене вектора брзине водене струје и по интензитету и по правцу. Већ је споменуто да за приказ утицаја водене струје на кретање једрилице имамо два приступа. Да би се боље сагледали утицаји конструисаће се тродиманзионални поларни дијаграми, на којима ће бити приказан утицај промене интензитета и правца вектора брзине водене струје.

Прво ће се разматрати утицај промене интензитета брзине водене струје, помоћу оба приступа, када је правац водене струје константан у односу на правац стварног ветра и када је правац водене струје константан у односу на осу једрилице. На слици 3.17. приказан је 3D дијаграм за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), стални правац водене струје у односу на правац ветра од 60° (приступ I), а брзина водене струје је варирана од 0-4 kn (0-2.0576m/s), што представља најчешће брзине водене струје које се могу јавити. Са порастом интензитета брзине водене струје, за овај приступ, дијаграм је се смиче у правцу брзине водене струје, што се може видети на слици 3.18. Треба запазити да највеће брзине пловидбе се остварују при једрењу низ водену струју при ветру који долази у крму. Такође је битно запазити да у зони једрење делимично низ водену струју и у ветар, заношење једрилице постаје велико, а привидна брзина ветра мала, тако да једрилицу водена струја „носи“ са собом, што се на дијаграму (слика 3.17. и 3.18.) види као завијање површи ка унутра.

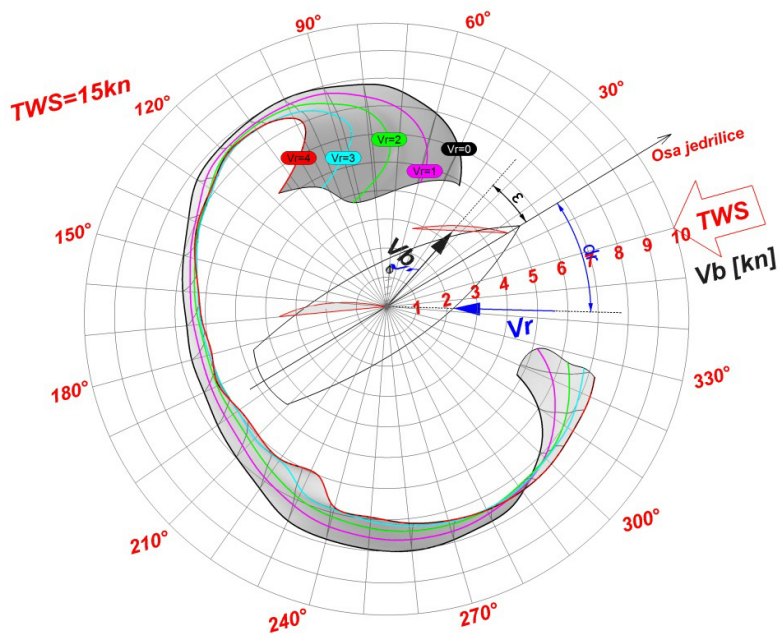
Ако размотримо утицај водене струје помоћу другог приступа, када је правац водене струје константан у односу на осу једрилице (једрилица држи исти курс у односу на водену струју, а правац ветра се мења) имамо мало другачију ситуацију. На слици 3.19. приказан је 3D дијаграм за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), стални правац водене струје у односу на осу једрилице од 60° (приступ II), а брзина водене струје је варирана од 0-4 kn (0-2.0576m/s). Са порастом интензитета брзине водене струје, за овај приступ, дијаграм је се скупља, сем у зони када су правац водене струје и правац стварног ветра, тј. њихови смерови супротстављени, једрилица једри уз водену струју и у



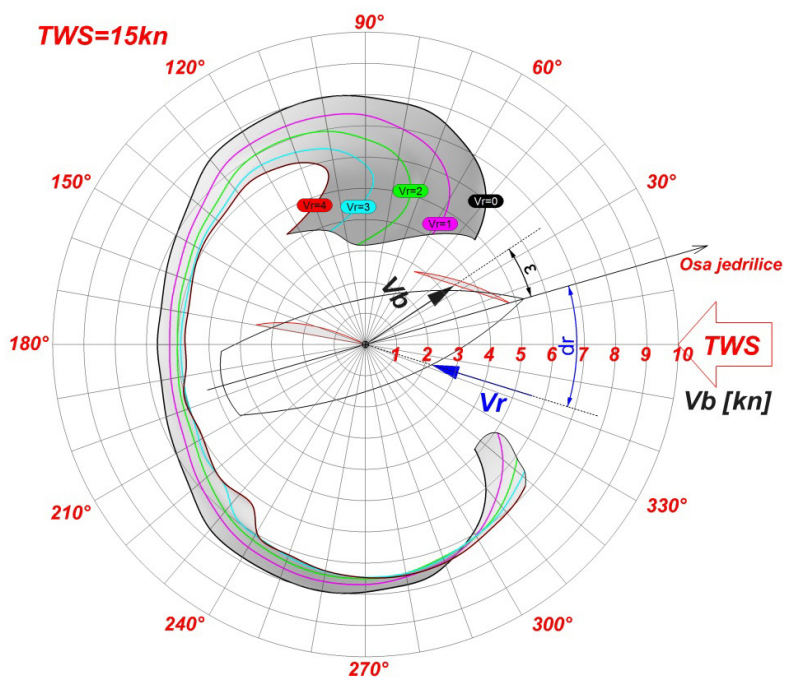
Слика 3.17. 3D дијаграм утицаја промене брзине водене струје, за стални правац водене струје у односу на правац ветра од 60°



Слика 3.18. 2D дијаграм утицаја промене брзине водене струје, за стални правац водене струје у односу на правац ветра од 60°



Слика 3.19. 3D дијаграм утицаја промене брзине водене струје, за стални правац водене струје у односу на осу једрилице од 60°

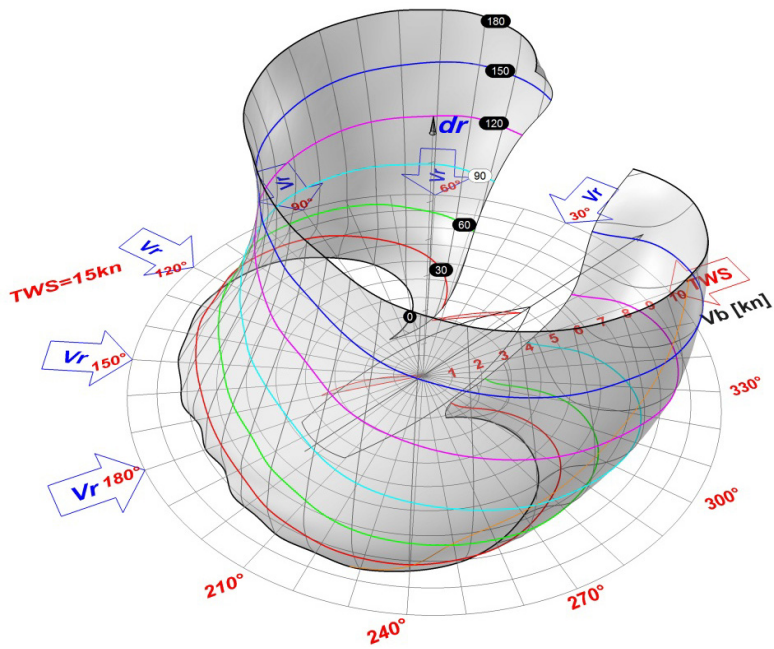


Слика 3.20. 2D дијаграм утицаја промене брзине водене струје, за стални правац водене струје у односу на осу једрилице од 60°

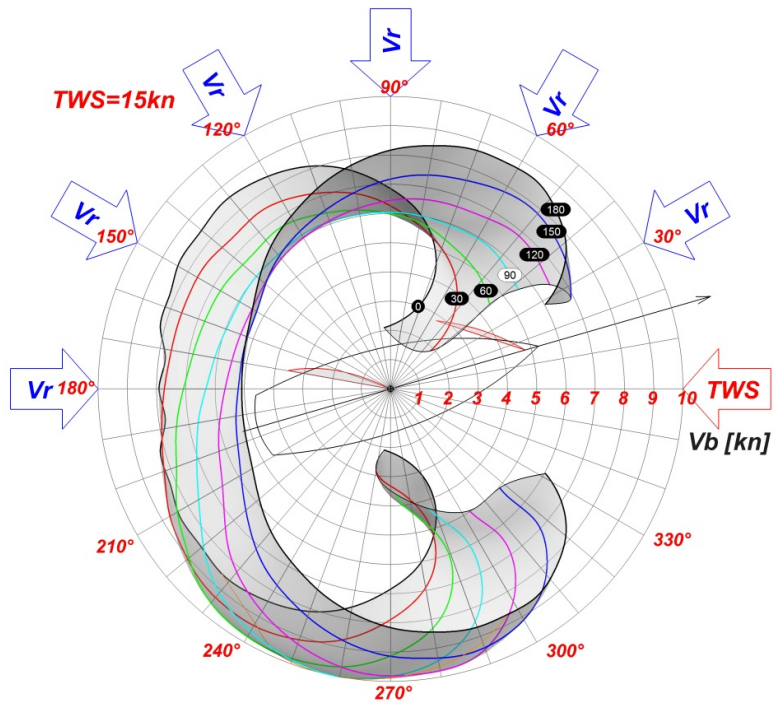
ветар, али због супротстављених смерова ова два утицаја једрилица има мање заношење и остварује повећање брзина, што се може видети на слици 3.20. Треба запазити да је најнеповољније једрење ако су правци и смерови водене струје и ветра слични, тада једрилица има велико заношење, што се на дијаграмима (слика 3.19. и 3.20.) види као завијање површи ка унутра и у овом случају водена струја „односи“ једрилицу са собом. При промени интензитета брзине водене струје и брзине ветра исти се закључци могу извести и за различите углове између правца брзине водене струје и ветра, односно осе једрилице.

Утицај промене правца, тј. угла, између водене струје и ветра (приступ I), као и водене струје и осе једрилице (приступ II) дат је на наредним дијаграмима. На слици 3.21. приказан је 3D дијаграм за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), брзину водене струје од 2 kn (1.0288 m/s), а правац водене струје се мења у односу на правац стварног ветра од 0-180° (приступ I), чиме је покривен цео опсег односа водене струје и ветра. Може се приметити да водена струја заноси дијаграм у зависности од односа, тј. угла, између водене струје и стварног ветра. Значајан утицај водене струје је и при једрењу у ветар, ако су водена струја и ветар из истог смера, једрилица лоше једри у ветар, знатно је бољи режим ако се једри низ водену струју и ветар је у крму. Очекивало би се да се највећа брзина пловидбе постиже у овом режиму, али није тако. Највећа брзина пловидбе се остварује ако се једри низ водену струју а ветар долази са бока, што се на дијаграму може видети (слика 3.22.). При оваквој пловидби привидна брзина ветра је највећа, а самим тим је највеће и узгонска сила у једрима, такође је и отпор кретању кроз воду мањи. Једрилица најбоље једри у ветар за угао између водене струје и ветра од 150°.

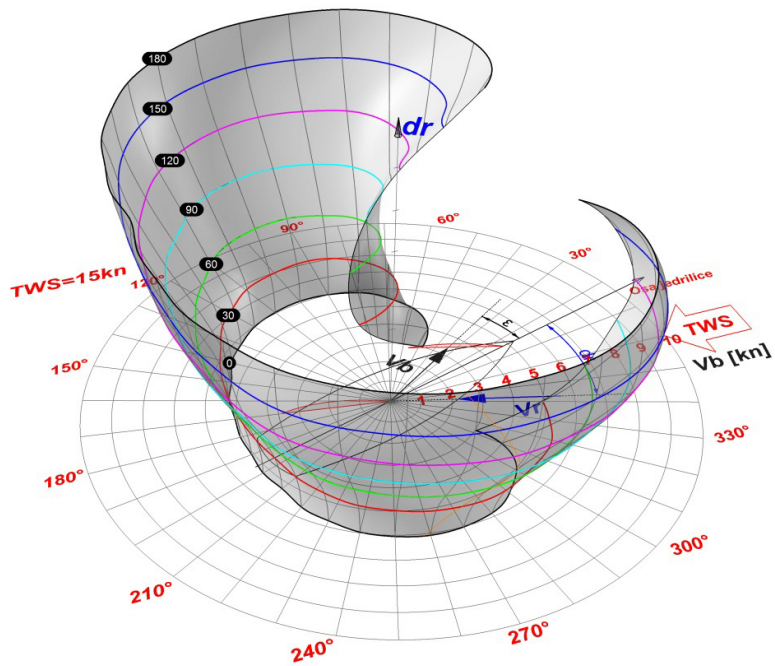
Ако сада промену правца, тј. угла, водене струје прикажемо у односу на осу једрилицу (приступ II) добићемо дијаграм на слици 3.23. Приказан је 3D дијаграм за једрилицу еталон, за брзину стварног ветра од 15 kn (7.7 m/s), брзину водене струје од 2 kn (1.0288 m/s), а правац водене струје се мења у односу на осу једрилице ветра од 0-180°. Примећује се да се дијаграм шири и благо увија у зависности од угла дејтсва водене струје, шири се пловидбе уз, до пловидбе низ водену струју. Генерално најнеповољније једрење је у водену струју (узводно



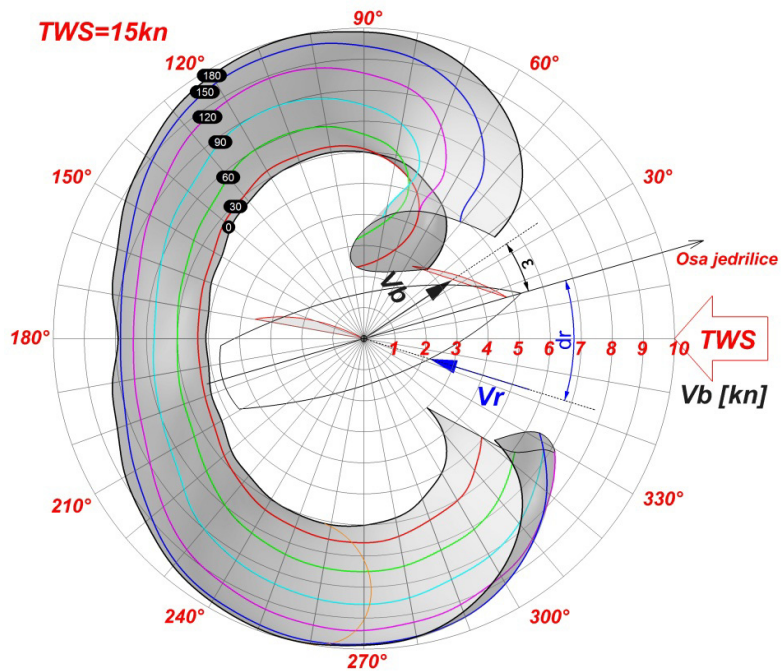
Слика 3.21. 3D дијаграм утицаја промене правца водене струје у односу на правац ветра, при брзини водене струје од 2kn



Слика 3.22. 2D дијаграм утицаја промене правца водене струје у односу на правац ветра, при брзини водене струје од 2kn



Слика 3.23. 3D дијаграм утицаја промене правца водене струје у односу на осу једрилице, при брзини водене струје од 2kn



Слика 3.24. 2D дијаграм утицаја промене правца водене струје у односу на осу једрилице, при брзини водене струје од 2kn

једрење), али екстрем је пловидба у водену струју и у ветар, тј. када се поклопе правци водене струје и ветра, што се може видети на слици 3.24., нпр. за угао од 30° . Највеће брзине пловидбе се постижу у пловидби низ водену струју, што је било за очекивати, али највећа брзина у једрењу у ветар се постиже за углове око 150° , тј. када су правци водене струје и стварног ветра слични, а смерови супротни, при томе се смањује заносење, једилица је боље балансирана, повећава се привидна брзина ветра, а тиме и узгонска сила у једрима. Као и у претходној анализи (приступ I), максимална брзина пловидбе се остварује у пловидби низ водену струју при бочном ветру. Истим поступком је могуће одредити и дијаграме за промену интензитета водене струје, али генерални закључци важе и у тим случајевима.

На основу приказаних резултата види се веома интересантна и сложена интеракција брзина водене струје, брзине ветра и брзине једрилице. Дати генерални закључци су битни за даљу анализу, али су значајни како за пројектовање једрилице, тако и за примену на регатама које се возе по рекама и областима с јаким морским струјама. Најбитније је препознати да ли у неком подручју пловидбе постоји водена струја или не (подаци Хидрометеоролошког завода, мерење, итд.). Са тим чињеницама треба прилагодити једрилицу, изданке и једриље новом режиму пловидбе под утицајем водене струје, то може бити при пројектовању или при припреми за трке (код једрилица које имају могућност прилагођавања изданака, нпр. покретна кобилица, зактилца, итд.). Такође, и прилагођавање једара током пловидбе је битно. Приказаним поступком је могуће одредити дијаграме за било коју једрилицу, са било каквом опремом, једриљем и изданицима. Према датим смерницама базу једара у програму треба проширити, како би се анализа проширила и на што више типова и класа једрилица.

4

НЕСТАЦИОНАРНО КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА У МИРНОЈ ВОДИ

Кретање једрилице у мирној води исто се не може сматрати стационарним, јер на једрилицу делује променљив ветар. Ко год је шетао поред мора могао је да примети једрилице како једре, такође је могао да примети да у зависности од ветра убрзавају или успоравају, под утицај удара ветра се накрећу, а кад ветар „опадне“ усправљају се. Тако да једрилица врши нестационарно кретање, променљиво током времена, под дејством променљивог, хаотичног ветра.

Последње деценије појављује се све више истраживања и радова који разматрају нестационарно кретање једрилице (погледати [15],[20],[57]), већина се базира на једначинама кретања датим у референци [29], које су изведене за неинерцијални координатни систем. У већини, ветар и даље узимају као константан. У референци [57] дат је модел промене брзине ветра у облику синусног таласа са придодатим шумом.

У оквиру истраживања примењен је нови модел модел ветра, о чему је било речи у поглављу 2, који флукуације ветра узима из семи-емпиријских енергетских спектра ветра. Поступак је сличан као и ког спектра таласа, који се у динамици брода (понашању брода на таласима) увелико користе као стандардни поступак. У будућим истраживањима треба додати и утицај таласа на кретање једрилице.

Из коначних једначина кретања једрилице (1.89), датих у поглављу 2, могу се извести и једначине нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог ветра у мирној води. Овде ћемо се ограничити само на проблем са три степена слободе кретања, односно решити залетање, заношење и ваљење. Утицај закретања, због могућег сложеног утицаја кормила на кретање једрилице, оставља се за будућа истраживања. Тако да једначине гласе:

Једначина залетања

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{(1+m_{\xi}) \cdot \Delta} \left[\begin{array}{l} \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \cdot \\ \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \\ - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \cos \varepsilon + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \cos \varphi \sin \varepsilon \end{array} \right]$$

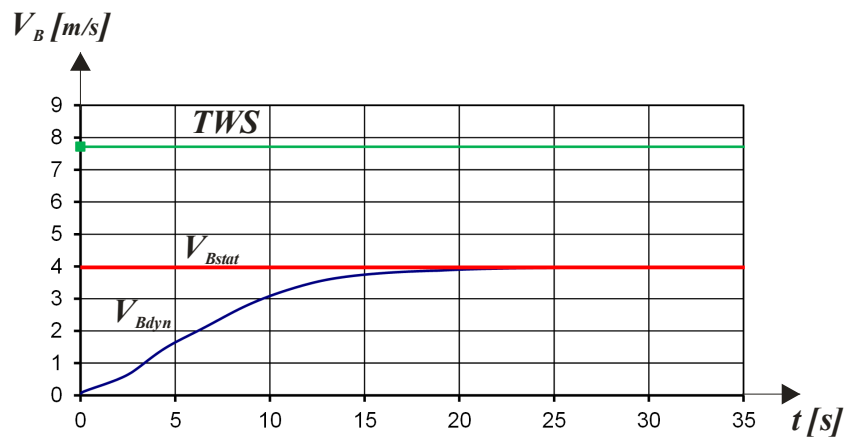
Једначина заношења

$$\ddot{\eta} = \frac{1}{(1+m_{\eta}) \cdot \Delta} \left[\begin{array}{l} \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \cdot \\ \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \\ - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \sin \varepsilon - F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \cos \varphi \cos \varepsilon - n_{\eta} \dot{\eta} |\dot{\eta}| \end{array} \right]$$

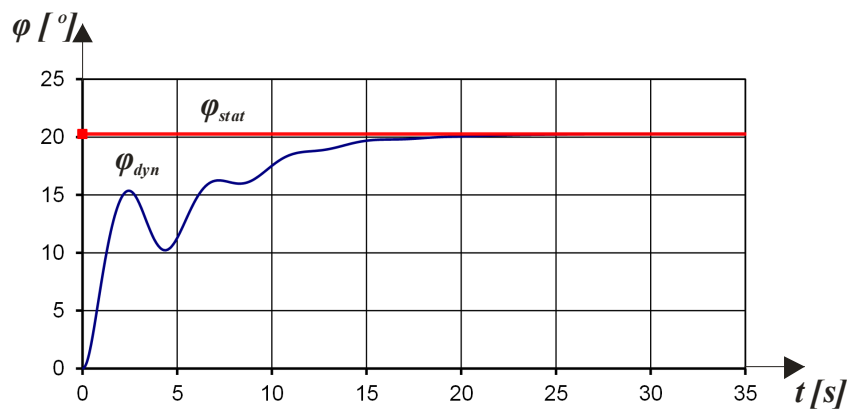
Једначина ваљања

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{(J_x + m_{\varphi})} \left[\begin{array}{l} \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \cdot \\ \left(\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\dot{\xi}^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\dot{\xi}} \right) \right) \cdot l_j \cos \varphi \\ + \left(R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \sin \varepsilon + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}) \cdot \cos \varphi \cos \varepsilon \right) \cdot l_h \cos \varphi \\ - n_{\varphi} \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| - g \Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi \end{array} \right]$$

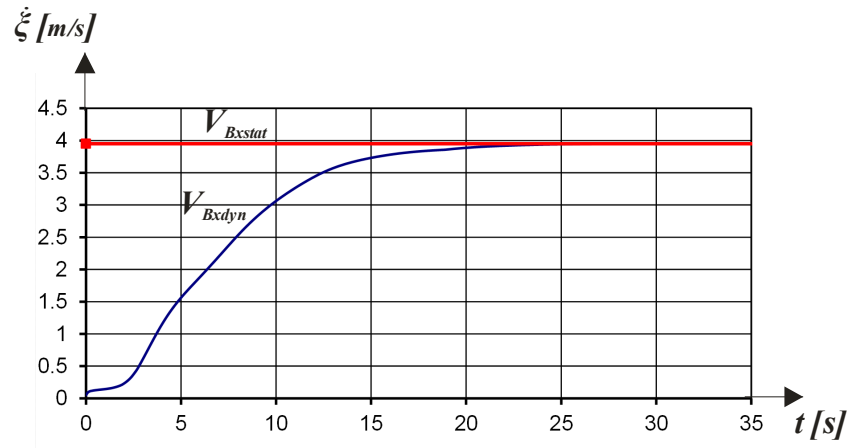
Развијен је оригинални компјутерски програм за нумеричко решавање система спрегнутих, нелинеарних диференцијалних једначина кретања једрилице, и помоћу њега одређује залетање, заношење и ваљање једрилице у функцији времена. Диференцијалне једначине се решавају нумерички, примењен је метод Рунге-Кута. Да би се проверила стабилност математичког модела и верификовали резултати програма, претпостављено је да једрилица у почетном тренутку мирује, без нагиба, и задата је константна брзина ветра. Приказана су решења за један случај (брзина ветра 15kn и правац од 70°) на сликама 4.1. до 4.5. и то за брзину једрилице, ваљање, залетање, заношење и угао заношења и упоређена су са решењима статичке равнотеже за исти случај.



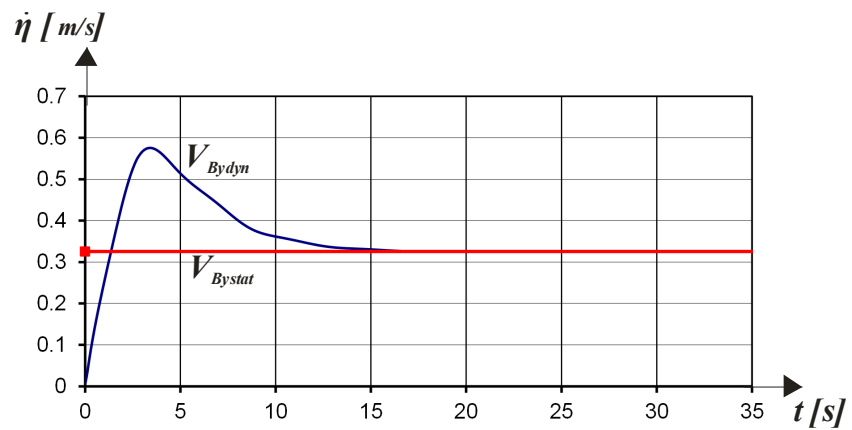
Слика 4.1. Брзина једрилице (TWS 15kn и TWA од 70°)



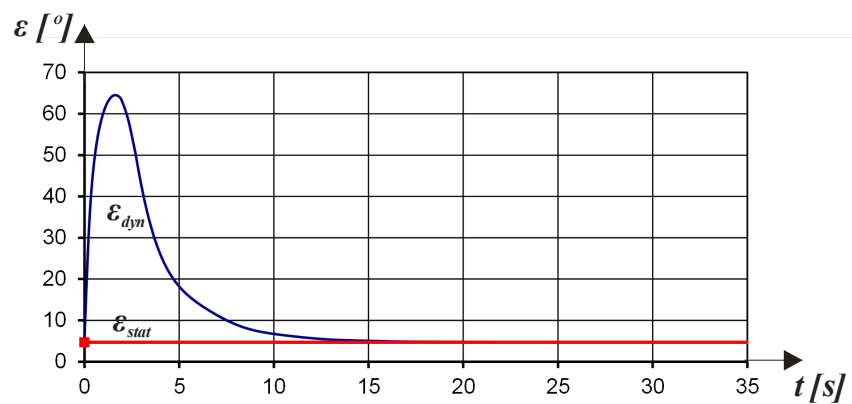
Слика 4.2. Ваљање једрилице (TWS 15kn и TWA од 70°)



Слика 4.3. Брзина залетања једрилице (TWS 15kn и TWA од 70°)



Слика 4.4. Брзина заносења једрилице (TWS 15kn и TWA од 70°)



Слика 4.5. Угао заносења једрилице (TWS 15kn и TWA од 70°)

Може се запазити, у складу са очекивањима, да решења нестационарног модела, за константан ветар теже решењима из статичке равнотеже. Тестирани су и другачији почетни услови и није запажена никаква нелогичност у резултатима.

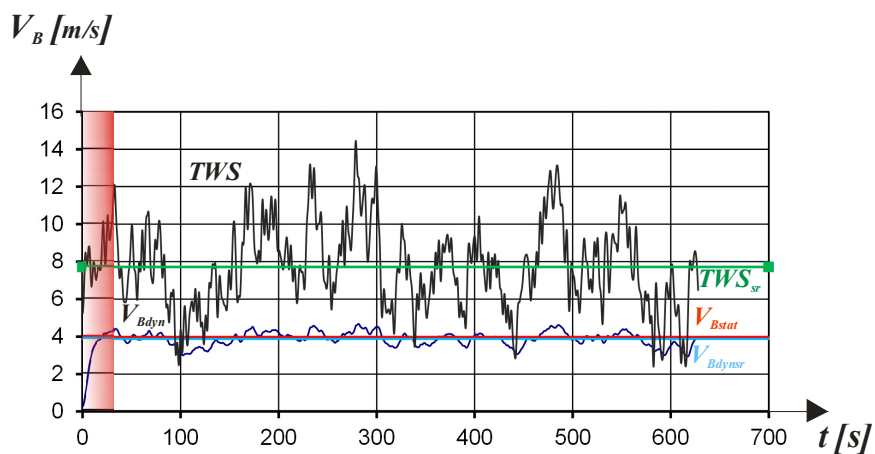
Сада се могу приказати и резултати нестационарног кретања под дејством променљивог ветра. Приказаћемо исти сет дијаграма (слике 4.6. до 4.10.), с тим што је сад ветар променљив, а положај једара се прилагођава тако да одговара тренутном оптимуму. Средња брзина и правац ветра су исти као и у претходном случају. Након претходних тестова, види се да се систем уравни после неких 28s, тј. изгуби се утицај почетних услова. Разматрни временски период кретања је 10мин, с тим да се додаје и почетни период, тако да укупни узорак траје 628s.

Над добијеним резултатима кретања врши се стохастичка анализа, и тражи се средња брзина пловидбе једрилице, средњи угао ваљања, итд. Приказане средње вредности добијених резултата, могу се одредити на следећи начин:

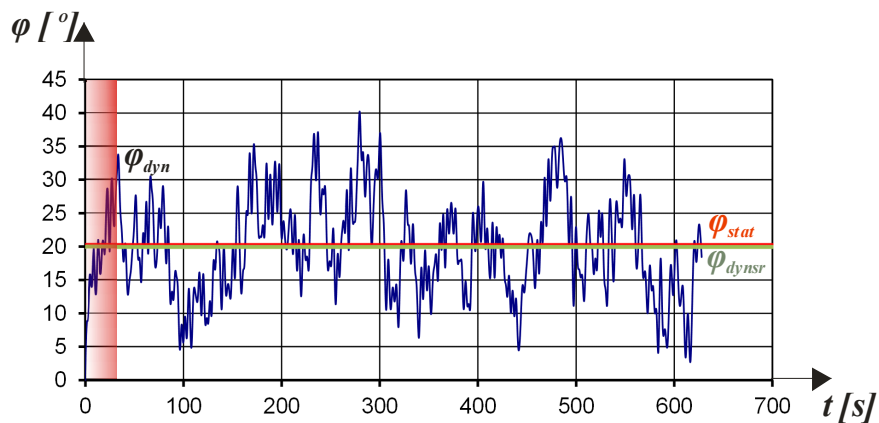
$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i(t_i) \quad (1.91)$$

Где је \bar{A} средња вредност променљиве, N број резултата, $A_i(t_i)$ вредност променљиве у тренутку t .

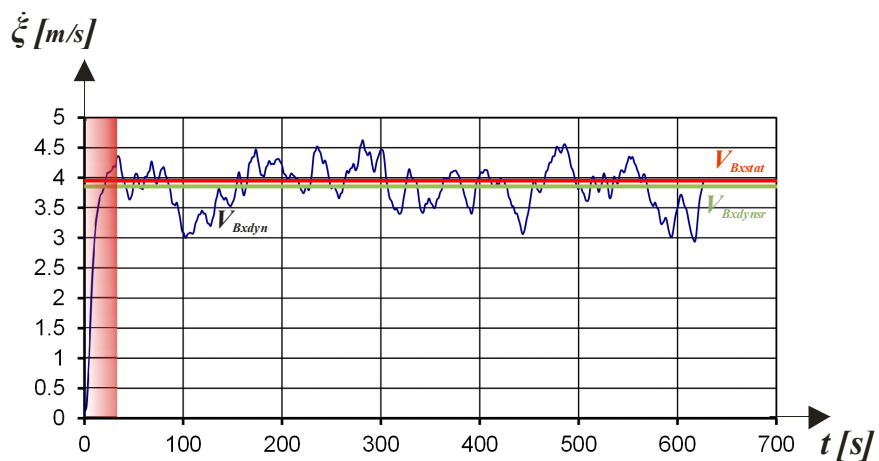
Првих 28s се одбацује, црвена зона на дијаграмима, а средња вредност се одређује на узорку од 600s.



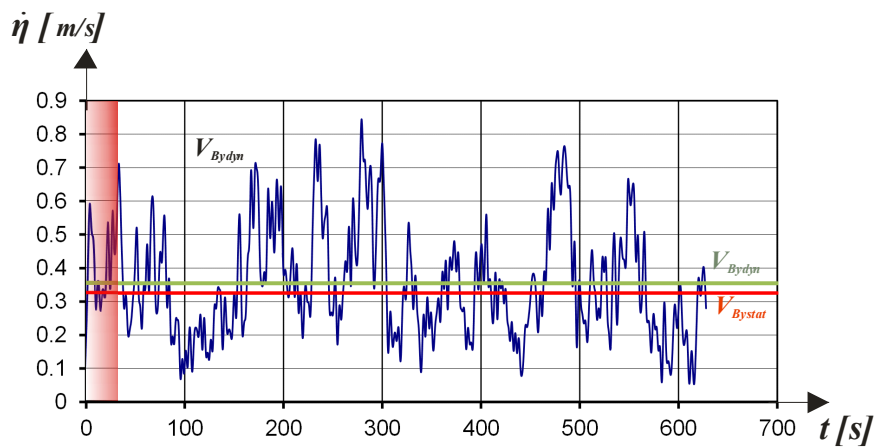
Слика 4.6. Брзина једрилице (TWS_{sr} 15kn и TWA од 70°)



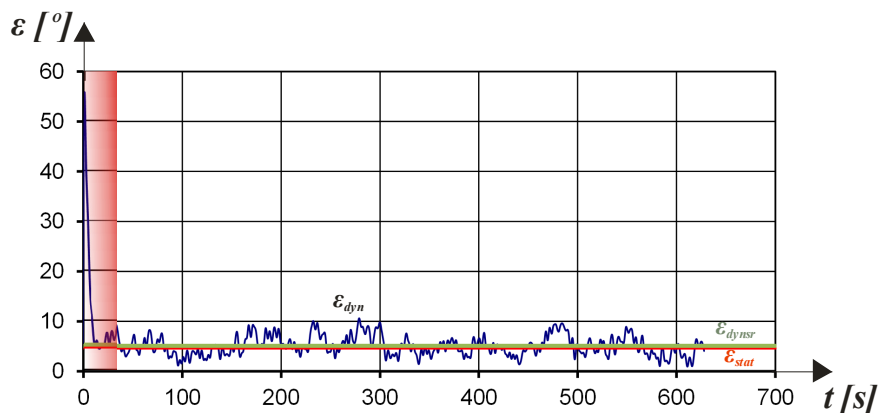
Слика 4.7. Ваљање једрилице (TWS_{sr} 15kn и TWA од 70°)



Слика 4.8. Брзина залетања једрилице (TWS_{sr} 15kn и TWA од 70°)



Слика 4.9. Брзина занешења једрилице (TWS_{sr} 15kn и TWA од 70°)

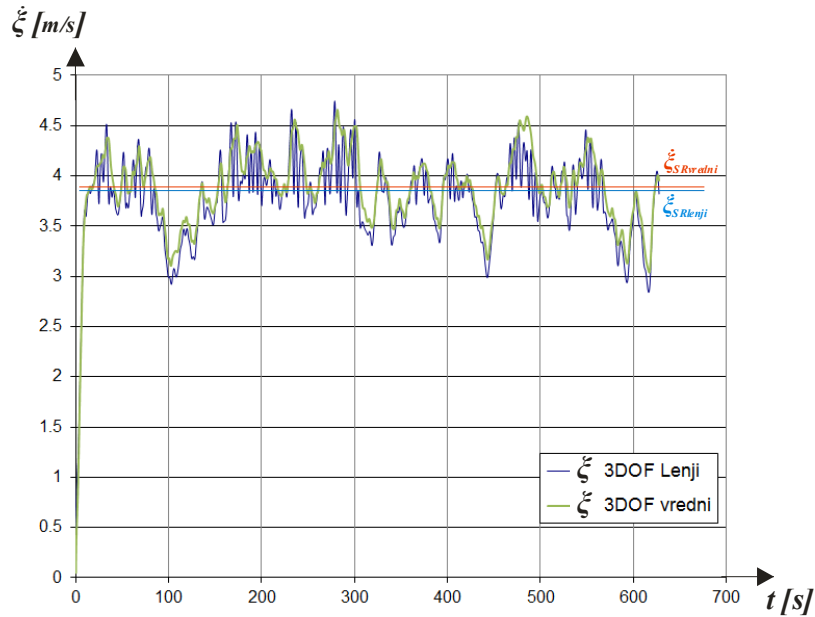


Слика 4.10. Угао заношења једрилице (TWS_{sr} 15kn и TWA од 70°)

Посматрајући дијаграме, могу се запазити врло занимљиве појаве. Средња брзина залетања је мања од добијене из статичке равнотеже, а док је средња брзина заношења већа од добије из статичке равнотеже. Укупна средња брзина кретања једрилице по вредности се не разликује много, али увек је нешто мања од оне из статичке равнотеже, али се једрилица више заноси.

Може се закључити да резултати добијени из статичке равнотеже прецењују брзину кретања, а подцењују заношење. Удари (флукуације) ветра неповољно се одражавају на кретање једрилице, смањују брзину залетања (напредовања) а повећавају брзину заношења и угао заношења.

Симулирана су два случаја када се једра поставе у фиксан (оптималан) положај у односу на стационарно кретање, што би могли назвати „лењи скипер“, и у случају да је положај једара променљив, и да одговара тренутном оптимуму, што би могли назвати „вредни скипер“. На слици 4.11. приказани су упоредни резултати брзине залетања за „лењог“ и „вредног“ скипера. Може се приметити да континуалније кретање има вредни скипер, мање су заступљени падови брзине, вредни скипер стално прилагођава положај једара како би имао што оптималнији угао наструјавања. Код лењог скипера имамо падове брзине, уопште неодговара на промене ветра, једноставно је погледао препоруке из статичке равнотеже и тако подесио једра.



Слика 4.11. Поређење брзине залетања – лењи и вредни скипер

Реални скипер је између ове двојице, прилагођава се ветру, али не сваког тренутка. Тако да је за очекивати да се током реалног једрења не могу остварити предвиђене перформанце кретања добијене из статичке равнотеже, али су добре као еталон чему треба тежити.

Симулирана су кретања једрилице за различите правце променљиве брзине ветра и закључци не одступају од изнетих. Увек ће се добити мања брзина кретања, приближнија ће бити ако је скипер вредан и стално подешава једра, једрилица ће се више заносити него код статичког решења.

5

НЕСТАЦИОНАРНО КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА У ВОДЕНОЈ СТРУЈИ

Кретање једрилице у воденој струји још више компликује проблем кретања, јер на једрилицу делује и променљив ветар. Брзине водене струје могу бити значајне, понекад на рекама самоходни бродови не могу пловити узводно. Сада треба замислити једрилицу, која погон добија од ветра, како једри под утицајем водене струје. Ово је проблем у коме се и објекат (једрилица) и флуиди (ваздух и вода) крећу. Једрилица при том врши релативно кретање. О овоме је било више речи у поглављу 2.

Из коначних једначина кретања једрилице (1.89), датих у поглављу 2, могу се извести и једначине нестационарног кретања једрилице под дејством променљивог ветра у воденој струји. И овде ће се разматрати проблем са само 3 степена слободе кретања залетање, заношење и ваљење. Утицај закретања оставља се за будућа истраживања. Тако да једначине гласе:

Једначина залетања

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{(1+m_{\xi}) \cdot \Delta} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \cdot \\ & \left(\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \\ & - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \cos(\varepsilon - d_{Bkv}) \\ & + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \sin(\varepsilon - d_{Bkv}) \end{aligned} \right]$$

Једначина занешења

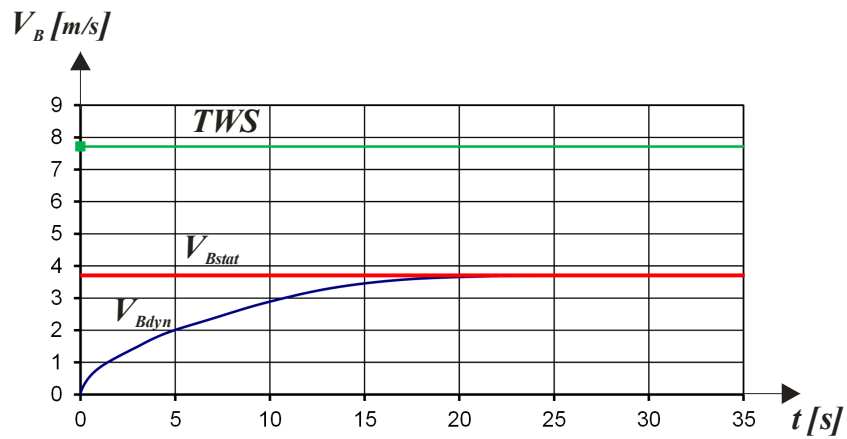
$$\ddot{\eta} = \frac{1}{(1+m_{\eta}) \cdot \Delta} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \cdot \\ & \left(\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \\ & - R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv}) \\ & - F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv}) - n_{\eta} \dot{\eta} |\dot{\eta}| \end{aligned} \right]$$

Једначина ваљања

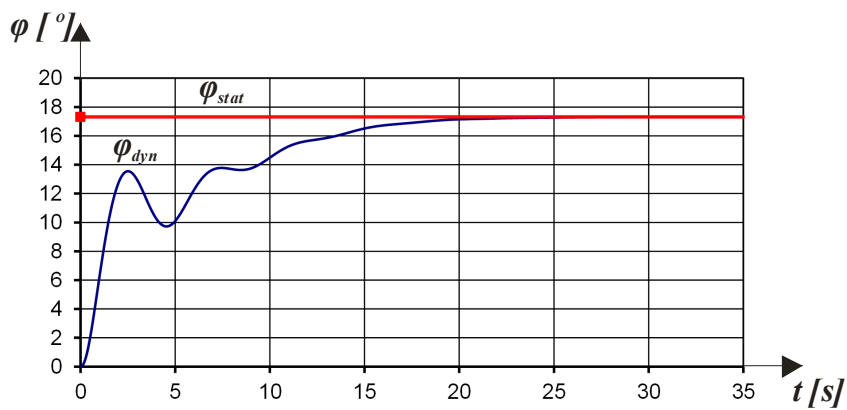
$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{(J_x + m_{\varphi})} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \rho_v C_v A \cos \varphi \sin \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) - \frac{1}{2} \rho_v C_w A \cos \varphi \cos \left(\varepsilon + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \cdot \\ & \left(\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2 + V_v^2 + 2 \cdot \sqrt{\xi^2 + (\dot{\eta} + l_j \dot{\varphi})^2} \cdot V_v \cos \left(\delta + \frac{l_j \dot{\varphi}}{\xi} \right) \right) \cdot l_j \cos \varphi \\ & + \left(R(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \sin(\varepsilon - d_{Bkv}) \right. \\ & \quad \left. + F_h(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \varphi, \dot{\varphi}, V_r, d_r) \cdot \cos \varphi \cos(\varepsilon - d_{Bkv}) \right) \cdot l_h \cos \varphi \\ & - n_{\varphi} \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| - g \Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi \end{aligned} \right]$$

Развијен је оригинални компјутерски програм за нумеричко решавање система спрегнутих, нелинеарних диференцијалних једначина кретања једрилице, на основу кога је одређено залетање, ваљање и занешење једрилице у функцији времена. Диференцијалне једначине се решавају нумерички, примењен је метод Рунге-Кута. Да би се проверила стабилност математичког модела и верификовали резултати програма, претпостављено је да једрилица у почетном тренутку мирује и задата је константна брзина ветра. Приказана су решења за један случај (брзина ветра 15kn и правац од 70°, брзина водене струје 2 kn и правац од 80°) на сликама

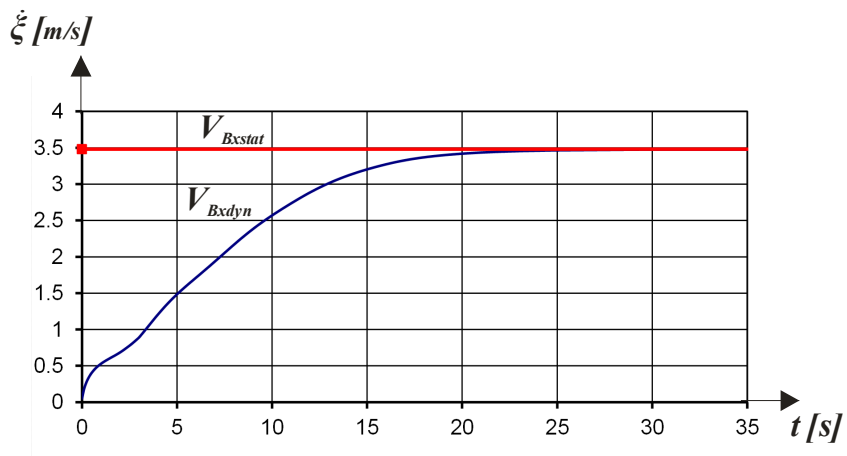
5.1. до 5.5. и то за брзину једрилице, ваљање, залетање, заношење и угао заношења и упоређена су са решењима статичке равнотеже за исти случај.



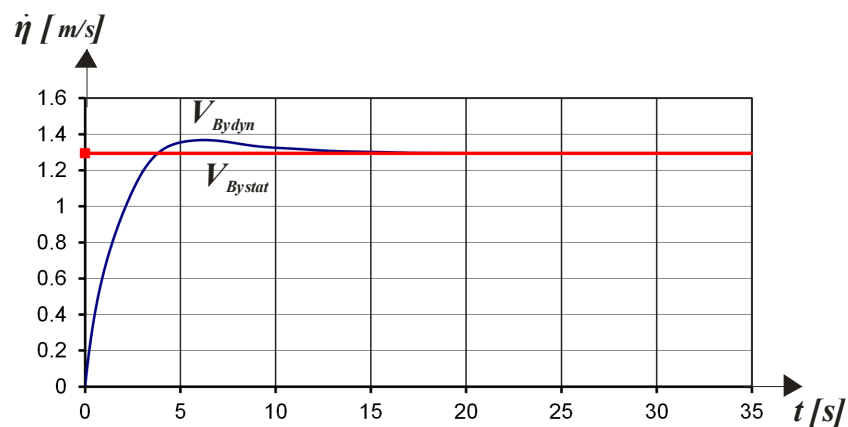
Слика 5.1. Брзина једрилице ($TWS=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



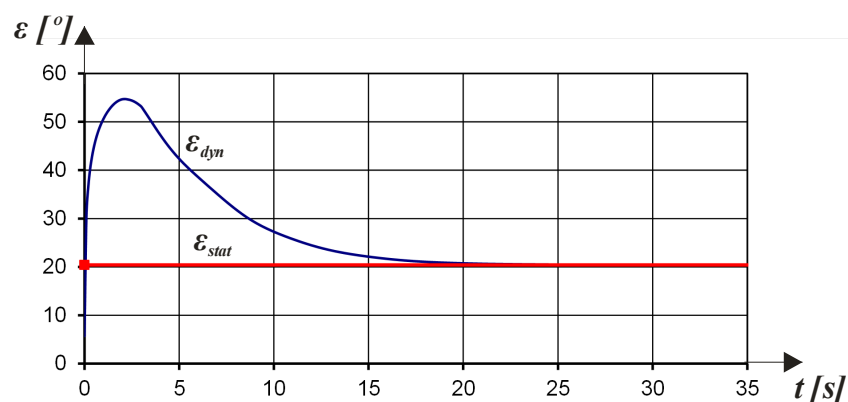
Слика 5.2. Ваљање једрилице ($TWS=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



Слика 5.3. Брзина залетања једрилице ($TWS=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



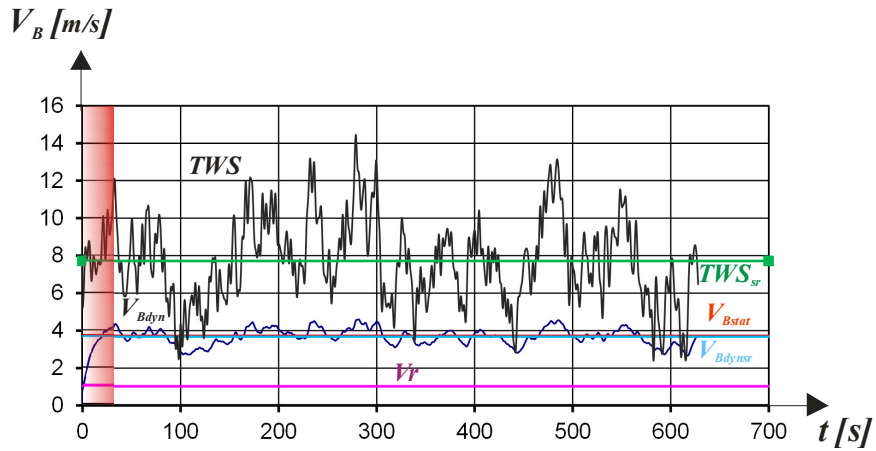
Слика 5.4. Брзина заношења једрилице ($TWS=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



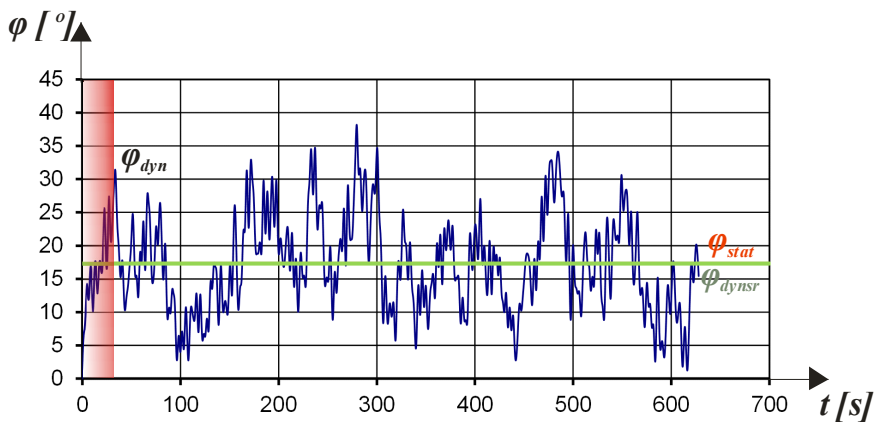
Слика 5.5. Угао заношења једрилице ($TWS=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)

Као и у претходном случају, може се запазити да решења нестационарног модела, за константан ветар теже решењима из статичке равнотеже. Такође, можемо видети и да доста брзо тежи решењу. Тестирани су разичити почетни услови и није запажена никаква нелогичност у резултатима.

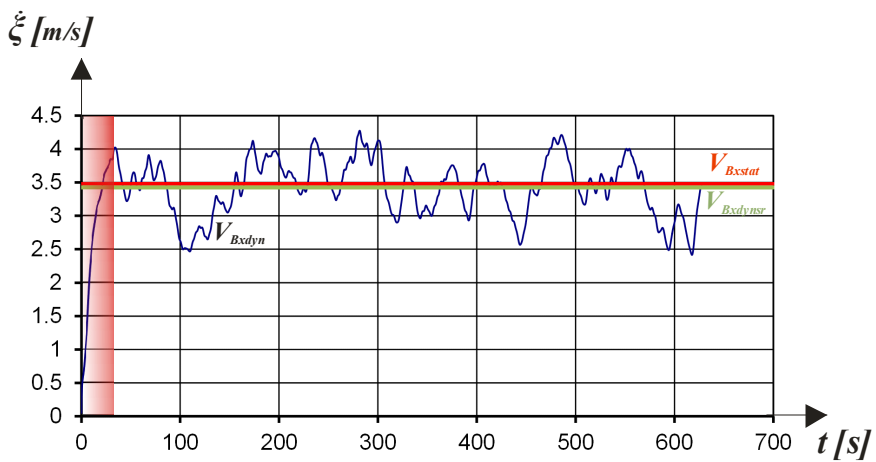
Сада се могу приказати и резултати нестационарног кретања под дејством променљивог ветра. Приказаћемо исти сет дијаграма (слике 5.6. до 5.10.), с тим што је сад ветар променљив, а положај једара се прилагођава тако да одговара тренутном оптимуму. Средња брзина и правац ветра су исти као и у претходном случају, с тим да је сад додаток и брзина и правац водене струје.



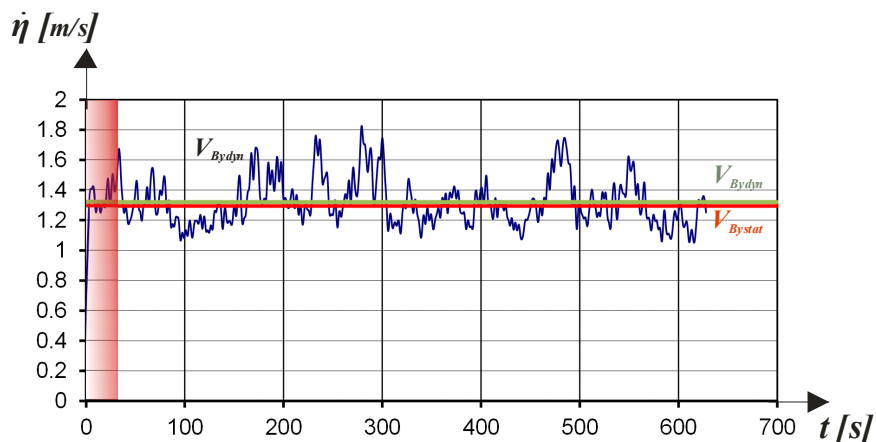
Слика 5.6. Брзина једрилице ($TWS_{sr}=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



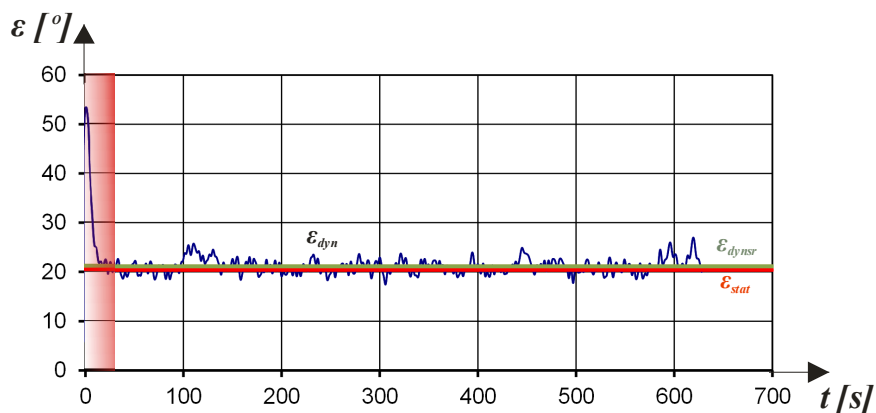
Слика 5.7. Ваљање једрилице ($TWS_{sr}=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



Слика 5.8. Брзина залетања једрилице ($TWS_{sr}=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



Слика 5.9. Брзина заношења једрилице ($TWS_{sr}=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)



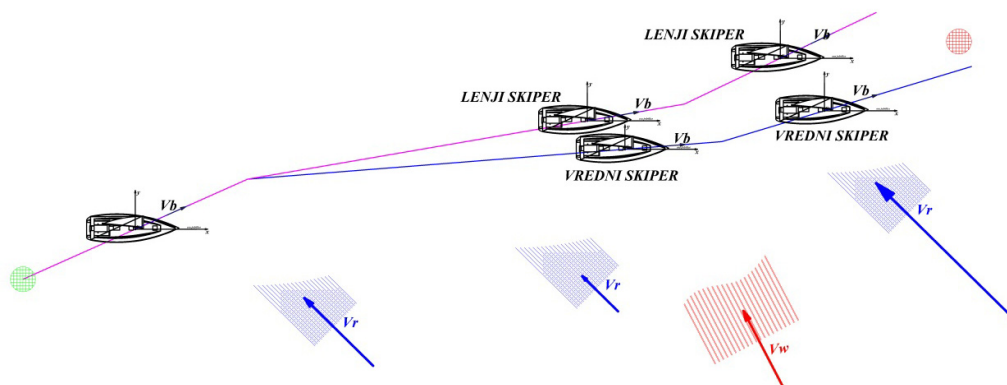
Слика 5.10. Угао заношења једрилице ($TWS_{sr}=15\text{kn}$ и $TWA=70^\circ$, $V_r=2\text{ kn}$ и $d_r=80^\circ$)

И у случају кретања у воденој струји, могу се извести исти закључци као и код кретања на мирној води. На дијаграмима се могу запазити врло занимљиве појаве. Средња брзина залетања је мања од добијене из статичке равнотеже, а док је средња брзина заношења већа од добије из статичке равнотеже. Укупна средња брзина кретања једрилице по вредности се не разликује много, али увек је нешто мања од оне из статичке равнотеже, али се једрилица више заноси.

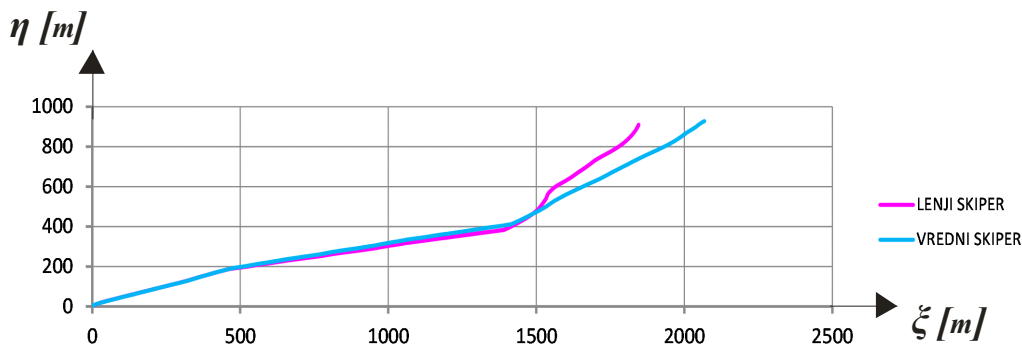
Генерално, може се закључити да резултати добијени из статичке равнотеже прецењују брзину кретања, а подцењују заношење. Удари (флукуације) ветра неповољно се одражавају на кретање једрилице, смањују брзину залетања (напредовања) а повећавају брзину заношења и угао заношења.

Размотрићемо и овде утицај скипера на кретање, с тим да ће се сад прилагођавати и промени водене струје, а не само промени ветра. Симулација пловидбе једрилице на регатном пољу, на коме долази до промене интензитета

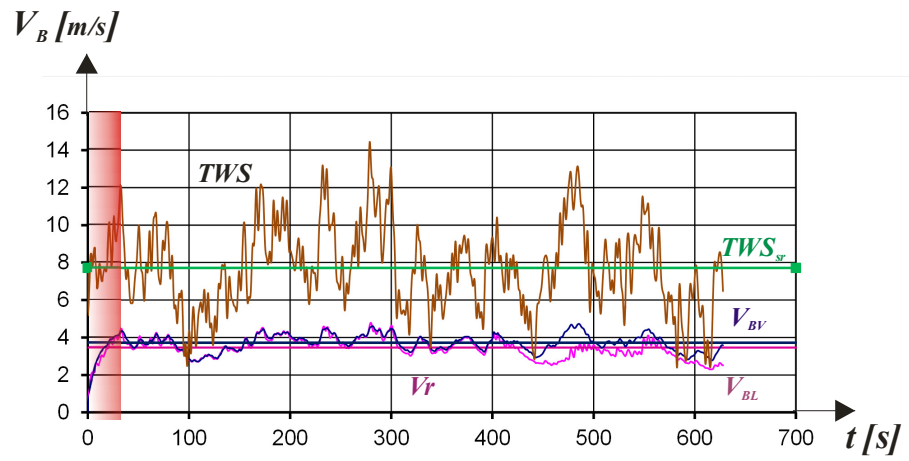
водене струје, и то када кормилар коригује своје кретање у складу с препорукама програма, и када занемари промене интензитета водене струје, приказано је на слици 5.11. Током почетка регате оба скипера су пловидбу подесила према препорукама статичке равнотеже са утицајем водене струје. Након неког времена (150s) интензитет брзине водене струје опадне на половину почетке вредности, вредни скипер се прилагоди новим условима пловидбе, тражећи стално оптимални положај једара, док лењи не реагује. У 400s регате интензитет водене струје се помени, сада порасте на дуплу вредност почетне, и опет вредни коригује своје кретање, а лењи опет не реагује. Дато је регатно поље са уцртаним трајекторијама пловидбе у оба случаја, види се да вредни скипер за исто време пређе већи пут, самим тим стиже први на циљ, док лењи има проблем да стигне до циља пошто је изгубио путању. Ову појаву могуће је кориговати кормилом, тако да је неопходно у даљим истраживањима решити и једначину закретања. На слици 5.12. је дате су трајекторије за поменуто кретање које су решење програма, а на слици 5.13. дато је поређење брзине једрилице за ова два случаја. Оваквом анализом показује се да утицај водене струје на перформансе једрилице може бити веома значајан, и да може одлучити победника регате.



Слика 5.11. Регатно поље



Слика 5.12. Трајекторије кретања из програма



Слика 5.13. Брзине кретања вредног и лењог скипера

6

ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ И СМЕРНИЦЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

Истраживања приказана у овој докторској дисертацији проистекла су из вишегодишњих истраживања утицаја променљивог ветра на динамички стабилитет брода у олуји. Модели и поступци развијени у области стабилитета брода примењени су на кретање једрилице, код које ветар не представља само потенцијалну опасност, већ и основно погонско средство.

Иако основна идеја рада: анализирати утицај променљивог, ударног ветра на једрилицу која плови у воденој струји применом већ познатих, развијених метода, може деловати једноставно, истраживања су показала изузетну сложеност постављеног проблема. Разлога има више, а основни лежи у чињеници да постојећи модели прорачуна хидродинамичких и аеродинамичких сила које делују на једрилицу важе само за њено стационарно једрење. Такође, и у чињеници да су сва кретања једрилице спрегнута, и да је веома тешко упростити проблем смањењем броја степени слободе кретања, а при том не изгубити техничку реалност разматраног проблема.

После извесног лутања и низа покушаја, постављени проблем је ипак успешно решен. Основни резултати се могу сумирати у следеће.

- Изведене су оригиналне спрегнуте нелинеарне диференцијалне једначине пловидбе једрилице са четири степена слободе кретања под дејством променљивог ветра у воденој струји;
- Примењен је оригинални начин моделирања ветра, код кога се утицај флукуација ветра одређује преко спектра брзине ветра;

- Решен је проблем стационарног кретања једрилице у воденој струји, и добијена веома интересантна и сложена интеракција брзина водене струје, брзине ветра и брзине једрилице;

- Анализиран је проблем нестационарне пловидбе једрилице под дејством променљивог, хаотичног ветра, без утицаја водене струје. Развијен је оригинални компјутерски програм за нумеричко решавање система спрегнутих, нелинеарних диференцијалних једначина кретања једрилице, и одређивано залетање, ваљање и заношење једрилице у функцији времена.

- Анализиран је проблем нестационарне пловидбе једрилице под дејством променљивог, хаотичног ветра, са утицајем водене струје. Програму за решавање нелинеарних спрегнутих диференцијалних једначина кретања једрилице придодат је утицај водене струје, и решавано залетање, ваљање и заношење једрилице у функцији времена.

Резултати истраживања не представљају само научни допринос проблему динамичког једрења, већ имају и широку практичну примену. Компјутерски програм који је развијен у оквиру истраживања, а који симулира кретање једрилице у нестационарним условима пловидбе, могу се користити и за практичне прорачуне брзине једрилица, њихову оптимизацију и пројектовање. Развијене методе и поступци за одређивање кључних аеро-хидродинамичких величина везаних за нестационарну пловидбу једрилице са и без утицаја водене струје могу се користити не само за побољшање перформанси приликом пројектовања нових једрилица, већ и за анализу и побољшање постојећих једрилица, њихових делова (једра, изданака, итд.). Могу се користити током једрења, за правилно позиционирање једара, али и за анализу резултата реалних мерења током кретања једрилице.

Програм отвара и могућност предвиђања и анализе кретања једрилица на регатном пољу, при чему су погодни и за планирање тактике, као и припрему једриличарских тимова за такмичења.

Остварени резултати отварају и низ значајних и интересантних проблема за даља истраживања. Требало би развијеним програмима за динамичко једрење додати још један степен слободе кретања једрилице – закретање, и тиме резултате проширити и на анализу маневра једрилице. Треба додатно радити и на моделирању утицаја кормила, и покушати да се бољим маневрисањем побољшају перформансе једрилице (видети [56]). На овај начин, могло би се предвидети и планирати понашање једрилица у регатном пољу са јаком воденом струјом. Било би корисно прорачуне допунити низом различитих типова и величина једрилица, и тиме битно проширити анализу утицаја променљивог ветра. Могуће је придодати и утицај плитке воде, који може бити значајан при једрењу на рекама и приобалним морским рутама. Свакако би требало укључити и утицај таласа на

кретање једрилице. Треба, такође, унапредити поступак одређивања аеродинамичких и хидродинамичких коефицијената. На крају, било би изузетно корисно спровести мерења перформанси једрилица при реалном нестационарном једрењу, и на тај начин изврши додатну верификацију и (евентуалну) калибрацију програма који су развијени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Newman, N.J., “Marine Hydrodynamics”, MIT Press, Cambridge, MA, 1977.
- [2] Bertram, V., “Practical Ship Hydrodynamics”, Butterworth Heinemann, Oxford, GB, 2002
- [3] Lewis, E. V. (Editor), “Principles of Naval Architecture”, Second Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [4] Journée, J.M.J., “Theoretical Manual of SEAWAY”, Delft University of Technology, 2001, <http://www.shipmotions.nl/DUT/PapersReports/1216-TheoreticalManualSEAWAY.pdf>
- [5] Matusiak, J., “Dynamics of a Rigid Ship”, Aalto University, Helsinki, Finland 2013
- [6] Hofman, M., “Ponašanje broda na talasima”, Mašinski fakultet u Beogradu, knjiga u pripremi
- [7] Salvesen, N., Tuck, E.O., Faltinsen, O., “Ship Motions and Sea Loads”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 78, 1970.
- [8] Marchaj, C.A., “Aero-Hydrodynamics of Sailing”, Frome, U.K.: Butler & Tanner, 1990.
- [9] Marchaj, C. A., “Sail Performance Theory and Practice”, London, Adlard Cole Nautical, 1996
- [10] Larsson, L., Eliasson, R., “Principles of yacht design”, Blacklick, The McGraw-Hill Companies, 2000
- [11] Fabio Fossati, “Aero-hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts: The Science Behind Sailing Yachts and Their Design”, Adlard Cole Nautical, 2009
- [12] <http://www.americascup.com/en/home.html>
- [13] Keuning, J.A., Sonnenberg, U.B., “Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the Delft Systematic Yacht Hull Series”, International HISWA Symposium on Yacht Design and Construction Amsterdam, November 1998
- [14] Keuning, J., Vermeulen, K., de Ridder, E., “A mathematical model for the tacking maneuver of a sailing yacht,” in Proc. International HISWA Symposium on Yacht Design and Construction Amsterdam, 2004., pp. 1–33.
- [15] Keuning, J., Vermeulen, K., de Ridder, E., “A generic mathematical model for the maneuvering and tacking of a sailing yacht,” in Proc.17th Chesapeake Sailing Yacht Symp., Mar. 2005, pp. 143–163.

- [16] Keuning, J., Vermeulen, K., "On the yaw balance of large sailing yachts," presented at the 17th Int. HISWA Symp. Yacht Design Constr., Amsterdam, The Netherlands, Nov. 2002.
- [17] Keuning, J., Katgert, M., Vermeulen, K., "Keel-Rudder interaction on a sailing yachts", presented at the 19th Int. HISWA Symp. Yacht Design Constr., Amsterdam, The Netherlands, Nov. 2006.
- [18] Keuning, J.A. and Binkhorst, B.J., "Appendage resistance of a sailing yacht hull", Chesapeake Sailing Yacht Symposium, 1997
- [19] Flay R G. J., Andrews R. J., "A Wind Tunnel/Full Scale Comparison of the Wind Flow over Auckland City", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55 (1995) 151-161, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- [20] Flay, R.G.J., "A twisted flow wind tunnel for testing yacht sails", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996. Vol 63: p. pp 171-182.
- [21] Le Pelley, D. J., Ekblom, P. & Flay, R. G. J. "Wind Tunnel Testing of Downwind Sails", High Performance Yacht Design Conference, Auckland, NZ, 2002.
- [22] Le Pelley, D. J., Hansen, H., "An investigation into the effects of heel on downwind sails", ***, Auckland, NZ,
- [23] N. Davies, "A real-time yacht simulator," M.S. thesis, Dept. Eng. Sci., Univ. Auckland, Auckland, New Zealand, 1990.
- [24] Hansen, H., Jackson, P., Hochkirch, K., "Comparison of wind tunnel and full-scale aerodynamic sail force measurements", High Performance Yacht Design Conference, Auckland, 4-6 December, 2002
- [25] Hansen, H., Jackson, P. S. & Hochkirch, K. "Realtime velocity prediction program for wind tunnel testing of sailing yachts", The Modern Yacht Conference, RINA, Southampton, 2003.
- [26] Hochkirch, K., Hansen, H., "Coupling of Aero- and Hydrodynamic Simulation for Racing Yacht Performance Optimization", NAFEMS Seminar, Wiesbaden, Germany, 2006
- [27] Viola, I.M., "Downwind sail aerodynamics: A CFD investigation with high grid resolution", Ocean Engineering (2009), doi:10.1016/j.oceaneng.2009.05.011
- [28] Masuyama, Y., Nakamura, I., Tatano, H., and Takagi, K., 'Dynamic performance of a sailing cruiser by full scale sea tests', Proc. of The 11th CSYS, pp. 161-179, 1993.
- [29] Masuyama, Y., Fukasawa, T., Sasagawa, H., "Tacking simulation of sailing yachts - Numerical integration of equations of motion and application of neural

- network technique,” in Proc. 12th Chesapeake Sailing Yacht Symp., 1995, pp. 117–131.
- [30] Masuyama, Y., Fukasawa, T., “Full Scale Measurement of Sail Force and the Validation of Numerical Calculation Method”, The 13th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 1997., Annapolis: SNAME.
- [31] Davidson K. S. M., “Some Experimental Studies of the Sailing Yacht”, Transaction of SNAME, Vol. 44, 1936
- [32] Philpott, A., Sullivan, R., Jackson, P., “Yacht velocity prediction using mathematical programming,” Eur. J. Oper. Res., vol. 67, pp.13–24, 1993.
- [33] Jackson, P.S., “An Improved Upwind Sail Model for VPPs”, in The 15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2001. Annapolis: SNAME.
- [34] Claughton, A., “Developments in the IMS VPP Formulations”, 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium Annapolis January 1999
- [35] Claughton, A., Oliver, C., “Design considerations for canting keels”, *PROCEEDINGS*, The International HISWA Symposium on Yacht Desing and Yacht Construction, 2004
- [36] Fossati F., Martina F., Muggiasca S., “Experimental Database of Sail Performance and Flying Shapes in Upwind Conditions”, Int. Conference on Innovations in High Performance Sailing Yachts, Lorient 2008
- [37] Fossati F., Muggiasca S., Viola I., “An Investigation of Aerodynamic Force Modelling for IMS Rule Using Wind Tunnel Techniques”, 19th HISWA Symposium, Amsterdam, 2006
- [38] Fossati F., Muggiasca S., “Sails' Aerodynamic Behavior in Dynamic Conditions”, SNAME 19th CSYS, Annapolis, 2009
- [39] Fossati F et al., “Wind Tunnel and CFD Investigation on Unconventional Rigs”, 3rd High Performance Yacht Design Conference, Auckland 2008
- [40] Fossati F., Muggiasca S., “Influence of Heel on Yacht Sailing Performance”, 6th Int. Conf. on High-Performance Marine Vehicles, HIPER 08, Naples, 18-19 Sept, 2008
- [41] Augier, B., Bot, P., Hauville, F., Durand, M., “Experimental validation of unsteady models for Wind /Sails / Rigging Fluid structure interaction”. International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient, France, 2010.
- [42] Augier, B., Bot, P., Hauville, F., “Experimental full scale study on yacht sails and rig under unsteady sailing conditions and comparison to fluid structure

interaction unsteady models”. In: The 20th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 2011.

- [43] Augier, B., Bot, P., Hauville, F., Durand, M., “Experimental validation of unsteady models for fluid structure interaction: Application to yacht sails and rigs”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 101, pp 53-66, 2012.
- [44] Chapin, V., et all, “Sailing Yacht Rig Improvements trough Viscous Computational Fluid Dynamics”, The 17th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 2005
- [45] Jacquin, E., Roux, Y., Guillerme, P.E., Alessandrini, B., “Toward numerical VPP with the full coupling of hydrodynamic and aerodynamic solvers for ACC yacht”, The 17th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 2005
- [46] Roux, Y., et all, “Yacht performance prediction: Towards a numerical VPP”, High Performance Yacht Design Conference, Auckland 2002
- [47] Binns, J.R., “Hull-Appendage Interaction of a Heeled and Yawed Vessel”, Curtin University of Technology, Perth, Australia, xiv + 189 pages, 1996
- [48] Binns, J.R., Bethwaite, F.W., Saunders, N.R., “Development of a more realistic sailing simulator”, High Performance Yacht Design Conference, Auckland 2002
- [49] Binns, J.R., McRae, B., Thomas, G., “The Windward Performance of Yachts in Rough Water”, The 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 1999
- [50] Binns, J.R., Klaka, K., Dovell, A., “Hull-Appendage Interaction of a Sailing Yacht, Investigated with Wave-Cut Techniques”, ***
- [51] McRae, B., Binns, J.R., Klaka, K. and Dovell, A., “Windward Performance of the AMECRC Systematic Yacht Series”, International Conference on the Modern Yacht, 1998
- [52] Couser, P., Deane, N., “Use of CFD techniques in the preliminary design of upwind sails”, The 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 1999
- [53] Grant H. P., “On Test Measurements in Full Scale Sailing Test Programs”, The 13th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 1997
- [54] Howard P. Grant, Stephens O., “On Test Measurements in Full Scale Sailing Test Programs”, SNAME 13th CSYS, Annapolis, 1997

- [55] Tiano A., Zirilli A., Yang C. and Xiao C., A neural autopilot for sailing yachts, IEEE MEDCOM 2001 Mediterranean Conference. Dubrovnik, Croatia, 27-29 June, 2001
- [56] Xiao, L., Jouffroy, J., “Modeling and Nonlinear Heading Control of Sailing Yachts”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, accepted for publication
- [57] Matteo Scarponi, “Including human performance in the dynamic model of a sailing yacht: a combined ship science – behavioral science approach towards a winning yacht-sailor combination”, PhD Thesis, UNIVERSITA’ DEGLI STUDI DI PERUGIA, 2007
- [58] Parolini, N., Quarteroni, A., “Mathematical models and numerical simulations for the America’s Cup”, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 194 (2005) 1001–1026
- [59] Ernst, G., Birmingham, R., Mesbahi, E., “Application of Artificial Neural Networks in preliminary sailing yacht design”, *International Journal of Small Craft Technology* (The Transactions of RINA), Vol. 149, Part B1 2007, pp 33-38.
- [60] Maes, F. S., Downie, M. J., “An experimental study of the hydrodynamics of a yacht with a canting keel and forward rudder”, *International Journal of Small Craft Technology* (The Transactions of RINA), Vol. 149, Part B1 2007, pp 39-48.
- [61] Stelzer, R., Proll, T., “Autonomous sailboat navigation for short course racing”, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 56, pp. 604–614, 2008
- [62] Helvacioğlu, S., Insel, M., “Sailing yacht performance: The effects of heel angle and leeway angle on resistance and sideforce”, ***
- [63] Graf, K., Böhm, C., “A New Velocity Prediction Method for Post-Processing of Towing Tank Test Results”, 17th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, Maryland, March 2005
- [64] Graf, K., Pelz, M., Bertram, V., Soding, H., “Added Resistance in Seaways and its Impact on Yacht Performance”, The 18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA, 2007
- [65] Oossanen, P. van, “Predicting the Speed of Sailing Yacht”, *SNAME Transactions*, Vol. 101, 1993, pp. 337-397
- [66] Oossanen, P. van, “A concept exploration model for Sailing Yacht”, ***
- [67] ***, “ORC Speed Guide Explanation”, Offshore Racing Congress, 2009

- [68] Hofman, M., “Projekat jedrilice”, Diplomski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 1972
- [69] Orlov, M., “Postupak za određivanje brzine jedrilice”, Diplomski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2000
- [70] Šerbula, A., “Program za proračun brzine jedrilice”, Diplomski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2002
- [71] Milan Kalajdžić and Milan Hofman: “Prediction of Sailing Yacht Motion in Gusting Wind”, Report BR02/2010, Technology Development Project TR-14012,
- [72] Bačkalov I., Kalajdžić M., Hofman M., “On Safety of Inland Container Vessels Designed for Different Waterways”, *FME Transactions*, Vol 36, No.2, pp 51-57, 2008.
- [73] Bačkalov I., Kalajdžić M., Hofman M., “Inland Vessel Rolling due to Severe Beam Wind: a Step towards a Realistic Model”, *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 25, No. 1, January 2010, pp. 18-25.
- [74] Davenport, A. G., “The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”, 1961, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 87, 194.
- [75] Klaka, K., Krokstad, K., Renilson, M. R., “Prediction and measurement of the roll motion of a sailing yacht at zero forward speed”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 27, pp 611–617, 2003.
- [76] Graham, J.M.R., “The forces on sharp-edged cylinders in oscillatory flow at low Keulegan–Carpenter numbers”, *Journal of Fluid Mechanics* Vol 97, Part 2, 331–346, 1980.
- [77] ***, “Environmental conditions and environmental loads”, Recommended Practice DNV-RP-C205, April 2007
- [78] Resolution A.562(14) “Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over”, International Maritime Organization, 1985.
- [79] Resolution MSC.267(85) “Adoption of the International Code On Intact Stability, 2008 (2008 IS CODE)”, Maritime Safety Committee, 4 December 2008.
- [80] Мильковић, З., „Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама“, Машински факултет, Универзитет у Београду, 2003.
- [81] Rojas, R., „Neural Networks – A Systematic Introduction“, Springer-Verlag, Berlin, 1996.

- [82] Zurek, S., „aNETka V2.0 – Operation Manual“, Wolfson Centre for Magnetism School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, 2005.
- [83] Калајдић М., Хофман М, „Поступак за прорачун, анализу и оптимизацију снаге речних гурачких састава компјутерски програм Convoy®“, Извештај БР02/2009, Пројекат технолошког развоја ТР-14012
- [84] Radojčić, D., Zgradic, A., Kalajdžić, M., Simić, A., “Resistance Prediction for Hard Chine Hulls in the Pre-Planing Regime”, Polish Maritime Research, No 2 (82), Vol. 21, pp.9-26, 2014
- [85] ***, “SPAN”, Maxsurf, Formation Design System
- [86] Kozlov, V., “Wind and current”,
<http://vakfinn.narod.ru/MPS/EN/Articles/Wind-and-Current.html#.U9H2NfmSyzZ>
- [87] <http://www.hiswasymposium.com/>
- [88] <http://www.hpyd.org.nz/>
- [89] <http://www.sname.org/chesapeake sailingyachtsymposiumcsys/home/>
- [90] <http://www.innovsail.com/#page=page-4>

ПРИЛОГ 1.

ОПИС ЈЕДРИЛИЦЕ КОРИШЋЕНЕ ЗА ПРОРАЧУНЕ

Једрилица коришћења за прорачуне је једрилица YD-40 (Yacht Design 40 footer). Једрилица YD-40 је пројекат развијен у књизи „Principal of Yacht Design“ [10] и овде је коришћена као типични пример помоћу кога читалац треба боље да разуме приказану материју. За поменути једрилицу, која је замишљена као модерна крузер/тркачка једрилица, су у књизи дати сви потребни подаци и цртежи. План линија је дат на слици П1.1., Генерални план је дат на слици П1.2., а План једара на П1.3. Једрилица YD 40 одабрана је за еталон због чињенице да за њу постоји детаљан, јавно објављени пројекат, али и зато што је, по својој форми типичан представник Делфтске серије. Главне димензије једрилице су дате у табели ПТ1.1.

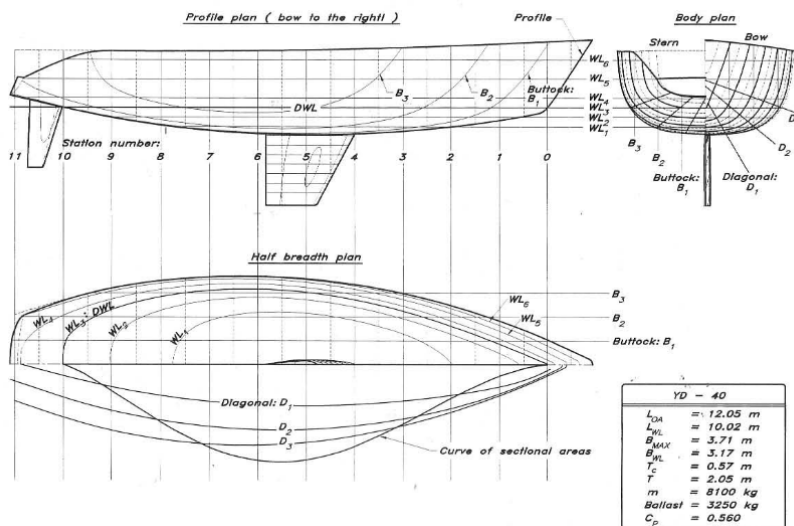
Табела ПТ1.1. Табела главних димензија једрилице YD-40

TRUP	
Lwl(m)	10.02
Bwl(m)	3.17
Tc(m)	0.57
T(m)	2.07
D(t)	8.12
H(m)	1.3
CW	0.712
CP	0.56
LCB(%)	-3.5
LCF(%)	6.62

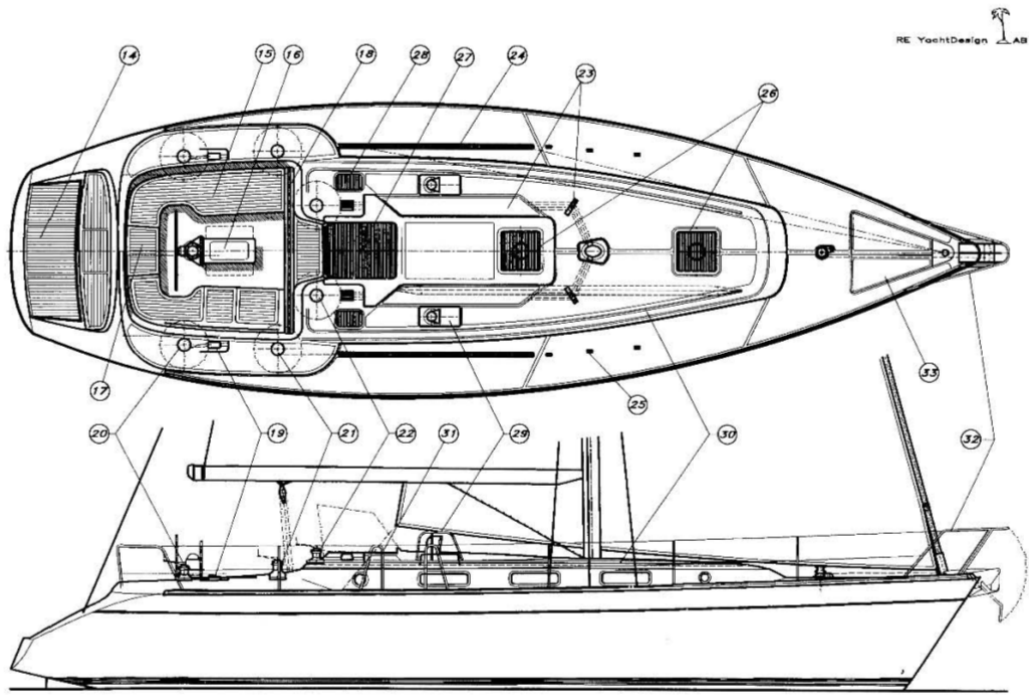
KOBILICA I KORMILO	
Lk(m)	1.5
tk(m)	0.3
Bal(t)	3.25
TRH	1.5
Zk	-0.6
Lr(m)	0.45
Tr(m)	1.47
tr(m)	0.1

GLAVNO JEDRO	
P(m)	15.1
E(m)	4.7
BAS(m)	1.2

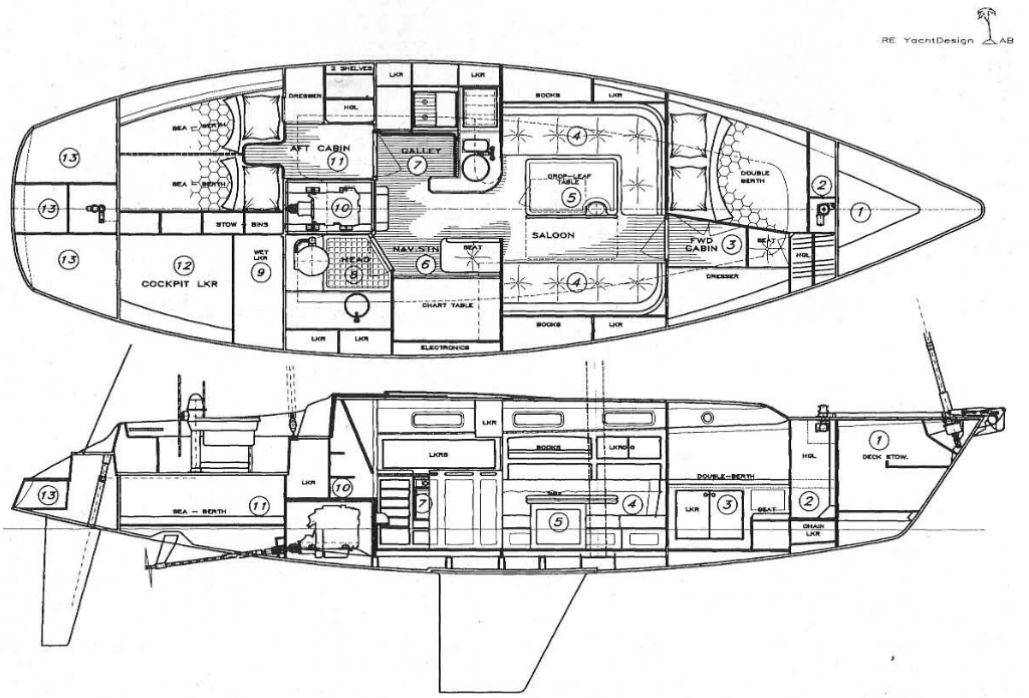
PREČKA	
M(m)	16.9
J(m)	4.3
LP(m)	6.45



Слика П1.1. План линија YD-40

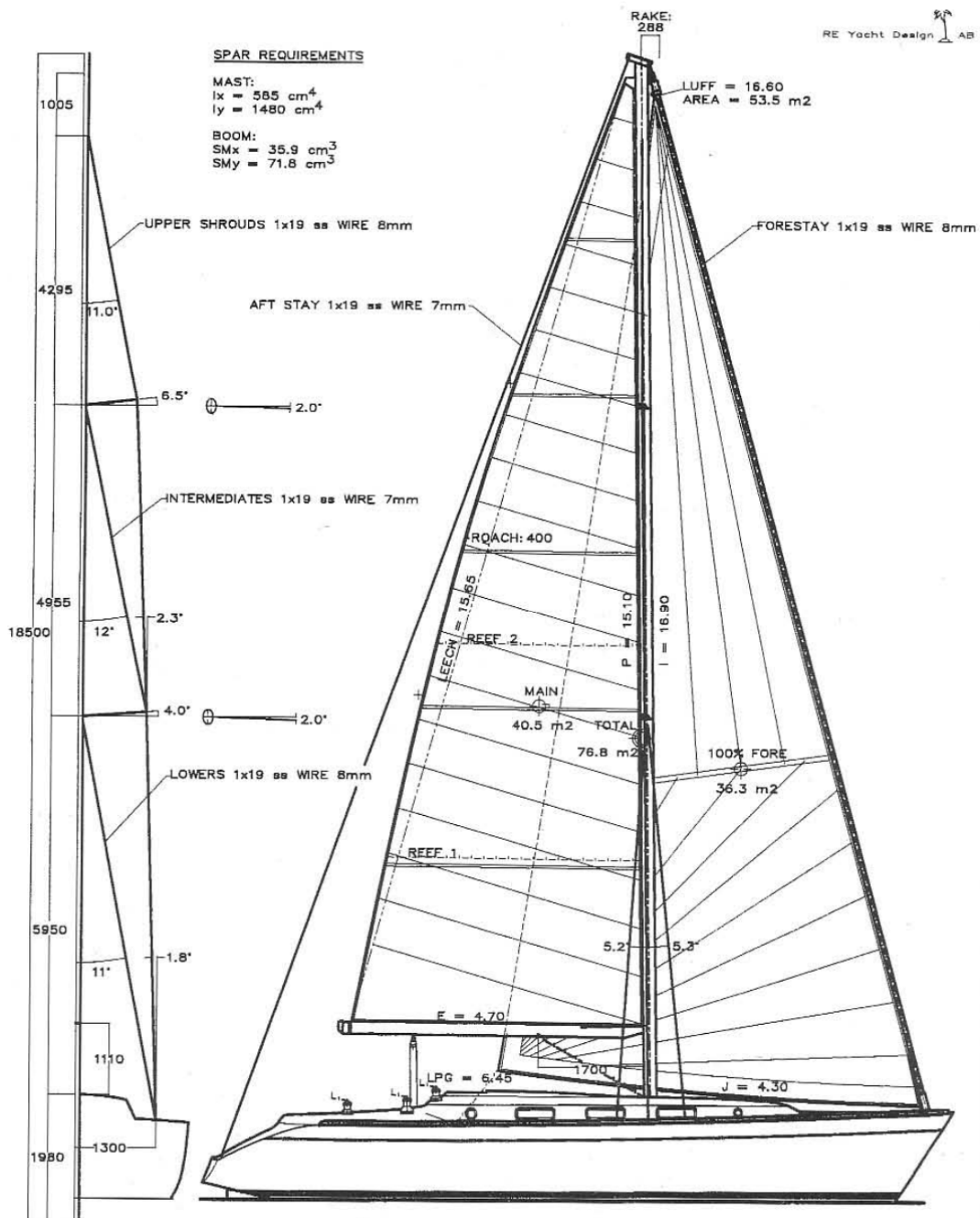


RE YachtDesign LAB



RE YachtDesign LAB

Слика П1.2. Генерални план YD-40



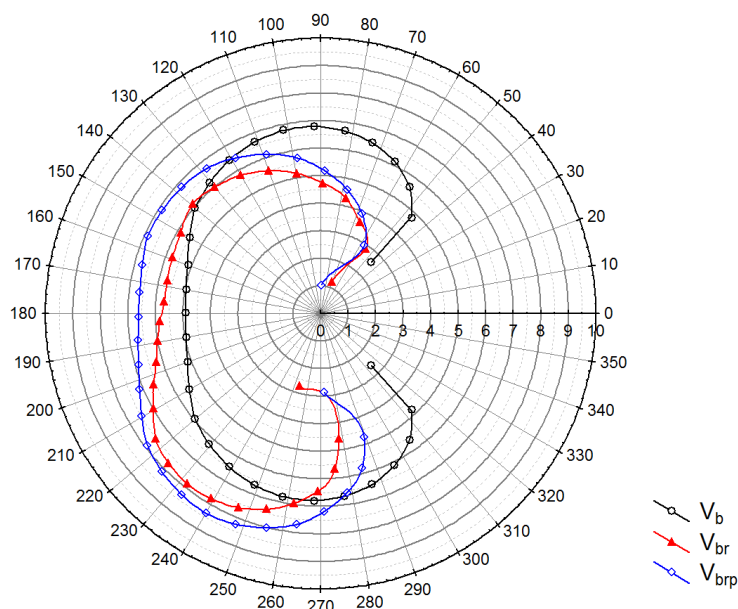
Слика III.3. План једара YD-40

ПРИЛОГ 2.
ДИЈАГРАМИ

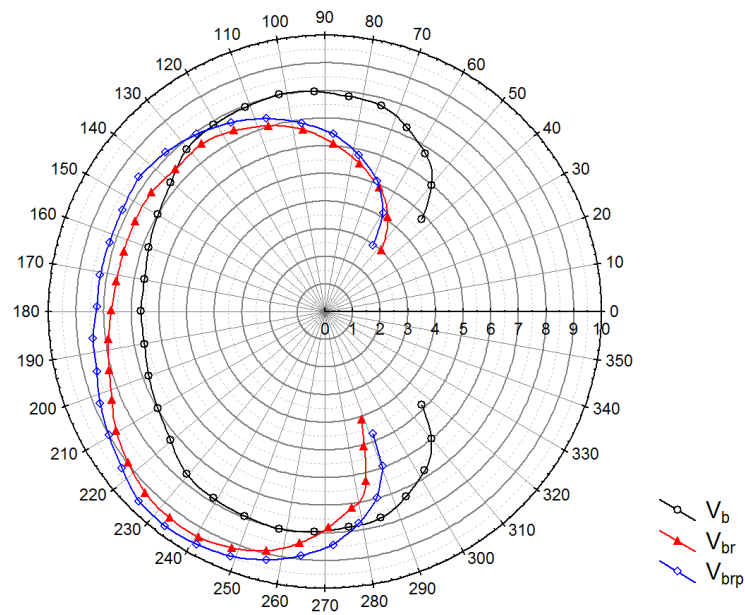
На наредним дијаграмима приказане су разлике у резултатима који се добијају на два начина рачунања утицаја водене струје, први начин је приближан и састоји се из векторског прерачунавања постојећих резултата, а други прорачунава утицај на све параметре кретања помоћу програма VPP-M. Код утицаја водене струје резултати се могу приказати на два начина, када је правац водене струје константан у односу на правац стварног ветра и када је константан у односу на осу једрилице. Резултати су овде приказани помоћу оба начина.

Сви приказани дијаграми су за једрилицу еталон, а варира се брзина стварног ветра, брзина водене струје и стални правац водене струје у односу на правац ветра и у односу на осу једрилице. Пошто се може генерисати велики број сличних дијаграма, одабрани су репрезентативни дијаграми за сваки утицај, који дочаравају разлике и утицаје улазних параметара.

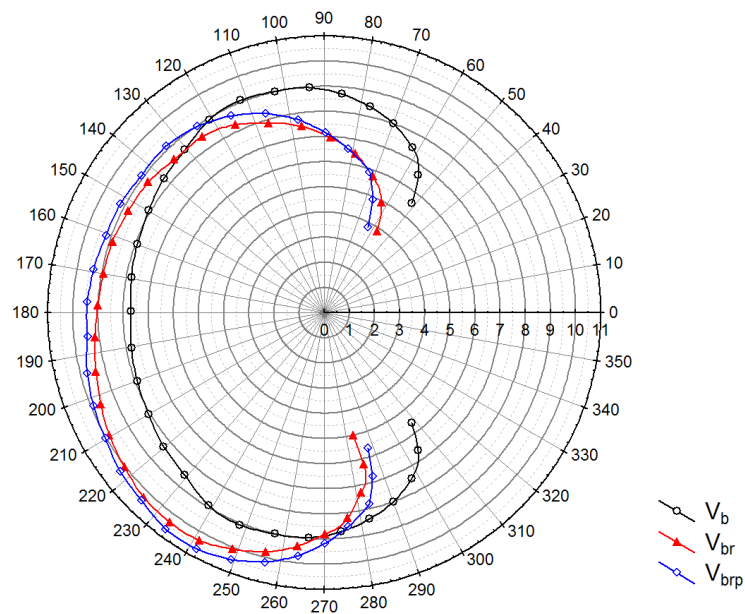
Варијација брзине стварног ветра



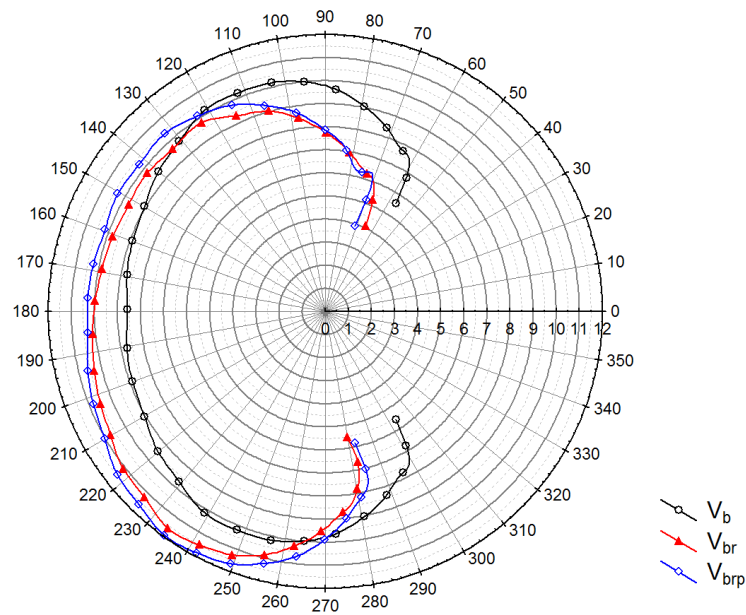
Слика П2.1. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се брзина стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 10$ kn



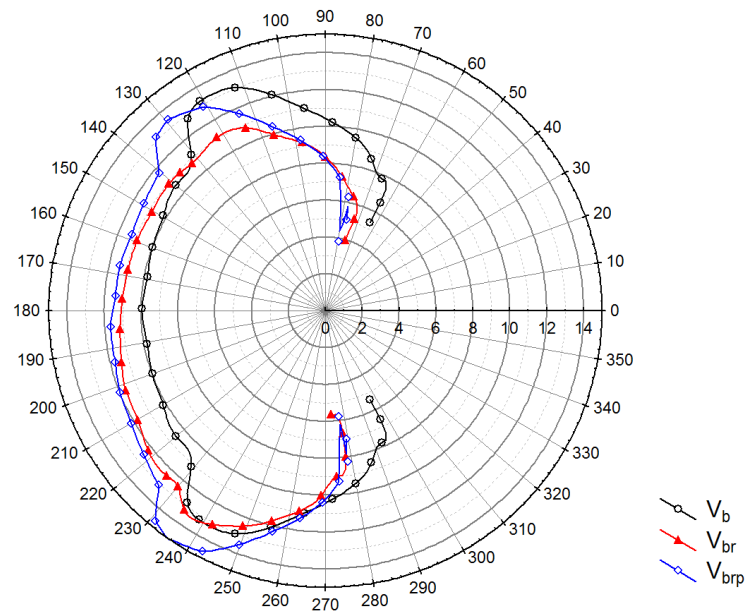
Слика П2.2. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се брзина стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 15$ kn



Слика П2.3. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се брзина стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 20$ kn

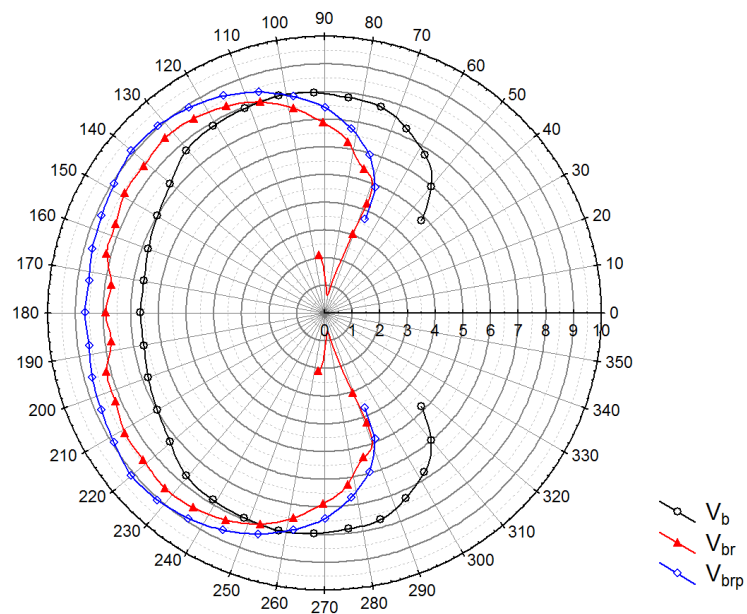


Слика П2.4. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се брзина стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 25$ kn

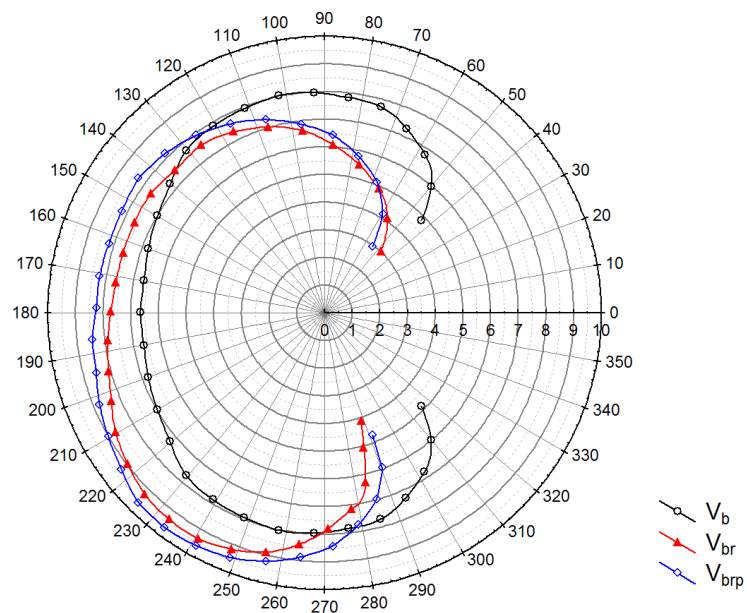


Слика П2.5. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се брзина стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 10$ kn

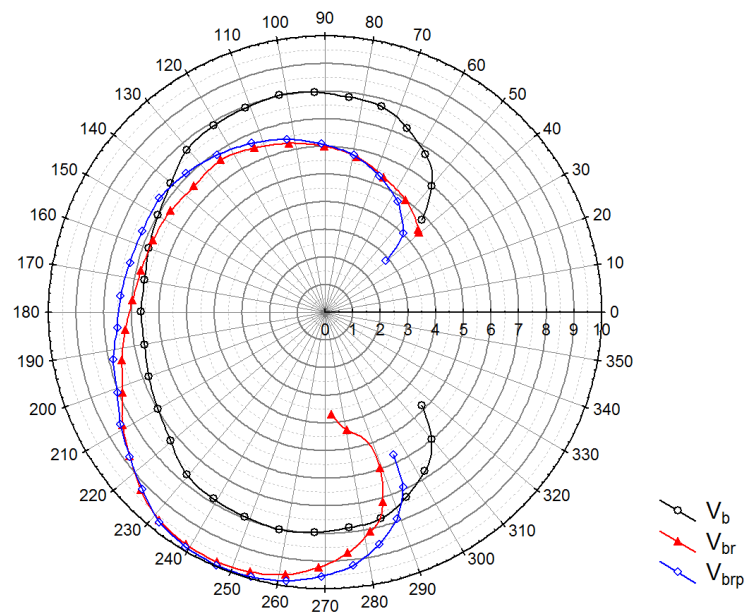
Варијација угла између правца водене струје и стварног ветра



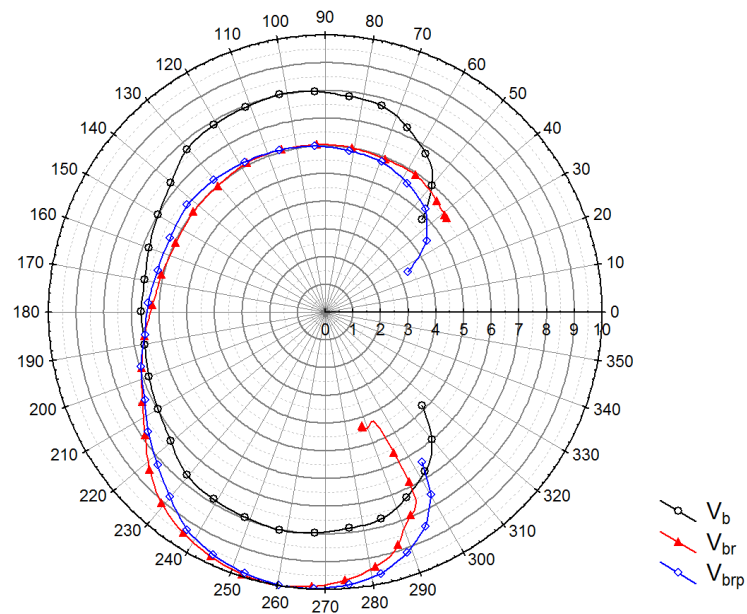
Слика П2.6. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 0^\circ$, $TWS = 15$ kn



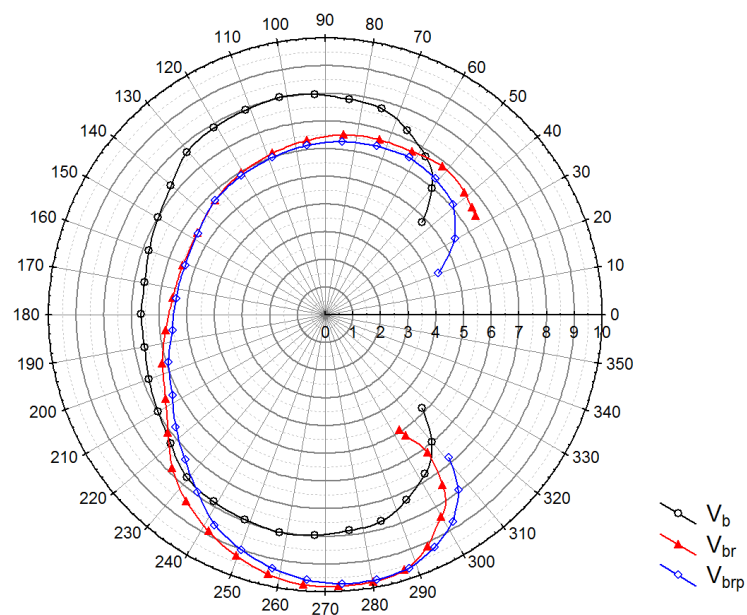
Слика П2.7. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 15$ kn



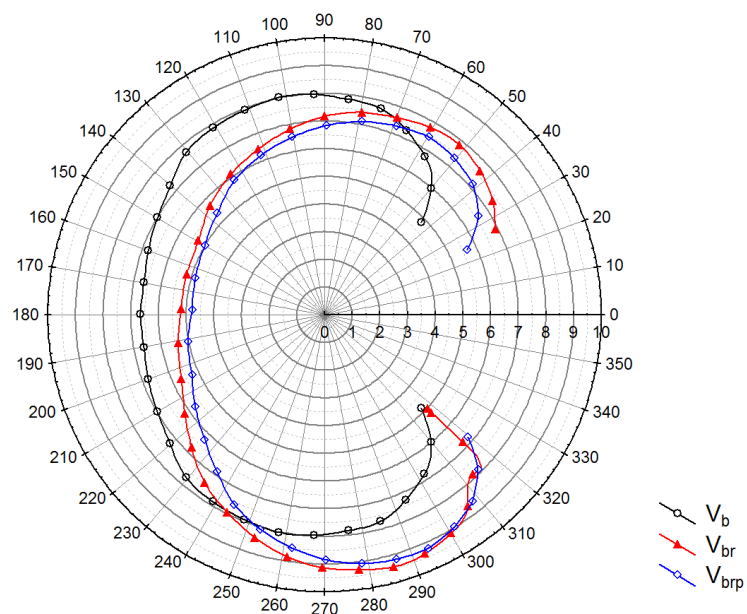
Слика П2.8. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn



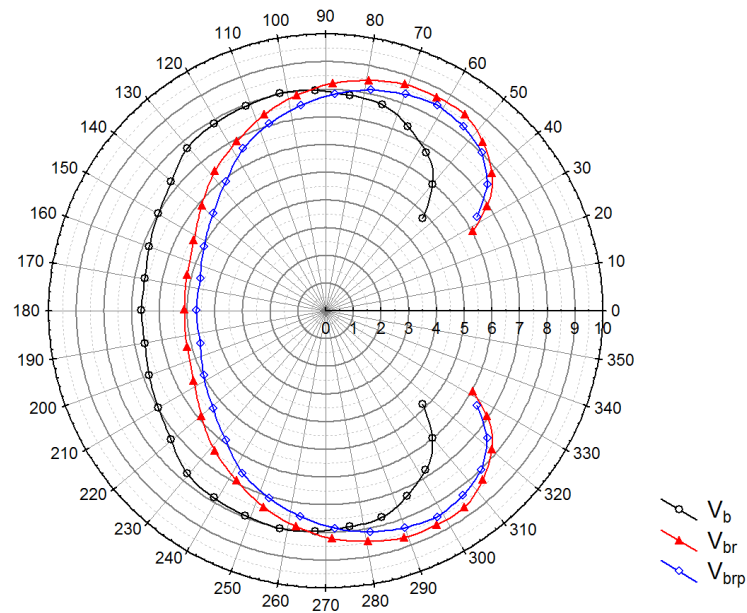
Слика П2.9. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 90^\circ$, $TWS = 15$ kn



Слика П2.10. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 120^\circ$, $TWS = 15$ kn

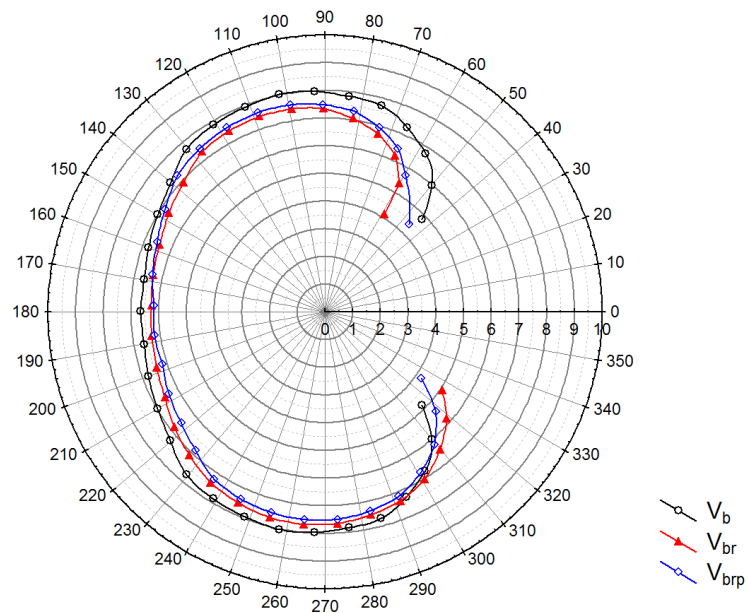


Слика П2.11. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 150^\circ$, $TWS = 15$ kn

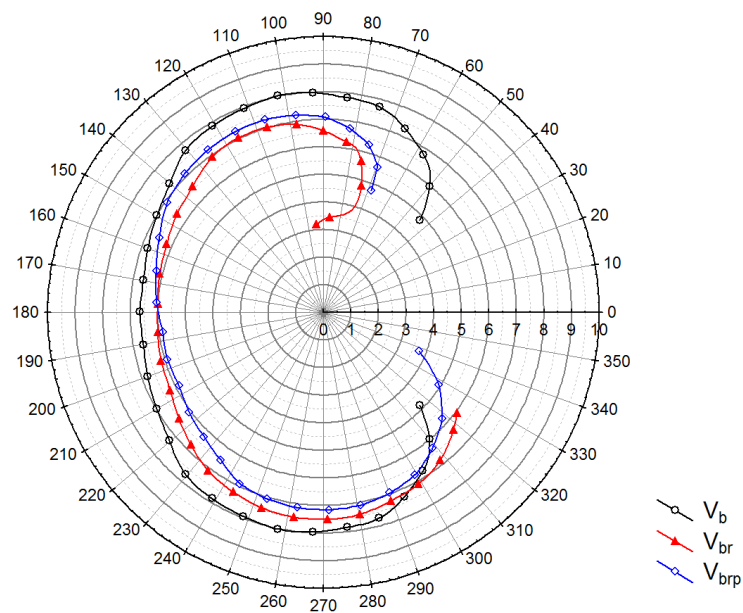


Слика П2.12. Водена струја фиксна у односу на правац стварног ветра, варира се угао између водене струје и стварног ветра – $V_r = 2$ kn, $d_r = 180^\circ$, $TWS = 15$ kn

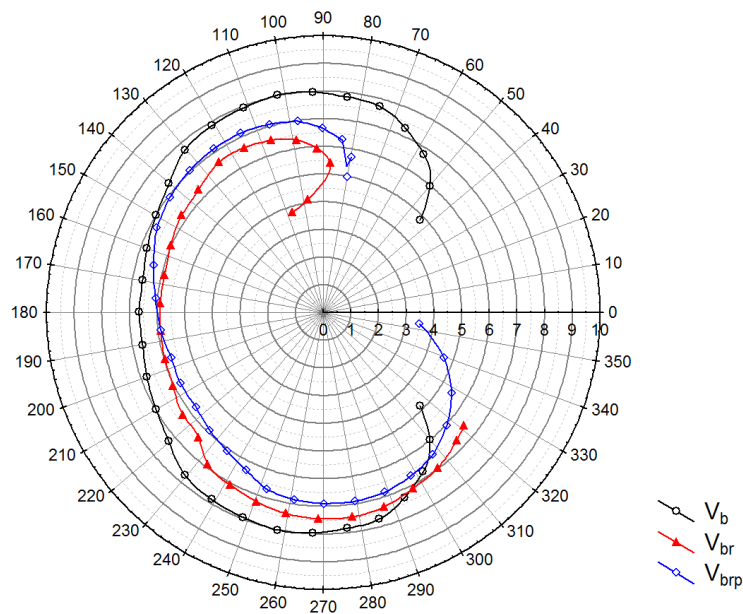
Варијација брзине водене струје



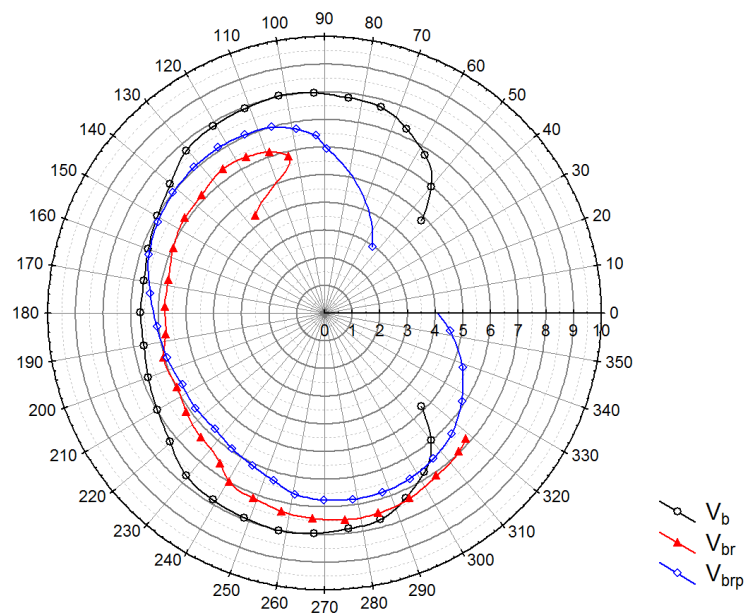
Слика П2.13. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се брзина водене струје – $V_r = 1$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn



Слика П2.14. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се брзина водене струје – $V_r = 2$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn

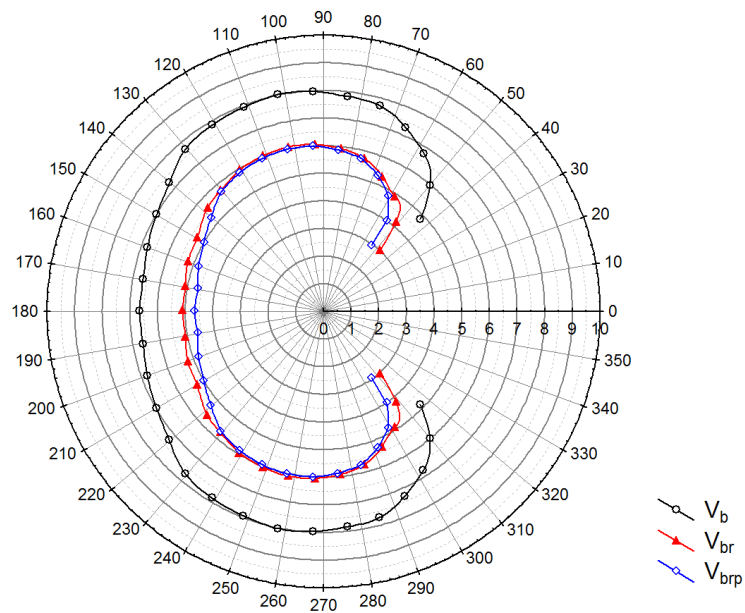


Слика П2.15. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се брзина водене струје – $V_r = 3$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn

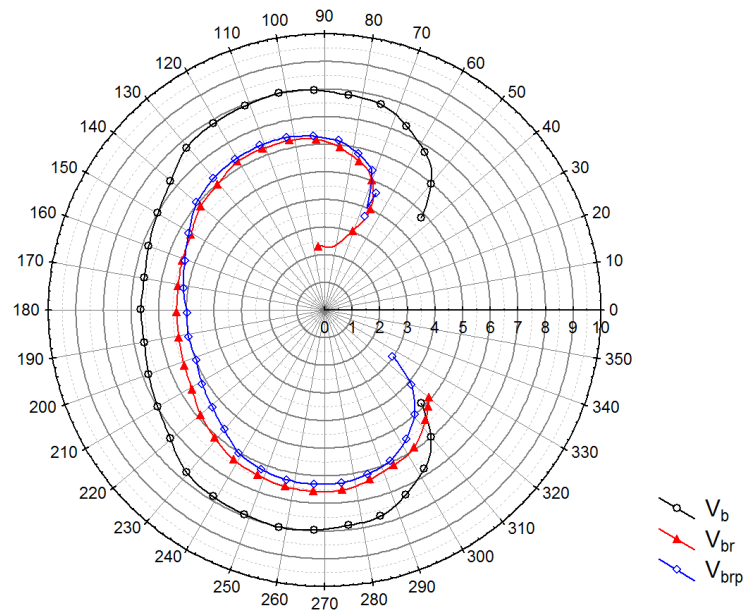


Слика П2.16. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се брзина водене струје – $V_r = 4$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn

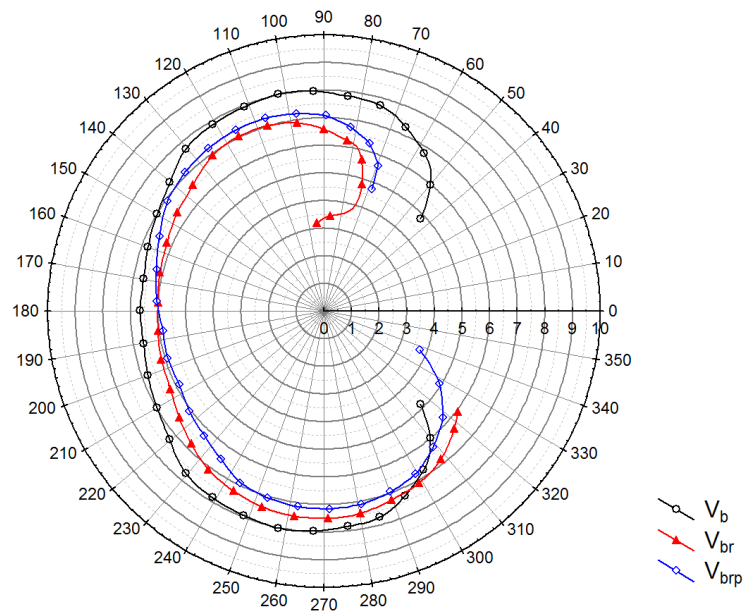
Варира се угао између водене струје и осе једрилице



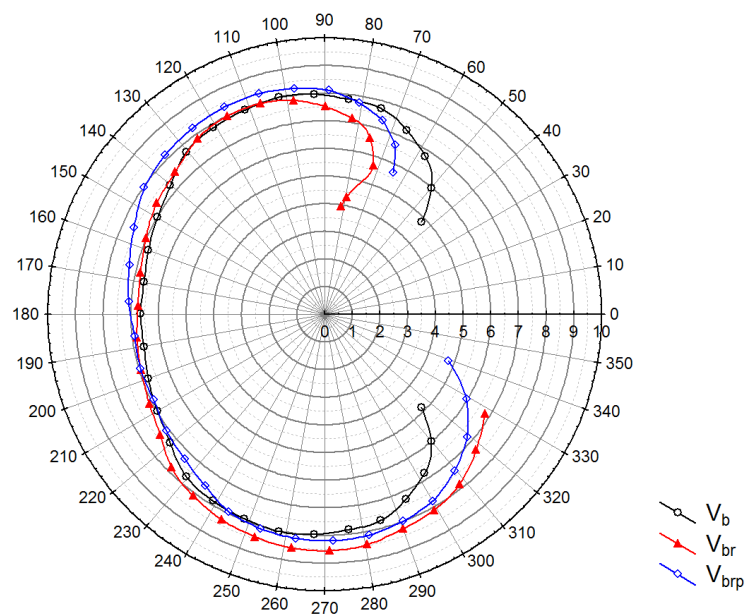
Слика П2.17. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2$ kn, $d_r = 0^\circ$, $TWS = 15$ kn



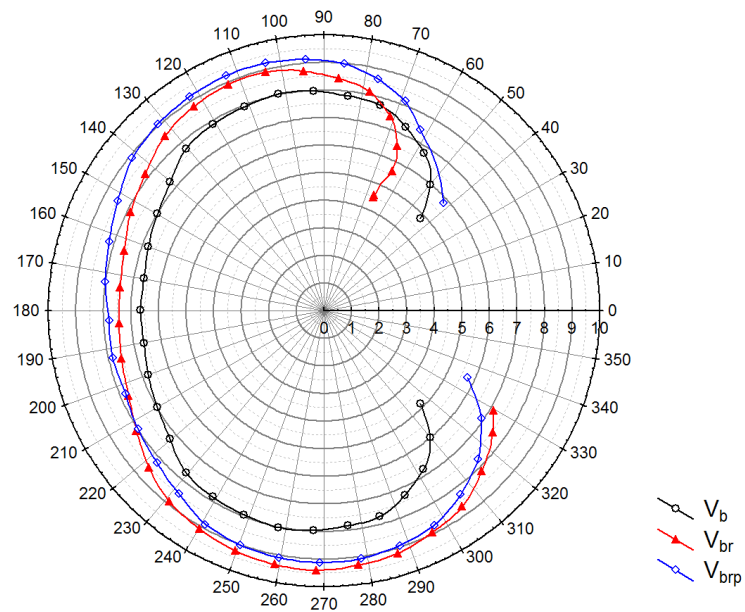
Слика П2.18. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2$ kn, $d_r = 30^\circ$, $TWS = 15$ kn



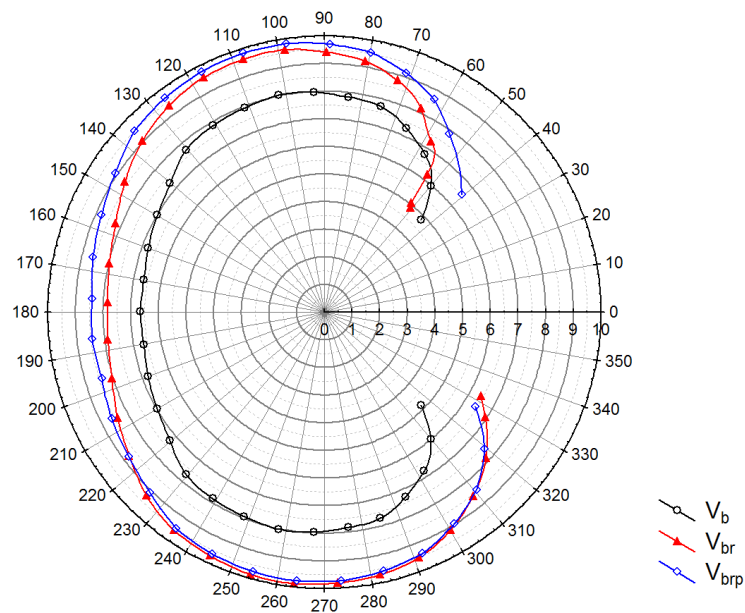
Слика П2.19. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2$ kn, $d_r = 60^\circ$, $TWS = 15$ kn



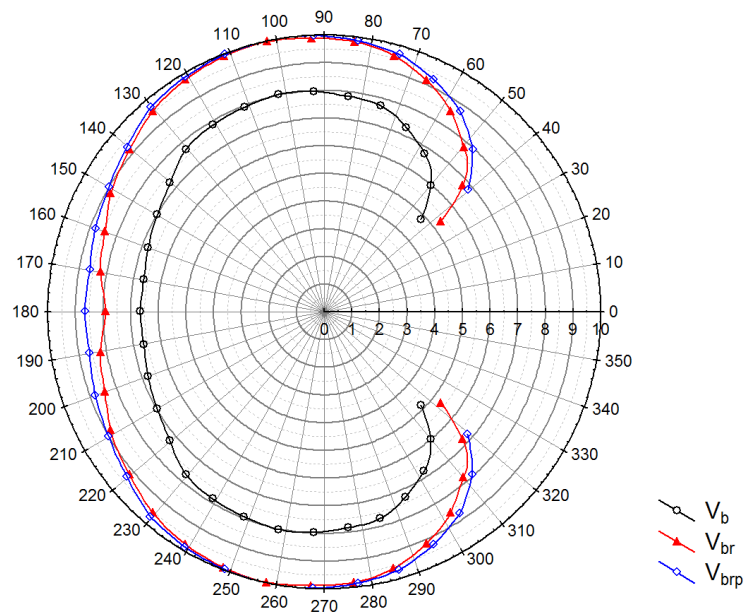
Слика П2.20. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2$ kn, $d_r = 90^\circ$, $TWS = 15$ kn



Слика П2.21. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2$ kn, $d_r = 120^\circ$, $TWS = 15$ kn



Слика П2.22. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2 \text{ kn}$, $d_r = 150^\circ$, $TWS = 15 \text{ kn}$



Слика П2.23. Водена струја фиксна у односу на осу једрилице, варира се угао између водене струје и осе једрилице – $V_r = 2 \text{ kn}$, $d_r = 180^\circ$, $TWS = 15 \text{ kn}$

ПРИЛОГ 3.

УВОД У МЕРЕЊА У ПУНОЈ ВЕЛИЧИНИ

(РЕАЛНА МЕРЕЊА)

Човек се од најранијих дана трудио да опише природне појаве и на најбољи могући начин их употреби. Тако је и кренуо са екпериментима, прво у природној величини, па је почео да прави моделе, па решавао проблеме прерачунавања са модела на реалну појаву. Тако су цео XX век обележила моделска испитивања, и то у посебни институтима (ваздушним тунелима, базенима за моделска испитивања, кавитационим тунелима, итд.). Са развојем опреме за мерења и аквизицију сигнала, данас се све више враћа мерењу у пуној величини, у реалним условима. Данас постоји преносна опрема, која је много приступачнија од градње посебних института, којом се могу мерити појаве у природној величини. Обрадом таквих резултата уз помоћ разних математичких алата и нумеричких симулација може се доћи до значајних експерименталних података, која се могу користити за даљи истраживачки рад. Треба нагласити да се са оваквом опремом може мерити на постојећим објектима, не морају се правити нови, и из таквих резултата анализом доћи до основних података за разматрану појаву.

Са знањем спупљених током дугог низа година, помоћу моделских испитивања, данас је могуће помоћу развојем рачунара (хардвера и софтвера) направити виртуелне институте (базене, ваздушне тунеле) у којима се могу симулирати интеракција између природних појава и објеката. Те резултате треба валидизовати помућу мерења, данас у пуној величини, и ако је потребно кориговати математичке моделе. На овај начин у будућности све ће се мање користити моделска испитивања, а све више нумеричке симулације и реална мерења на постојећим објектима. За сада је најбоља комбинација употреба сви доступних техника мерења.

О моделских испитивањима и мерењима је већ било рећи у поглављу 2, а овде ћемо дати кратак преглед и опис реалних мерења на једрилицама. У оквиру овог истаживања су разматра и реална мерење и поређење са нумеричким симулацијама на описани начин у претходним поглављима, али на велику жалост требована опрема кроз пројекте технолошког развоја још увек није испоручена. Списак опреме је дат у табели ПТЗ.1. и ПТЗ.2. Помоћу опреме за мерење кретања, брзина и убрзања (GPS са пратећим сондама) може да мери: кретање и брзина у односу на подлогу (Земљу) и у односу на кретање кроз воду, мери се брзина и

правац привидног ветра, а софтвер прерачунава брзину и правац стварног ветра; мере се убрзања порстања и ваљања, где се двоструком интеграцијом могу добити углови посртања и ваљања; бележи се и трајекторира, са координатама кретања; мери се дубина, температура воде. Помоћу опреме за мерење напрезања и сила могуће је мерити силе у сајлама (лето, припоне, запутке) и конопима (шкоте, браце, итд.) преко којих се преноси резултујућа сила у једрима на труп једрилице.

Овој опреми требало би придодати и још неке сензоре (сензор отклона кормила, сензор позиције бума главног једра, сензор позиције предњег једра, итд.) и камере на јарболу које прате промену облика једара.

На основу овога могуће је добити улазне параметре за нумеричке екперименте и симулације. И тиме верификовати или кориговати моделе и поступке у математичком моделу кретања.

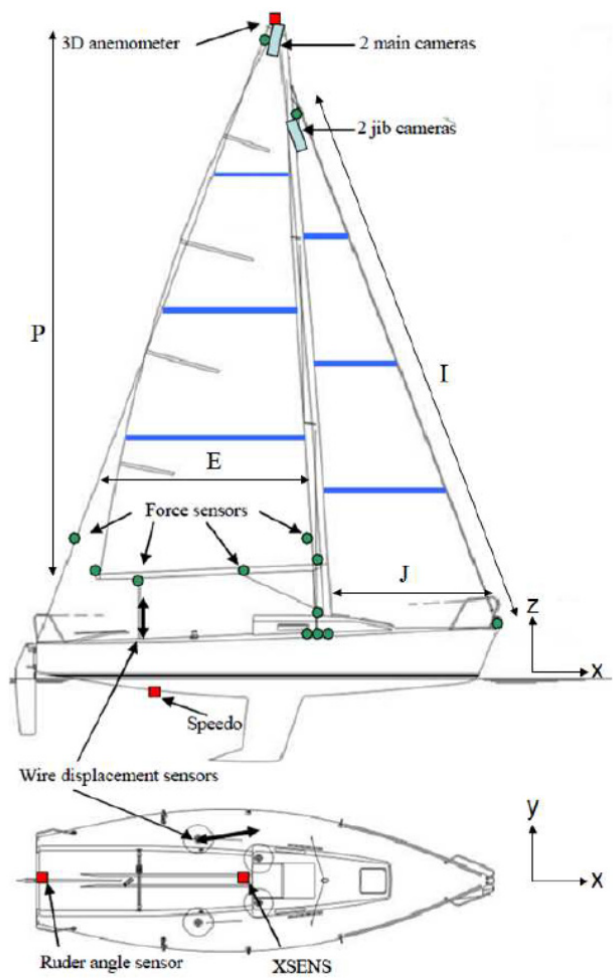
Мерења у реалним условима се већ спроводе. Међу првима је био Masuyama 1993 [28], који спровео мерења у реалним условима и поставио једначине кретања једрилице, које се данас најчешће користе. У референцама [19], [24], [53], [54] може се видети поређење мерења у ваздушним тунелима и у реалним условима. У последње време највише се мерењима у реалним условима бави Augier et all (Research Institute of the Naval Academy, IRENav, France) [41], [42], [43]. Они су на регатној једрилици класе J80, монтирали опрему за мерење, сличну горе описаној. На слици ПЗ.1. приказана је једрилица J80 са позицијама опреме. Примењују и графичку обраду слика са постављених камера, и одређују параметре једара, слика ПЗ.2. Добијени параметри (брзине, силе, итд.) у времену се анализирају помоћу софтвера и пореде са нумерички добијеним резултатима, аутори су показали доста добра поклапања резултата. Ово су тренутно најсавременија истраживања, и било би добро истрајати у намери да се сличан метод мерења имплементира и на једрење под утицајем водене струје.

ПТ 3.1. Опрема за мерење кретања, брзина и убрзања

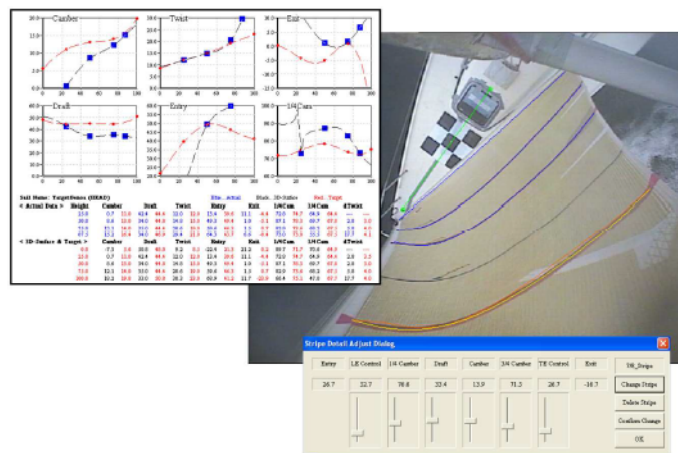
Br.	Naziv i opis	SLIKA
1.	GARMIN GPSMAP 527 xs: <ul style="list-style-type: none"> • GPS ploter sa internom antenom • Integrisan chirp sonar velike snage (1kW, domet 600m) • 4" dijagonala ekrana, 6.1 x 8.1 cm, 240x320 tačaka • 2 x SD slot za detaljne karte, • Napajanje 10-35 V = • Mogućnost montaže u ploču (potreban dodatni nosač) • NMEA 0183, NMEA 2000, WiFi • 50.000 tačaka u aktivnom track logu • Isporučuje se sa kartom reka u Srbiji 	
2.	SONDA Krmena DST 010-10192-21 <ul style="list-style-type: none"> • Frekvencija 50/200 kHz • Dubina, temperatura i brzina kroz vodu • 8pin konektor za 527 xs 	
3.	AIRMAR 200WX ultrasonic windmeter: <ul style="list-style-type: none"> • Wind senzor sa NMEA2000 komunikacijom • Brzina i smer vetra • Temperatura i pritisak vazduha • 10 Hz GPS prijemnik • 3-osni solid-state kompas (HDG) • 3-osni rate-gyro (ROT) • Akcelerometar (pitch-roll) • Priključuje se na GPSMAP 527 uređaj preko NMEA2000 	
4.	NMEA 2000 starter kit Komplet kablova za primarnu NMEA2000 mrežu za povezivanje GWS-10 u sistem: <ul style="list-style-type: none"> - Power inserter - Network terminator x 2 - Set drop kablova 	
5.	ACTISense NGT-1 NMEA2000 to PC USB adapter za povezivanje NMEA2000 mreže i računara Isporučuje se sa NMEA Reader Utility softverom za pregled i kontrolu parametara rada mreže	

ПТ 3.2. Опрема за мерење напрезања и сила

780500-01	NI WLS-9237, IEEE 802.11 b/g Wireless data acquisition device, bridge and strain input, 4-channel, 50 kS/s/ch, 24-bit, ±25 mV/V, and NI-DAQmx driver software
194612-02	RJ50 Cable for 9944, 9945, and 9949, 2m (qty 4)
196809-01	NI 9949 RJ-50 (female) to screw terminal adaptor (120 Ohm, qty)
194738-01	NI 9944 Quarter Bridge Completion Accessory (120 Ohm, qty 4)
194739-01	NI 9945 Quarter Bridge Completion Accessory (350 Ohm, qty 4)
780235-01	NI USB-9234, 24-bit Sigma-Delta ADCs, 51.2 kS/s max samp rate 4 input simultaneous, software selectable IEPE and AC/DC coupling anti-aliasing filters, 102 dB dynamic range
780989-01	High sensitivity shear accelerometer, 100 mV/g
780986-01	Coaxial cable: 10-32 plug to BNC plug for shear accelerometer; cable length 10ft



Слика П3.1. Генерални план J80 са позицијом сензора [42]



Слика П3.2. Пример анализе облика и параметара једара [42]

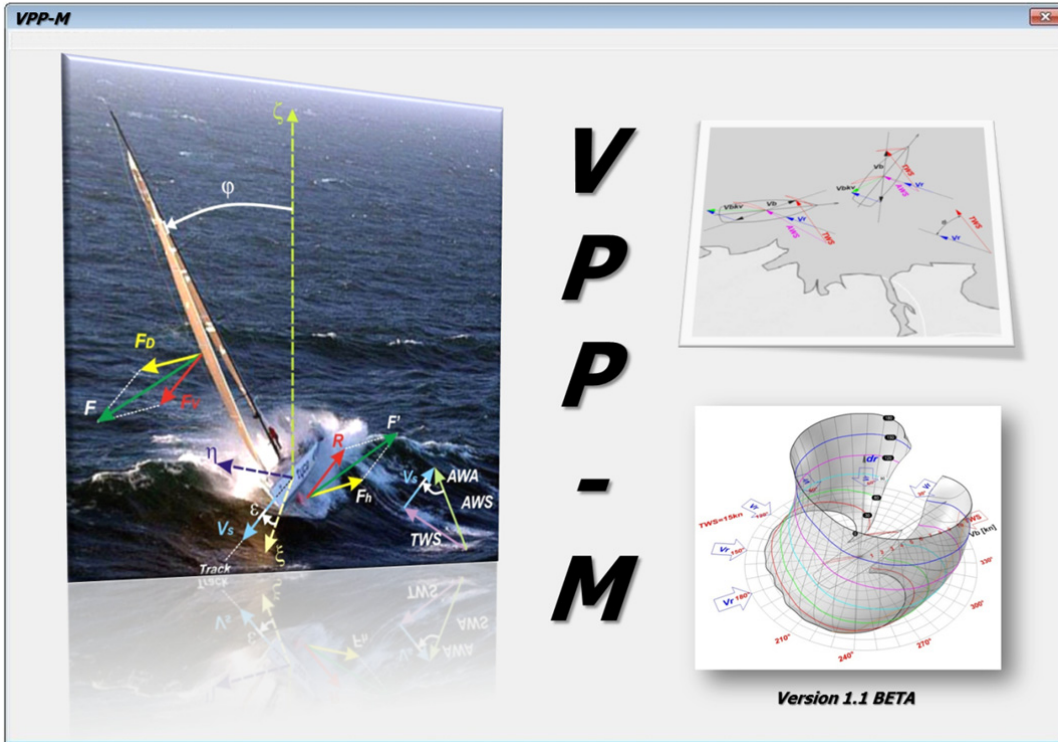
ПРИЛОГ 4.
ОПИС ПРОГРАМА

Програм VPP-M (радни назив) развијен је у програму Microsoft Visual Basic for Application 7 (програмски језик Visual Basic) при Microsoft EXCEL-у, који је веома погодан за прорачуне у временском домену, пошто су табеле скоро неограниченог капацитета, а као резултат прорачуна је могуће добити велики број података. Завршна форма програма прилагођена је корисницима, са ограниченим функцијама и приказом променљивих величина. Основни програм пружа могућност много опширније анализе, приказане у раду.

На слици П4.1. приказана је насловна страна бета верзије програма. Програм се састоји из више модула, који омогућавају разне прорачуне кретања једрилице. Модул I је унос података везаних за једрилицу за коју треба прорачунати перформансе, слика П4.2., уносе се подаци везани за труп и изданке, као и подаци везани за једра. Модул II, слика П4.3., прорачунава отпор кретању једрилице, са и без утицаја водене струје, за усправан положај или ако једрилица има нагиб. За процену отпора кретању користе се семи-емпирујски полиноми тзв. Делфтске серије једрилица [13], а резултати се могу користити при одабиру помоћног мотора. Модул III, слика П4.4., се користи за одређивање статичке равнотеже, и решава појединачне случајеве кретања једрилице. У оквиру овог модула задаје се брзина стварног ветра TWS , правац стварног ветра, с тим да се може бирати да ли се уноси у односу на правац кретања TWA или осу једрилице TWA' . Такође се може вршити одабир да ли има или не утицаја водене струје, и ако има мора се унети брзина и правац водене струје, за оба приступа (описано у поглављу 3), као излаз добијају се резултати брзине кретања, брзине кретања кроз воду, углови заносења, брзина и правац привидног ветра, итд. Треба напомену да програм даје и оптимални положај једара како би се остварила максимална брзина кретања. Ови подаци су од велике користи кориснику током једрења, пошто на основу њих може да позиционира једра. Модул IV, слика П4.5., даје класичан VPP прорачун, за више правца пловидбе, са и без утицаја водене струје, подаци се приказују табеларно и помоћу поларног дијаграма, а за сваки правац пловидбе даје се и оптимални положај једара. Могућност примене ових резултата је већ описана у поглављу 3. Корисник у овој верзији не може да користи функције, које се више односе на истраживања, као нпр. могућност промене типа изданка и једриља, али може мењати њихове геометријске величине, што такође даје

широку примену на различите једрилице са класичном опремом (кобилица пераје, класична делта једра). Модул V, слика П.4.6., доноси новину у програмима за процену перформанси једрилица, решавање кретања више није стационарно, него се решава нестационарно кретање под утицајем променљивог ветра, са и без утицаја водене струје, описано у поглављима 4 и 5. Као и у претходним модулима постоји могућност одабира начина уноса ветра и водене струје, а ново је и то да се може одабрати да ли ће програм стално оптимизовати положај једара (вредни скипер) или ће се положај једара узети из статичког решења за исте улазне параметре (лењи скипер). Резултати су приказани табеларно, за сваки тренутак, а дају се и дијаграми брзине ветра, брзине пловидбе, ваљања, залетања, заношења, као и угла заношења у временском домену. Приказују се и средње вредности поменутих величина добијених стохастичком анализом, као и резултати добијени за средњу брзину стварног ветра из статичке равнотеже. Тако да корисник може да види на који начин да прилагоди своје једрење током времена, ако се спољни услови мењају.

Као и сваки програм, и овај програм треба проширити и дорађивати, додати му још неке опције које постоје у изворном програму, а свакако треба радити на додавању још једног степена слободе и проширивању базе једара и изданака, као и новим моделима оптимизације. Када се сагледају све приказане функције програма, кориснику је пружено много више опција, него у комерцијалним програмима. Остаје да се програм докаже и у свакодневnoj примени, и да се према препорукама корисника коригује и још више прилагоди кориснику.



Слика П4.1. Прва (насловна) страна

VPP-M
UNOS PODATAKA | OTPOR | STAT | VPP | RVPP |

Jedrilica:
YD-40

Trup	
Lwl (m)	10.02
Bwl (m)	3.17
Tc (m)	0.57
T (m)	2.07
D (t)	8.12
H (m)	1.3
CW	0.712
CP	0.56
LCB (%)	-3.5
LCF (%)	6.62

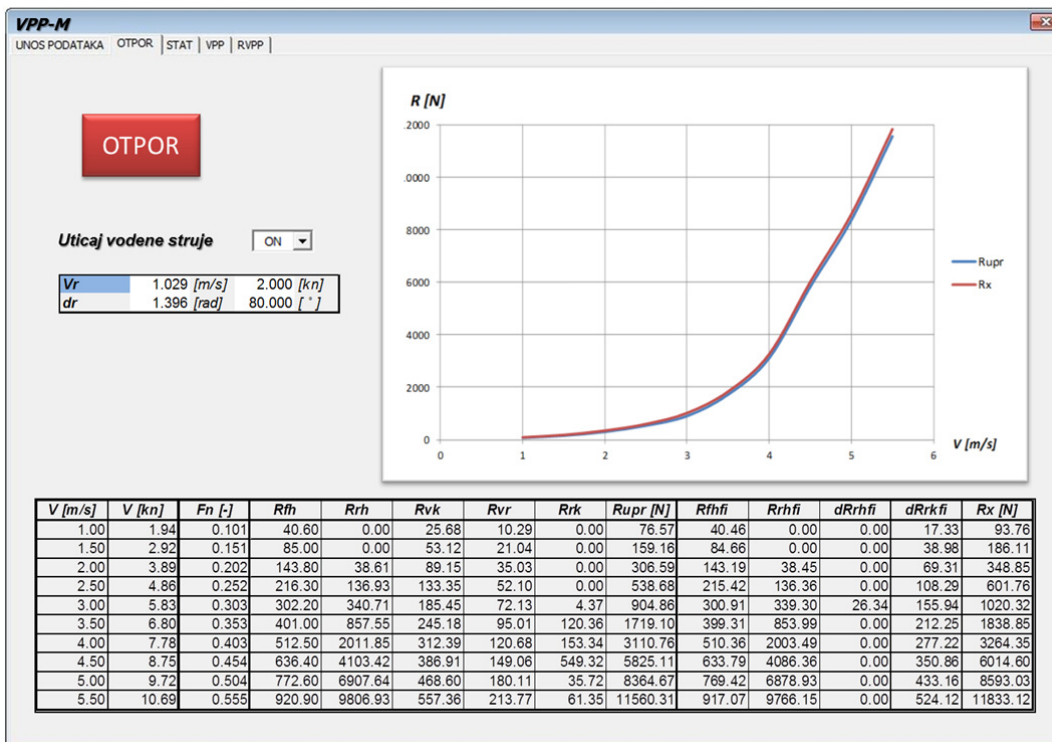
Glavno jedro/MAIN	
P (m)	15.1
E (m)	4.7
BAS (m)	1.2

Prečka/JIB	
M (m)	16.9
J (m)	4.3
LP (m)	6.45

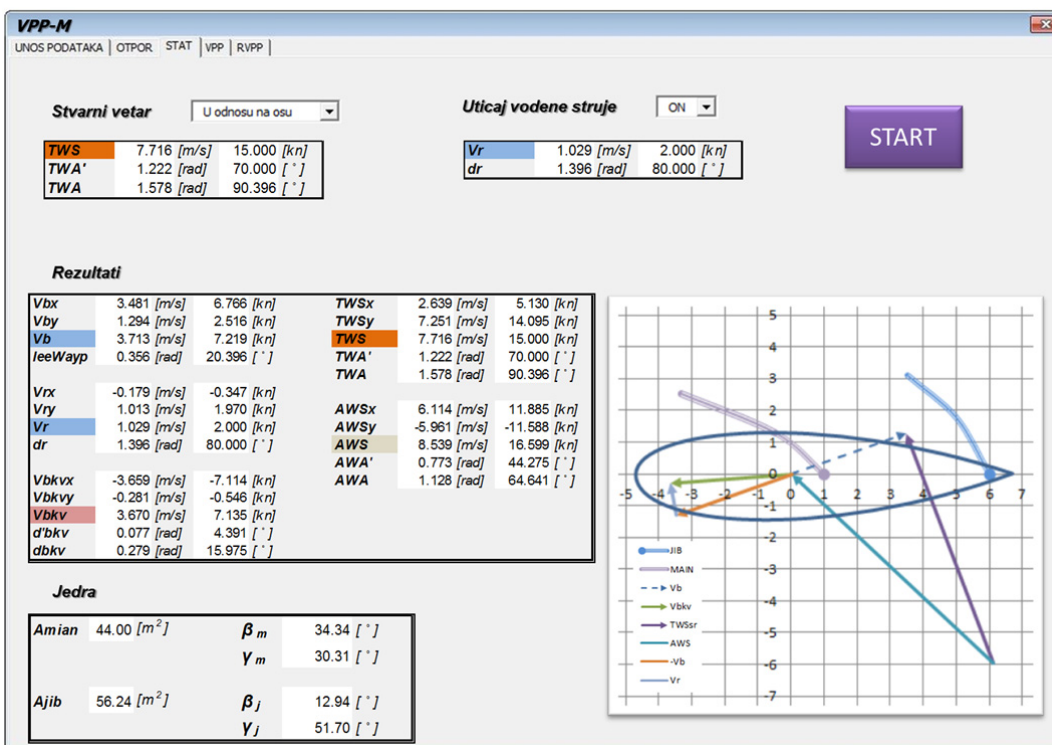
JIB	ON
MAIN	ON

Kobilica i kormilo	
Lk (m)	1.5
tk (m)	0.3
Bal (t)	3.25
TRH (m)	1.5
Zk (m)	-0.6
Lr (m)	0.45
Tr (m)	1.47
tr (m)	0.1

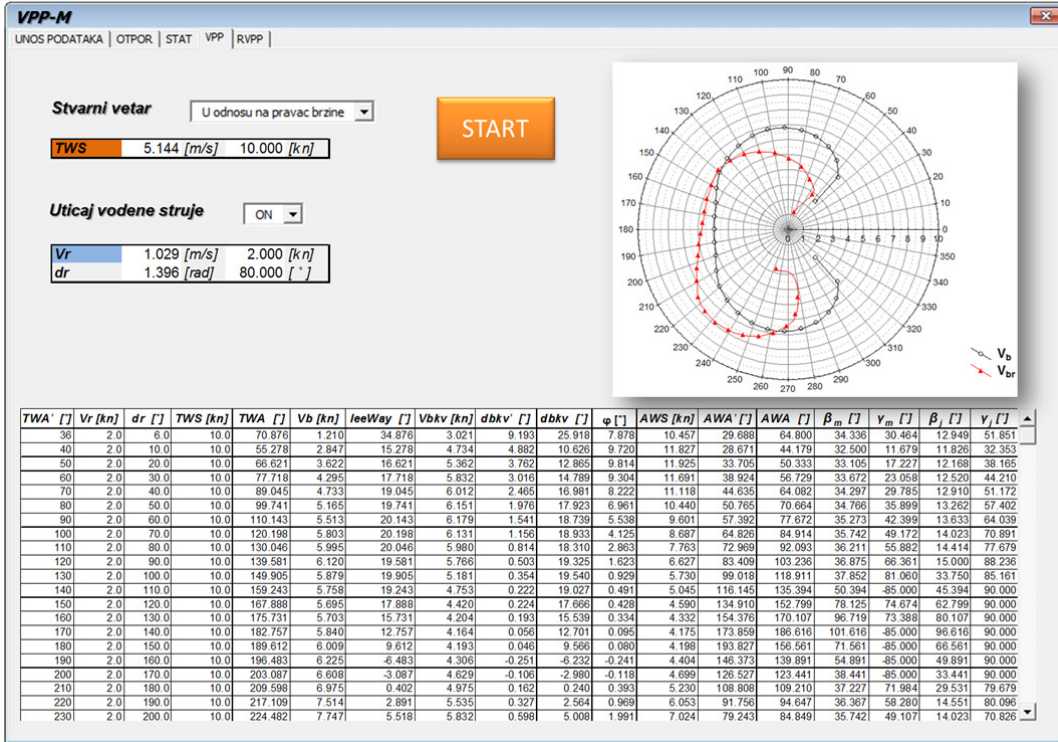
Слика П4.2. Унос података



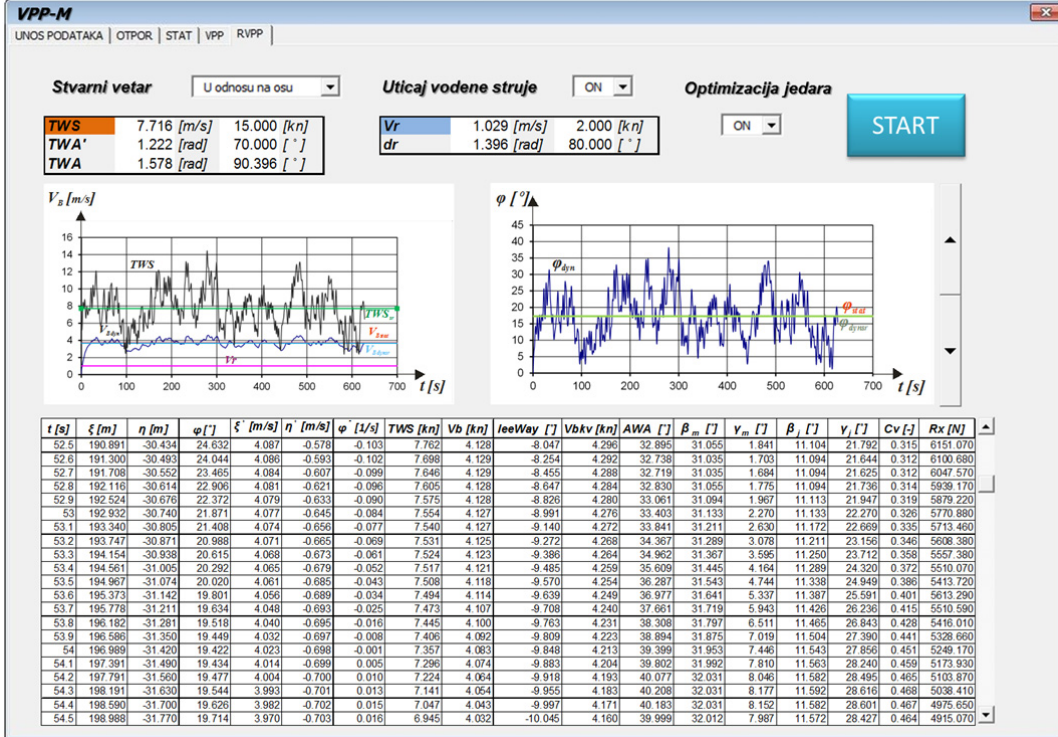
Слика П4.3. Процена отпора



Слика П4.4. Статичка равнотежа за један случај



Слика П4.5. Статички VPP



Слика П4.6. Динамички VPP

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Милан Калајџић рођен је 25. августа 1982. године у Београду. Основну школу завршио је у Скели, а гимназију у Обреновцу. Дипломирао је 09. октобра 2006. године на Машинском факултету Универзитета у Београду, на Смеру за бродоградњу, са просећном оценом 9.37 и оценом 10 на дипломском испиту. Тема дипломског рада била је: Ефикасност речних гурачких састава при превозу контејнера. Уписао је докторске студије на Смеру за бродоградњу Машинског факултета школске 2006/07. године. На основу тога је, као стипендиста Министарства науке, ангажован на Катедри за бродоградњу Машинског факултета, и то као сарадник у настави и као истраживач на пројекту Технолошког развоја ТР-6317А и (касније) ТР- 14012. Од септембра 2010. године запослен је на Машинском факултету као асистент с пуним радним временом на групи предмета Бродоградње. На основу резултата остварених у претходном периоду, додељена му је прва (Т1) категорија истраживача, и као такав је ангажован на пројекту Технолошког развоја ТР-35009 (Развој нове генерације сигурних, ефикасних, еколошких (СЕ-ЕКО) бродова).

Милан Калајџић завршио је Машински факултет у року, са просечном оценом на стручним предметима Смера за бродоградњу 10.00. Током студија није пао, нити поништио, ниједан испит. Добио је, као студент додипломских студија низ награда и признања. Проглашаван је 2004, 2005. и 2006. године за најбољег студента III, IV и V године студија Машинског факултета. Проглашен је, 2006. године, за првог дипломираног студента генерације 2001/2002, а 2007. године за Студента генерације 2005/2006. Машинског факултета. Добио је, 2005. године, награду Фонда Михајло Пупин Српске народне одбране из Америке, а 2007. године награду „Проф. др Војислав К. Стојановић“ Удружења универзитетских професора и научника Србије, као најбољи студент V године студија.

Још од почетка ангажовања као стипендиста Министарства науке, Милан Калајџић учествује у извођењу наставе на Смеру за бродоградњу Машинског факултета. Држао је (и држи) аудиторне вежбе из предмета Бродски системи, Пловност и стабилитет брода, Пројектовање брода и Рачунарски алати у бродоградњи. Такође обавља преглед пројеката на предметима Пловност и стабилитет брода и Пројектовање брода. Учествује у припреми и прегледу испитних задатака, као и дипломских радова из предмета на којима је ангажован.

Милан Калајџић је коаутор четири рада који су објављени у међународним часописима, од тога два рада су објављена у часописима са СЦИ листе.

Током докторских студија и рада на пројектима Технолошког развоја, кандидат се бавио са неколико различитих тема из области бродоградње.

Прикључио се истраживачкој групи која је проучавала сигурност брода под дејством ветра и таласа и, у оквиру тих истраживања, објавио два заједничка рада и једно техничко решење. Бавио се и бродском хидродинамиком и, у оквиру ових истраживања, објавио два заједничка рада и остварио два техничка решења. Бавио се, у оквиру стручних активности, и прорачунима стабилитета неоштећених, оштећених и насуканих бродова, као и бродским мерењима у реалним условима пловидбе. Радио је и на прорачунима уређаја за конверзију енергије таласа у електричну енергију.

Као члан истраживачког тима Катедре за бродоградњу Машинског факултета Универзитета у Београду добио је међународну награду из области бродоградње „The 2007 Royal Institution of Naval Architects (RINA) and Lloyd’s Register Educational Trust SHIP SAFETY AWARD“, (Годишњу награду за сигурност бродова, коју додељује британско Краљевско друштво бродоградитеља и Лојд регистар). Награда је добијена за допринос развоју нових правила о сигурности брода базираних на ризику од наплављивања и превртања: „Development of risk-based ship stability regulations“.

Добио је, 2010. године, међународну награду „WAKENAM Prize“ за рад „Fifty Years of the Gawn-Burrill KCA Propeller Series“, коју му је доделило британско Краљевско друштво бродоградитеља (RINA), за најбољи рад аутора млађег од 30 година, објављен у часописима Друштва.

Милан Калајџић је одржао и два предавања на скуповима Друштва бродограђевних инжењера и техничара ДБИТ,

„Нове методе провере стабилитета речних бродова“,

„Мерење и анализа апсорбције снаге, вибрација и буке на броду за превоз расутог терета ERLYNE“,

на којима је представио своје истраживачке активности.

Члан је британског Краљевског удружења бродоградитеља RINA (The Royal Institution of Naval Architects) и Друштва бродограђевних инжењера и техничара Србије (ДБИТ).

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а _____ Милан Калајић _____

број уписа _____ Д5/06 _____

Изјављујем

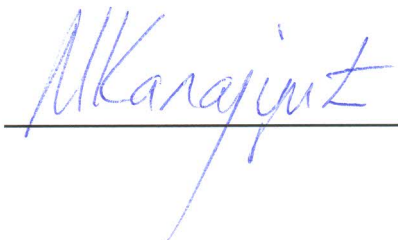
да је докторска дисертација под насловом

КРЕТАЊЕ ЈЕДРИЛИЦЕ ПОД ДЕЈСТВОМ ПРОМЕНЉИВОГ ВЕТРА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, _____ јул 2014. _____



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милан Калајић

Број уписа Д5/06

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада Кретање једрилице под дејством променљивог ветра

Ментор проф.др Милан Хофман

Потписани Милан Калајић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, јул 2014.

М.Калајић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Кретање једрилице под дејством променљивог ветра

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, ___јул 2014. _____

Потпис докторанда

