

Fizika jedrenja

Zelić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, University of Split, Faculty of science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:190336>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet

FIZIKA JEDRENJA

Završni rad / Bachelor thesis

Ana Zelić

Split, rujan 2019.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Fizika jedrenja

Ana Zelić

Sveučilišni preddiplomski studij Matematika i fizika

Sažetak:

Jedrenje je vrlo kompleksan sport. Da bi se naučilo jedriti vrlo je važna praksa na moru. Međutim, osim toga potrebno je poznavati i fizikalnu teoriju jedrenja. Princip jedrenja zasnovan je na usklađivanju aerodinamičkih sila koje djeluju na jedra i hidrodinamičkih koje djeluju na podvodni dio trupa. U ovom završnom radu cilj je široj publici približiti način na koji navedene sile djeluju na jedrilicu i uzrokuju njeno gibanje te prikazati prisutne sile otpora. Usporediti ću djelovanje aerodinamičkih sila na jedro i na avionsko krilo, kao i nastanak turbulencija na istome. Reći ću nešto i o stabilnosti jedrilice na moru kao i o postavkama jedara za postizanje što boljeg učinka aerodinamičkih sila.

- Ključne riječi:** aerodinamičke sile, hidrodinamičke sile, jedro, brod, kobilica, moment sile
- Rad sadrži:** 26 stranica, 37 slika, 12 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku
- Mentor:** prof. dr. sc. Leandra Vranješ Markić
- Ocjenjivači:** prof. dr. sc. Leandra Vranješ Markić
izv. prof. dr. sc. Željana Bonačić-Lošić
doc. dr. sc. Petar Stipanović
- Rad prihvaćen:** 23. rujna 2019.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

Physics of sailing

Ana Zelić

University undergraduate study programme Mathematics and Physics

Abstract:

Sailing is a very complex sport. To learn how to sail, practice at the sea is very important. However, it is also necessary to know the theory of sailing. The principle of sailing is based on the alignment of aerodynamic forces acting on the sails and hydrodynamic forces acting on the underwater hull. In this Bachelor thesis, I will try to bring the audience closer to the way in which the mentioned forces act on the sailboat and make it go forward but also write about the forces that resist its movement. I will compare the effect of aerodynamic forces on the sail and on the airplane wing, as well as the occurrence of turbulence on them. I will also say something about the stability of a sailboat at sea as well as about adjusting the sails to achieve the best effect of aerodynamic forces.

Keywords: aerodynamic forces, hydrodynamic forces, sail, boat, keel, torque

Thesis consists of: 26 pages, 37 figures, 12 references. Original language: Croatian

Supervisor: Prof. Dr. Leandra Vranješ Markić

Reviewers: Prof. Dr. Leandra Vranješ Markić
Prof. Dr. Željana Bonačić-Lošić
Doc. Dr. Petar Stipanović

Thesis accepted: September 23, 2019.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Jedrenje niz vjetar	3
2.1	Uvod	3
2.2	Prividni vjetar	3
3	Jedrenje uz vjetar	5
3.1	Uvod	5
3.2	Prividni vjetar	5
3.3	Analogija jedra i avionskog krila.....	6
3.4	Aerodinamička sila koja djeluje na jedrilicu	7
3.5	Hidrodinamička sila koja djeluje na jedrilicu	10
3.6	Odnos aerodinamičkih i hidrodinamičkih sila	12
4	Stabilitet jedrilice	13
4.1	Centar mase broda, centar plovnosti i centar jedra.....	13
4.2	Nagib jedrilice	14
4.2.1	Jedrenje uz vjetar	14
4.2.2	Jedrenje niz vjetar	17
5	Postavke jedra pri jedrenju uz vjetar	19
5.1	Uvod	19
5.2	Pokazivači protoka vjetra uz jedro	19
5.2.1	Turbulencije na avionskom krilu	20
5.3	Kontrole za postavke jedra	21
6	Zaključak.....	25
7	Literatura.....	26

1 Uvod

Vrlo često ljudi s obale gledaju jedrilicu kako jedri i požele znati jedriti i uživati u tome. Jedrenje je vještina plovidbe uz pomoć vjetra kao pokretačke snage. Onima koji jedre to je način života. S druge strane, čak i mnogi koji plove ne znaju kako to točno jedro "gura" brod prema naprijed. Kroz povijest jedrenjaci su se mijenjali po konstrukciji i veličini. U početku je njihova namjena bila ratna, trgovačka i turistička, ali s pojavom parnog stroja te kasnije drugih vrsta motora jedrenje gubi gospodarsku važnost. Danas je jedrenje za većinu ljudi rekreacija i zabava, te popularan i raširen sport. Najmanje natjecateljske jedrilice imaju samo jednog člana posade, kao npr. klase Optimist, Laser (slika 1) ili Finn, dok najveće jedrenjake dužine i do trideset metara kao što su Wally (slika 2) ili Swan opslužuju desetine mornara.

Jedrenje je specifičan te vrlo kompleksan sport. Na kretanje i brzinu jedrilice utječe velik broj faktora. Od iskustva posade te njihove snage i izdržljivosti, preko snage i značajki pojedinog vjetra, postavki jedara s obzirom na jačinu vjetra, morskih struja, valova, oblaka, poznavanja ostalih meteoroloških čimbenika itd.

Da bi se naučilo jedriti potrebno je upravo to, jedriti. Ali prije toga treba ipak poznavati i nešto teorije. Cijeli princip jedrenja zasnovan je na zakonima fizike, tj. na usklađivanju aerodinamike i hidrodinamike. Aerodinamika je znanost koja proučava djelovanje zraka na tijela koja se kroz njega gibaju te sile koje pri tome nastaju, a hidrodinamika se bavi zakonima gibanja tekućina i pojavama uzrokovanim uzajamnim djelovanjem tekućine u gibanju i tijela koje se nalazi u njoj. Aerodinamičke sile djeluju na jedra, a hidrodinamičke na podvodni dio trupa. Na koji način te sile djeluju na jedrilicu i uzrokuju njeno gibanje te koji joj se otpori suprotstavljaju bit će objašnjeno u ovom radu.

Ljudi često pitaju jedriličare može li im se jedrilica prevrnuti. Kod jedrilica je jako važan stabilitet broda, tj. svojstvo broda da održava uspravan položaj u svim okolnostima plovidbe. On direktno utječe na brzinu jedrilice jer određuje koliko porivne sile vjetra jedrilica može preuzeti, odnosno prihvatiti, a da se ne prevrne.

Cilj jedriličarskih natjecanja je proći zadanu stazu u što kraćem vremenu. To znači da je ključ pobjede biti najbrži. U natjecanjima gdje sve posade imaju jednake trupove, veliki je značaj na postavkama jedra jer osim spremnosti i vještina jedriličara, to je ono što čini razliku na regatnom polju. Upravo iz tog razloga, osim objašnjenja zašto i kako se jedrilica kreće, u ovom ću radu analizirati utjecaj jedra na brzinu jedrilice te kakve postavke jedra su najpovoljnije za maksimalan učinak po različitim vremenskim uvjetima.



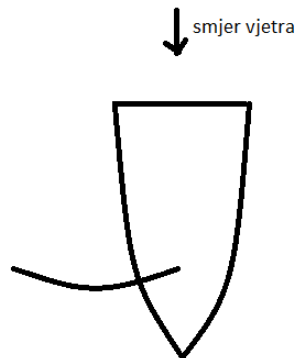
Slika 1. Olimpijska klasa Laser Radial (fotografirao Goran Martinović, uzeto s dozvolom).



Slika 2. Jedrilica Wally. Slika preuzeta s <https://www.northsails.com/sailing/en/2018/10/wally-class-trophy> [6].

2 Jedrenje niz vjetar

2.1 Uvod



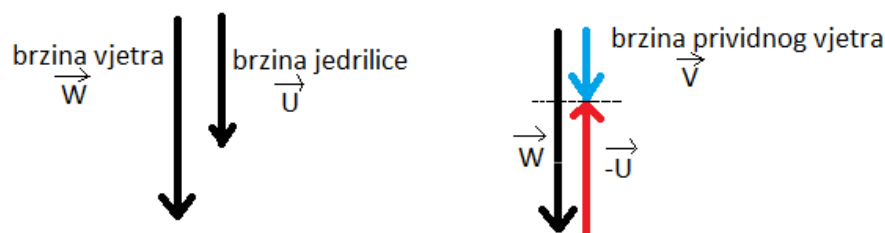
Slika 3. Položaj jedra pri jedrenju niz vjetar.

Jedrenje niz vjetar, tzv. krma, jedan je od najstarijih i najjednostavnijih načina jedrenja te ga je najlakše za shvatiti. Jedra se nalaze u položaju okomitom na vjetar, a brod je usmjeren na istom pravcu u kojem vjetar puše (slika 3). Tijekom jedrenja niz vjetar jedro se ne ponaša kao aerodinamička površina već je bitna projicirana površina u odnosu na smjer vjetra. Može se zamisliti da jedro zaustavlja molekule zraka koje ga udaraju, tj. djeluje silom na njih. Po trećem Newtonovom zakonu i te čestice djeluju silom na jedro te ga guraju prema naprijed.

2.2 Prividni vjetar

Jedreći niz vjetar, jedrilicarima na brodu se čini da je vjetar znatno manji nego što uistinu jest. Ta pojava izazvana je razlikom između brzine pravog vjetra mjerene s obzirom na vodu te brzine broda s obzirom na vodu, a zovemo je prividni vjetar. Brzina jedrilice s istim vjetrom stvara različite prividne vjetrove, ovisno o smjeru kretanja s obzirom na smjer vjetra. Jedrilica u plovidbi može registrirati samo prividni vjetar, tj. vjetar u kojem se nalazi. Ako jedrilica ima instrumente koji pokazuju smjer vjetra, oni pokazuju upravo smjer prividnog vjetra. Prividni vjetar neke jedrilice samo je njen prividni vjetar. Druga jedrilica u blizini, u istom vjetru i s istim smjerom kretanja, ali s različitom brzinom ima svoj drugačiji prividni vjetar.

Kako se pri jedrenju niz vjetar i vjetar i jedrilica gibaju u istom smjeru, promatrajući njihove vektore brzine, brzina prividnog vjetra kao razlika tih vektora manja je od brzine stvarnog vjetra, ali istog je smjera (slika 4).



Slika 4. Prividni vjetar pri jedrenju niz vjetar.

Neka W označava iznos brzine pravog vjetra, V iznos brzine prividnog vjetra, a U iznos brzine jedrilice. Tada je $V = W - U$ (1). Neka je S_0 koeficijent jedrenja niz vjetar. S_0 uspoređuje brzinu broda s brzinom prividnog vjetra te vrijedi da je $S_0 = \frac{U}{V}$ (2). Jedriličare obično zanima brzina broda u usporedbi s brzinom pravog, a ne prividnog vjetra. Iz jednadžbi (1) i (2) dobivamo upravo taj omjer: $\frac{U}{W} = \frac{U}{V+U} = \frac{\frac{U}{V}}{\frac{V+U}{V}} = \frac{S_0}{1+S_0}$. Iz ovoga slijedi da je $U = \frac{S_0}{1+S_0}W$. Ova jednadžba ima smisla jer je razlomak $\frac{S_0}{1+S_0}$ ispred W uvijek manji od 1. Jedrilica ne može jedriti niz vjetar brže od brzine vjetra. [2]

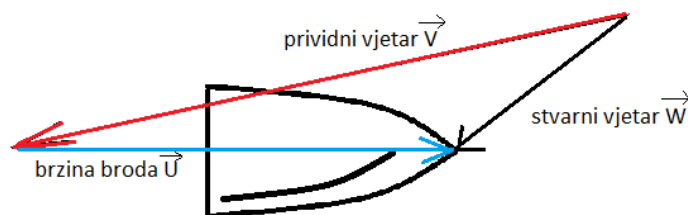
3 Jedrenje uz vjetar

3.1 Uvod

Jedrenje uz vjetar, tzv. orca, je smjer kretanja jedrilice kada jedri što je moguće bliže prema smjeru odakle vjetar puše. Kod većine jedrilica to je oko 45 stupnjeva u odnosu na smjer vjetra, a neke jedrilice mogu postići i 35 stupnjeva. Jedrenje uz vjetar se zbog toga općenito smatra najvažnijim kursom. Taj najmanji kut između smjera vjetra i smjera kretanja jedrilice ovisi o mnogo faktora, a jedan od njih su postavke jedra (poglavlje 5).

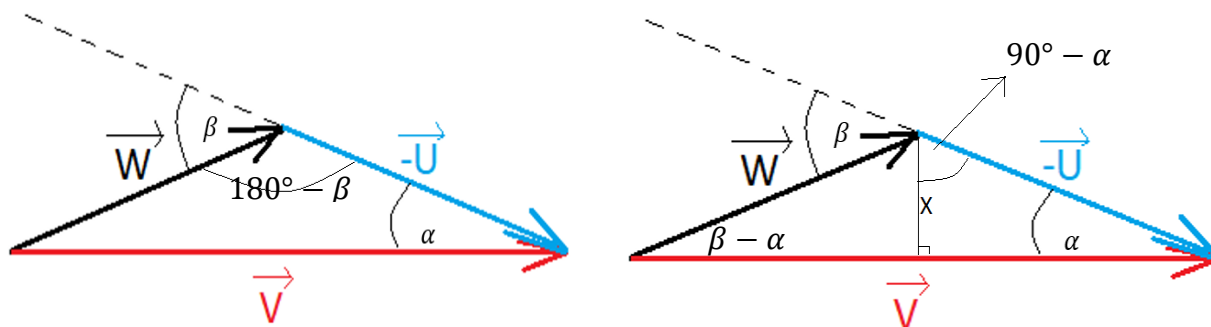
3.2 Prividni vjetar

Kao kod jedrenja niz vjetar, pri jedrenju uz vjetar također se događa prividni vjetar. U razmatranje ponovno uzimamo vektor smjera stvarnog vjetra \vec{W} i vektor gibanja jedrilice \vec{U} . Vektorski zbroj ove dvije komponente daje vektor smjera prividnog vjetra \vec{V} koji ima veću brzinu od stvarnog vjetra. Prividni vjetar predstavlja stvarni smjer nastrujavanja zraka na jedro i za razliku od prividnog vjetra pri jedrenju niz vjetar, različit je od smjera stvarnog vjetra (slika 5). [2]



Slika 5. Prividni vjetar pri jedrenju uz vjetar.

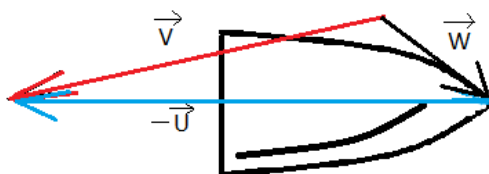
Jačina prividnoga vjetra, tj. iznos brzine \vec{V} ovisi o smjeru kretanja broda s obzirom na stvarni smjer vjetra. Vrijedi da je $\vec{W} = \vec{V} + \vec{U}$, tj. $\vec{W} - \vec{U} = \vec{V}$.



Slika 6. Kutovi između vektora brzina.

Iz slike 6 možemo uočiti da je $\sin\alpha = \frac{x}{U}$ te da je $\sin(\beta - \alpha) = \frac{x}{W}$. Iz ovoga slijedi da je $\frac{U}{W} = \frac{\frac{x}{\sin\alpha}}{\frac{x}{\sin(\beta-\alpha)}}$, tj. $\frac{U}{W} = \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\alpha}$ (3). Ova jednadžba predstavlja odnos iznosa brzine broda i iznosa brzine stvarnog vjetra. Za iznos brzine vjetra W , pitanje je koja je najveća moguća brzina jedrilice U . U jednadžbi (3) idealno bi bilo kada bi kut $\beta - \alpha$ bio 90° . Za mali kut α to bi značilo da bi smjer stvarnog vjetra trebao biti okomit na smjer kretanja jedrilice. [14]

Vrlo brze moderne jedrilice mogu dostići brzinu koja je veća od brzine stvarnog vjetra. Tada prividni vjetar na jedrilicu uvijek dolazi sprijeda, čak i kada smjer stvarnog vjetra na jedrilicu dolazi s krme (slika 7). [12]



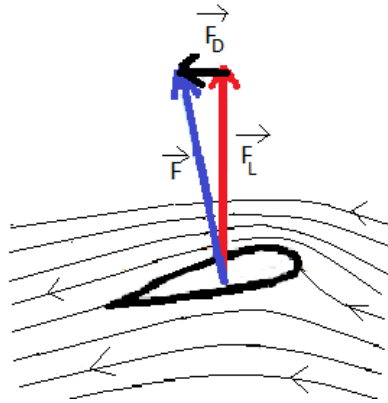
Slika 7. Brza jedrilica koja postiže brzinu veću od brzine vjetra.

3.3 Analogija jedra i avionskog krila

Zrakoplov leti na sličan princip na koji jedrilica jedri. Na slici 8 prikazan je presjek avionskog krila te zračna struja koja nailazi na njega horizontalno s desna na lijevo brzinom \vec{v}_1 . Nagib krila uzrokuje da zračna struja u dodiru s krilom skrene prema dolje brzinom \vec{v}_2 . Očito je krilo djelovalo silom na molekule zraka pa prema trećem Newtonovom zakonu i molekule zraka djeluju na krilo silom \vec{F} koja je istog iznosa i smjera, ali suprotne orijentacije od sile kojom krilo djeluje na zračnu struju. Ova sila je rastavljena na komponente koje nazivamo aerodinamički uzgon \vec{F}_L i aerodinamički otpor \vec{F}_D (slika 9). Aerodinamički otpor je sila koja je rezultat otpora zraka te ima smjer nailaska zraka na krilo. Lokalne promjene brzine prati, prema Bernoullievom zakonu, i lokalna promjena statičkog tlaka. Zbog oblika krila ili nagiba u odnosu na zračnu struju, tlak (koji se dobije integracijom navedenih promjena tlaka) na donju površinu krila veći je nego na gornju što doprinosi sili aerodinamičkog uzgona koja diže zrakoplov. [4]



Slika 8. Zračna struja nailazi na avionsko krilo s desna na lijevo.

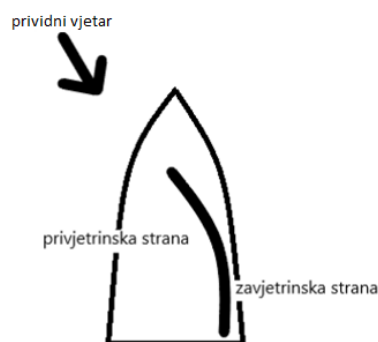


Slika 9. Aerodinamički uzgon \vec{F}_L i aerodinamički otpor \vec{F}_D .

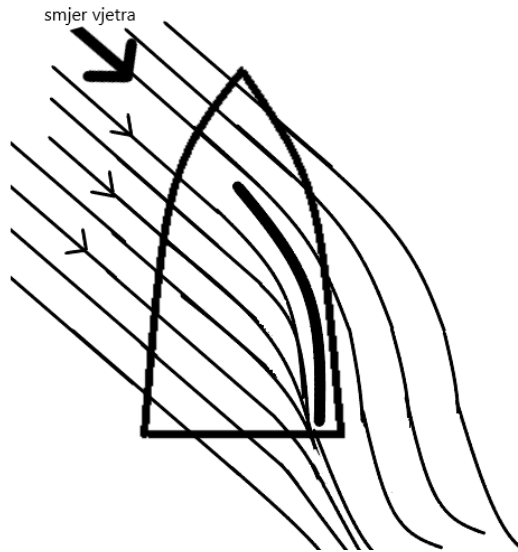
Postoje mnoge diskusije o ispravnom modelu za objašnjenje nastanka sile aerodinamičkog uzgona. U literaturi, a posebno na internetskim stranicama pojavljuju se prejednostavna i netočna objašnjenja nastanka aerodinamičkog uzgona. Jedan primjer je da je brzina zraka iznad i ispod krila različita iz razloga što čestice zraka iznad krila trebaju prijeći dulji put od onih ispod, a za isto vrijeme. Ta tvrdnja je u suprotnosti s eksperimentima i proračunima brzine fluida, koji pokazuju da čestice zraka ne prelaze dvije strane krila u isto vrijeme. Primjer jedne diskusije naveden je u literaturnim navodima [9] i [10], dok se na NASA-inoj internetskoj stranici [11] može pronaći detaljna usporedba najčešće korištenih teorija i pogreški.

3.4 Aerodinamička sila koja djeluje na jedrilicu

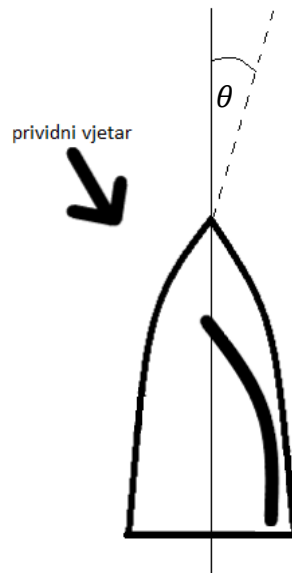
Kako se tijekom jedrenja niz vjetar jedro ne ponaša kao aerodinamička površina već je bitna projicirana površina u odnosu na smjer vjetra, princip aerodinamike bit će pojašnjen na gibanju jedrilice uz vjetar. Opisano je kako zrak koji nailazi na avionsko krilo stvara silu aerodinamičkog uzgona te se pomoću te sile avion izdiže u visinu. Kao i preko krila, i preko jedra struje čestice zraka te se one u dodiru s prednjim rubom jedra razdvajaju. Kada je jedro „napuhano“, tj. kada je popunjeno vjetrom, ono postiže oblik kao na slici 10 gledajući na nj iz ptičje perspektive. Dvije strane jedra nazivaju se zavjetrinska i privjetrinska strana, ovisno o smjeru vjetra s obzirom na položaj trupa (slika 10). Strana jedrilice koja je „bliže“ vjetru naziva se privjetrinska. Dakle, dio čestica struji po zavjetrinskoj, a dio po privjetrinskoj strani jedra (slika 11).



Slika 10. Zavjetrinska i privjetrinska strana te oblik jedra pri jedrenju uz vjetar.



Slika 11. Distribucija čestica vjetra kada naiđu na jedro kao prepreku.



Slika 12. Kurs jedrilice.

Važno je spomenuti kako se jedrilica nikada ne kreće po liniji prema kojoj je usmjeren njezin pramac, već je njezin pravac kretanja otklonjen za neki kut θ , tj. jedrilica se giba blago bočno. Tu putanju koja je od linije pramca otklonjena za kut θ nazivamo *kurs* jedrilice (slika 12).

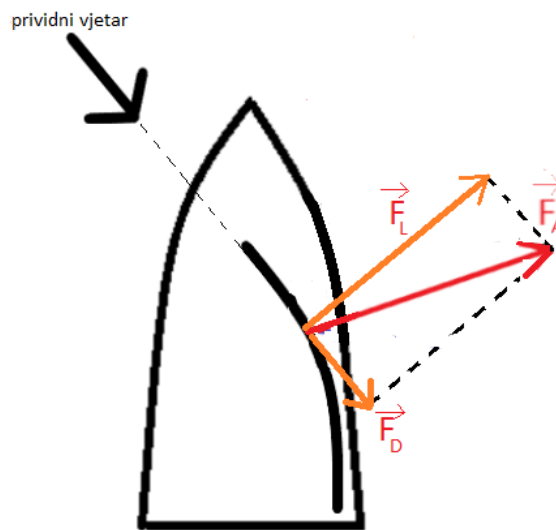
Avionsko krilo ima dva tzv. strujna profila, gornji zakrivljeniji i donji ravniji. Jedro ima oblik gornje plohe strujnog krila kojeg zauzima u uvjetima kada je pravilno postavljeno prema vjetru (slika 10). Tada niži tlak koji se javlja na zavjetrinskoj strani jedra uzrokuje nategnutost jedra prema zavjetrini. Ta sila koja zateže jedro u strujni oblik ujedno predstavlja silu aerodinamičkog uzgona \vec{F}_L koja se koristi za pogon jedrilice. Iako klasično jedro nema dvije ispupčene strujne plohe kao avionsko krilo, već ima jednu udubljenu, strujanje se ponaša kao da postoji i druga ispupčena ploha. Razlog tome je usporavanje zraka s privjetrinske strane jedra u središnjem dijelu gdje jedro ima najveći „trbuh“. U tom području vanjski slojevi zraka struje brže nego oni

bliže jedru pa se strujanje s privjetrinske strane jedra ponaša kao strujanje na asimetričnim avionskim strujnim profilima. [8]

Dakle, kao kod avionskog krila, zbog razlike u tlakovima s privjetrinske i zavjetrinske strane jedra nastaje aerodinamička sila uzgona \vec{F}_L .

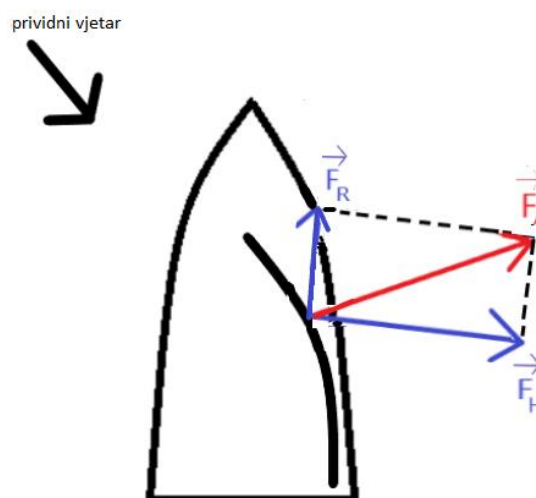
Kao kod avionskog krila, zbog otpora vjetra pri kretanju jedrilice stvara se sila aerodinamičkog otpora \vec{F}_D koja ima smjer nailaska prividnog vjetra na jedrilicu. Ta sila je okomita na silu aerodinamičkog uzgona \vec{F}_L .

Zbroj sila \vec{F}_D i \vec{F}_L daje ukupnu aerodinamičku silu \vec{F}_A koja djeluje na jedro (slika 13).



Slika 13. Ukupna aerodinamička sila i njene komponente \vec{F}_D i \vec{F}_L .

Postoji i drugi način podjele ukupne aerodinamičke sile na komponente, a to je na silu poriva \vec{F}_R i silu nagibanja \vec{F}_H (slika 14). Sila poriva djeluje u smjeru kursa jedrilice i vuče je naprijed, a sila nagibanja nastoji pomaknuti jedrilicu bočno. [1]

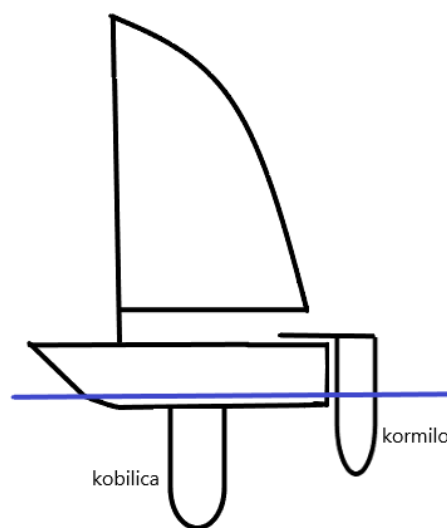


Slika 14. Ukupna aerodinamička sila i njene komponente \vec{F}_R i \vec{F}_H .

Jedra imaju najveći aerodinamički učinak kada je sila poriva \vec{F}_R maksimalna, a sila nagibanja \vec{F}_H minimalna. Tada gotovo cijela aerodinamička sila odlazi upravo na gibanje jedrilice prema naprijed te jedrilica ima veću brzinu.

3.5 Hidrodinamička sila koja djeluje na jedrilicu

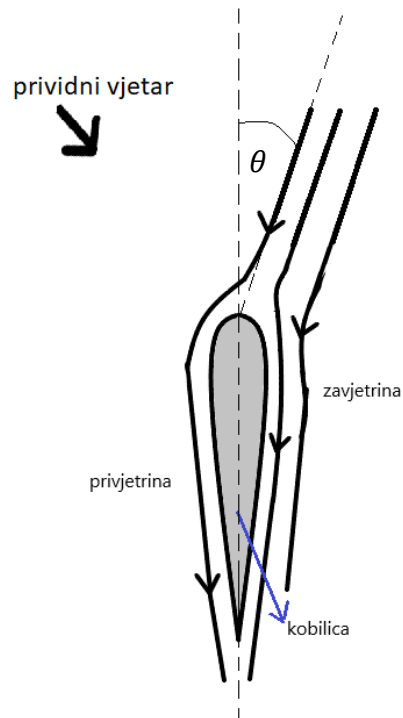
Gibanje jedrilice uz vjetar ne bi bilo moguće kada bi djelovale samo aerodinamičke sile već moraju postojati hidrodinamičke sile kao protusile onim aerodinamičkim. Na taj način izjednačavaju se hidrodinamičke i aerodinamičke sile te omogućavaju da se jedrilica giba naprijed, a ne bočno. Važnu ulogu u podvodnom dijelu imaju kobilica i kormilo (slika 15).



Slika 15. Kobilica i kormilo.

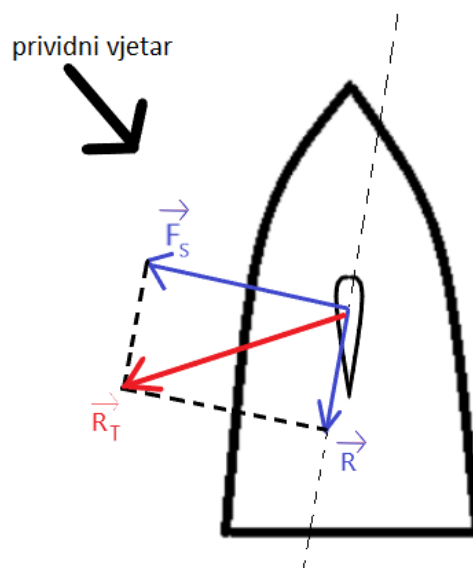
Kobilica je uglavnom fiksna iako u nekim manjim jedrilicama kao što su olimpijske klase kobilica se može uroniti manje ili više u more, ovisno o vremenskim uvjetima i smjeru gibanja jedrilice s obzirom na smjer vjetra. Kormilo se okreće oko fiksne osi koja je na spoju kormila s trupom.

Djelovanje sila biti će prikazano na kobilici jer je kobilica veće površine od kormila i više je uronjena u vodu pa ona ima veći učinak. Kobilica ima dva simetrična strujna profila. Kao kod zraka, čestice vode se pri strujanju razdvajaju kada naiđu na prepreku, tj. na kobilicu. Ranije je rečeno kako se jedrilica uvijek giba blago bočno, tj. njezin kurs je otklonjen za kut θ od linije po kojoj je usmjeren pramac broda. Zato more na kobilicu nailazi blago s bočne strane, točnije sa zavjetrinske strane (slika 16).



Slika 16. Čestice vode nailaze na kobilicu pod kutem θ .

Čestice koje struje po privjetrinskoj strani su brže od onih po zavjetrinskoj strani pa se zbog te razlike brzina na privjetrinskoj strani stvara niži tlak od onog na zavjetrinskoj strani kobilice. Zbog te razlike u tlakovima stvara se bočna sila \vec{F}_S koja ide s područja višeg tlaka prema području nižeg tlaka. Zbog otpora mora, na kobilicu djeluje sila otpora \vec{R} koja ima smjer kursa jedrilice. Vektorski zbroj tih dviju sila daje ukupnu hidrodinamičku silu \vec{R}_T (slika 17). Hidrodinamički učinak je bolji kada je sila otpora \vec{R} što manja, a bočna sila \vec{F}_S što veća. [1]

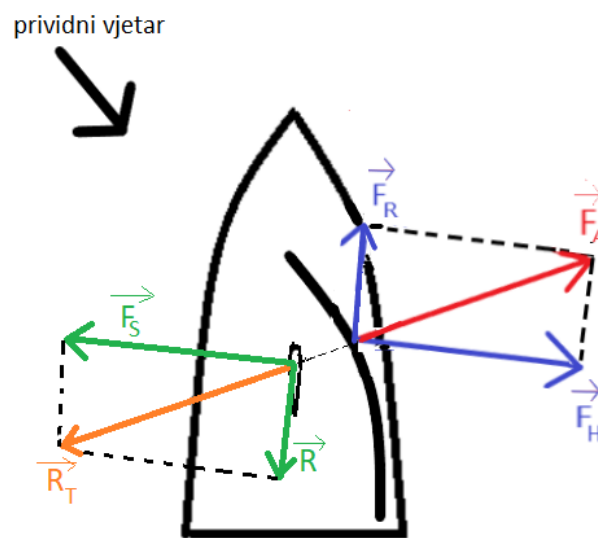


Slika 17. Ukupna hidrodinamička sila i njene komponente.

3.6 Odnos aerodinamičkih i hidrodinamičkih sila

Bočna sila \vec{F}_S je istog smjera, a suprotne orijentacije od sile nagibanja \vec{F}_H . Kako sila \vec{F}_H naginje jedrilicu, sila \vec{F}_S je ispravlja. Sila otpora \vec{R} je istog smjera, a suprotne orijentacije od sile poriva \vec{F}_R . Sila poriva vuče jedrilicu naprijed, a sila otpora je usporava. Ako su sile u parovima \vec{F}_S i \vec{F}_H te \vec{R} i \vec{F}_R po iznosu jednake, onda je ukupna hidrodinamička sila \vec{R}_T istog smjera i po iznosu jednaka ukupnoj aerodinamičkoj sili \vec{F}_A , ali su suprotne orijentacije. [1]

Prvi Newtonov zakon kaže da tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog pravocrtnog gibanja sve dok je rezultantna sila koja djeluje na njega jednaka nuli. Može se reći kako je jedrilica u ravnoteži kada je zbroj ukupne aerodinamičke i hidrodinamičke sile nula (slika 18).



Slika 18. Slučaj kada je jedrilica u ravnoteži.

Kada se brzina vjetra poveća, povećavaju se i aerodinamičke sile. Tada jedrilica ubrzava sve dok se ne postigne nova ravnoteža aerodinamičkih i hidrodinamičkih sila. Vrijedi i obrat, kada se brzina vjetra smanjuje, smanjuju se i aerodinamičke sile te jedrilica usporava sve dok se ne postigne nova ravnoteža aerodinamičkih i hidrodinamičkih sila.

4 Stabilitet jedrilice

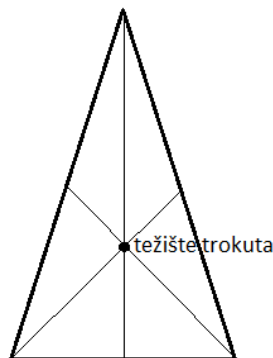
4.1 Centar mase broda, centar plovnosti i centar jedra

Gravitacija djeluje na svaki dio broda, sila uzgona djeluje na cijelu uronjenu površinu broda te vjetar djeluje na cijelu površinu jedra. Međutim, za svaku od tih sila može se razmatrati da djeluju na samo jednu točku. Te točke nazivamo *centar mase broda*, *centar plovnosti* i *centar jedra* [2].

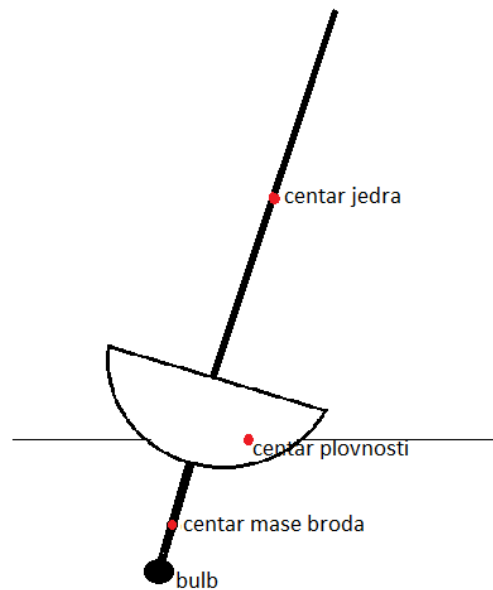
Gravitacijska sila djeluje na centar mase broda silom iznosa Mg gdje je M ukupna masa broda, a $g = 9.81m/s^2$ je gravitacijska konstanta. Kada brod uroni u vodu, on istisne određenu količinu vode. Arhimedov zakon kaže da na tijelo koje je djelomično ili potpuno uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona koja je po iznosu jednaka težini tekućine istisnute zbog uranjanja tijela. Ta sila uzgona djeluje na centar plovnosti. Centar mase broda je fiksiran dok se centar plovnosti pomiče kada se brod naginje. To su centri djelovanja dviju vertikalnih sila na jedrilicu.

Na cijelu jedrilicu djeluju i dvije horizontalne sile. Jedna je navedena aerodinamička sila. Neka je jedro oblika kao jednakokračan trokut. Kada vjetar jednoliko djeluje na sve dijelove jedra, onda se ta sila reprezentira kao sila koja djeluje na jednu točku, a ta točka je težište trokuta (slika 19). S obzirom da jedro nije točno takvog oblika, centar jedra je malo pomaknut. Promjenom postavki jedra, pomiče se i centar jedra.

Druga sila koja djeluje na brod horizontalno je ona kojom voda djeluje na kobilicu. Na velikim brodovima kobilica na dnu ima uteg velike mase, takozvani bulb. Na takvim jedrilicama centar mase broda se nalazi upravo na kobilici (slika 20).



Slika 19. Težište trokuta

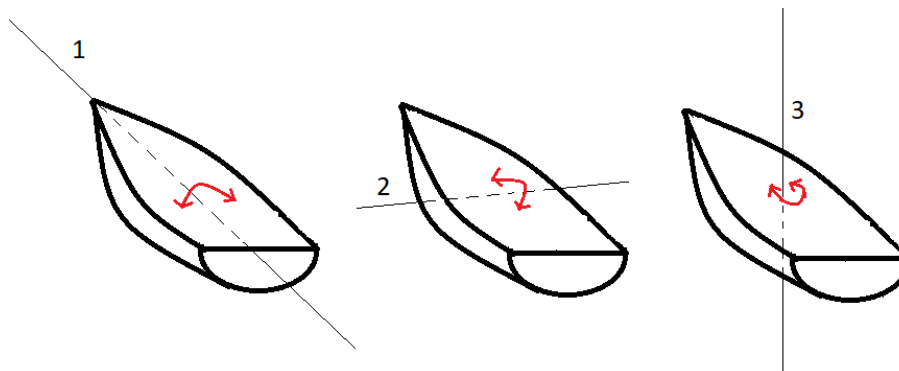


Slika 20. Centar mase broda, centar plovnosti i centar jedra te bulb na kobilici.

4.2 Nagib jedrilice

4.2.1 Jedrenje uz vjetar

Jedrilica se na moru ljulja u raznim smjerovima ovisno o valovima i vjetru. Postoje tri osi oko kojih se jedrilica rotira. Na slici 21 prva os prolazi uzdužno jedrilicom od pramca prema krmu te se brod oko nje ljulja s jednog boka na drugi. Druga os okomita je na prvu os te se oko nje brod ljulja na način da mu se pramac uzdiže ili spušta. Treća os je okomita na prve dvije osi i oko nje se brod rotira na način da mu pramac ide prema lijevo ili prema desno. Sve tri osi prolaze kroz centar mase broda. [2]



Slika 21. Tri osi oko kojih se jedrilica rotira.

Za stabilnost broda važno da je zbroj momenata sila koje djeluju na njega jednak nuli. To se može promatrati u odnosu na sve tri osi. Za primjer, momente sila objasniti ću u odnosu na os koja prolazi uzduž jedrilice (os 1 na slici 21).

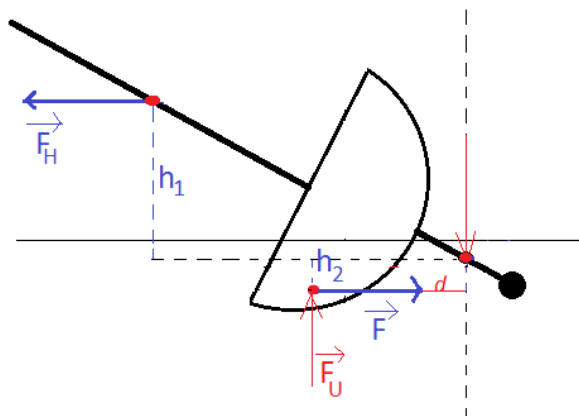
Trup jedrilice u vodi kada ne jedri izložen je samo silama gravitacije i uzgona. Centar mase broda i centar plovnosti tada se nalaze jedan iznad drugoga. Tada su sile gravitacije i uzgona jednakog iznosa i suprotne orijentacije, a kako se nalaze u vertikali, poništavaju se.

Momenti navedenih sila važni su kada brod jedri i kada se nagnje jer im se tada hvatišta sila razilaze, tj. njihova horizontalna udaljenost iznosi d . Međutim, tada u obzir moramo uzeti i silu nagibanja \vec{F}_H koja nagnje jedrilicu te hidrodinamičku silu \vec{F} kojom more djeluje na uronjeni dio trupa, tj. na centar plovnosti i sprječava jedrilicu da se giba bočno (slika 22). Dakle, stabilnost broda određena je trima momentima koji se računaju u odnosu na centar mase. [2]

Moment $\vec{\tau}_1$ sile nagibanja jednak je $\vec{\tau}_1 = \vec{F}_H \times \vec{h}_1$ gdje je h_1 vertikalna udaljenost hvatišta sile \vec{F}_H , što je centar jedra i centra mase broda. U skalarnom obliku $\tau_1 = -F_H \cdot h_1$ [2].

Moment $\vec{\tau}_2$ sile \vec{F} jednak je $\vec{\tau}_2 = \vec{F} \times \vec{h}_2$ gdje je h_2 vertikalna udaljenost hvatišta sile \vec{F} , što je centar plovnosti i centra mase broda. U skalarnom obliku $\tau_2 = -F \cdot h_2$ [2].

Moment $\vec{\tau}_3$ sile uzgona \vec{F}_U jednak je $\vec{\tau}_3 = \vec{F}_U \times \vec{d}$ gdje je d horizontalna udaljenost između centra mase broda i centra plovnosti. U skalarnom obliku $\tau_3 = F_U \cdot d$ [2].

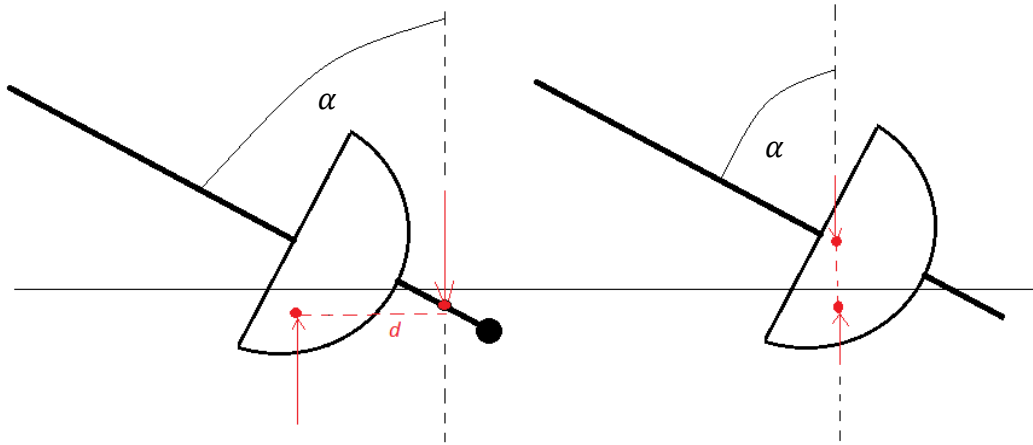


Slika 22. Sile čiji momenti su važni pri rotaciji oko osi koja prolazi uzduž jedrilice. (Uobičajeno je vektor gravitacijske sile crtati tako da početak vektora ide iz centra mase, no zbog preglednosti vektor je nacrtan tako da je njegov kraj u centru mase. Analogno vrijedi i za silu uzgona koja djeluje na centar plovnosti.)

Jedrilica će biti stabilna ako je $\vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \vec{\tau}_3 = \vec{0}$.

Ovdje do izražaja dolazi važnost bulba na kobilici. Na slici 23 nalaze se brod koji ima bulb te brod koji ga nema pa mu se centar mase broda nalazi na trupu. Brodovi su nagnuti pod nekim kutem α s obzirom na uspravan položaj jedrilice. Razmatrani su centar mase broda i centar plovnosti. Na jedrilici bez bulba horizontalna udaljenost d između tih dvaju centara za neki kut α bude nula jer se nađu jedan iznad drugoga. U tom trenutku moment sile uzgona također je jednak nuli. Dakle ne postoji moment koji bi vratio jedrilicu u uspravni položaj. Iz tog razloga brod bez bulba je na granici nestabilnosti.

Jedrilica koja ima bulb na kobilici ne može se prevrnuti. Koliki god kut α bio, uvijek će postojati moment sile koji će jedrilicu vraćati u uspravan položaj. Udaljenost d se u tom slučaju nagnjanjem broda samo povećava. Dakle, moment sile uzgona koji djeluje na centar plovnosti dovoljan je da spriječi brod od prevrtanja. [2]



Slika 23. Brod s bulbom i brod bez bulba te njihovi centri mase broda i centri plovnosti. (Crtanje gravitacijske sile i sile uzgona kao na slici 22.)

Pri izgradnji jedrilice i izradi jedara za nju promatraju se upravo navedeni centri i sile iz razloga da se onemogući prevrtanje jedrilice čak i po najekstremnijim uvjetima.

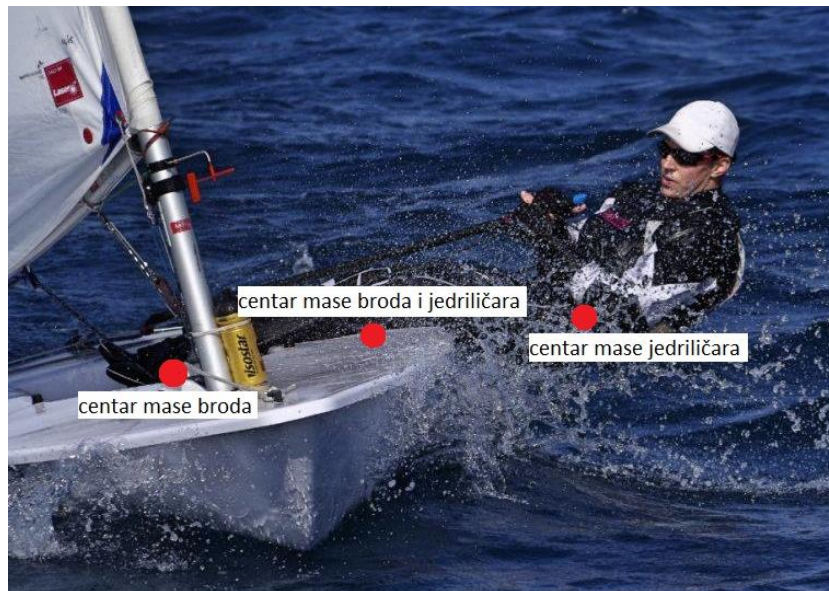
Male jedrilice kao npr. olimpijske klase Laser, Finn ili 470 nemaju bulbove na kobilicama pa nije rijetkost da se takve jedrilice prevrnu. No kada je jedrilica prevrnutu i jedriličar djeluje svojom težinom na kobilicu, on je uspije vratiti u uspravan položaj (slika 24).



Slika 24. Povratak izvrnute jedrilice (Laser) u uspravni položaj. (slika preuzeta s <https://hiveminer.com/Tags/capsize%2Claser> [5])

Kada je vjetar dovoljno jak da postoji mogućnost od prevrtanja, jedriličari imaju dva načina da smanje mogućnost istog. Mogu smanjiti iznos ukupne aerodinamičke sile na jedro na način da promijene njegove postavke ili mogu svojim tijelom i svojim centrom mase djelovati na

jedrilicu te je ravnati na taj način. Na slici 25 je primjer jedriličara u olimpijskoj klasi Laser. On noge zakači za traku unutar broda te svoje tijelo izbaci van broda što je više moguće. Na taj način jedriličar pomiče svoj centar mase što je moguće dalje od centra mase broda. Tada možemo jedrilicu i jedriličara promatrati kao jedno tijelo pa je njihov zajednički centar mase pomaknut na način da je veća horizontalna udaljenost tog centra mase od centra jedra.

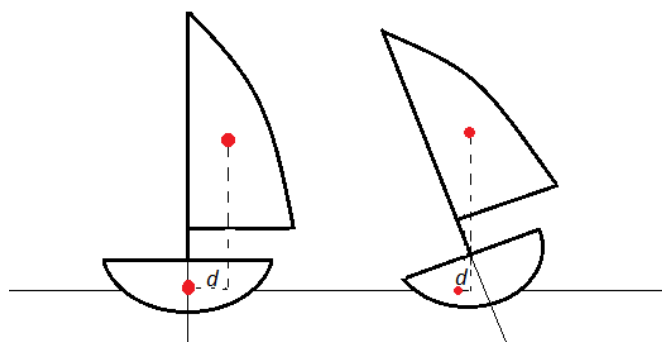


Slika 25. Jedriličar pomiče centar mase svojim tijelom (fotografirao Tonči Antunović, uzeto s dozvolom).

Promjenom nagiba jedrilice mijenja se oblik površine trupa koja je u kontaktu s vodom čime se mijenja učinkovitost trupa. Većina manjih brodova kao što su olimpijske klase Laser, Finn ili 470 su konstruirani tako da pružaju najmanji otpor kada su uspravni. Te jedrilice su široke i pliće. Nagibanje ima manji utjecaj na gubitak brzine kod jedrilica s užim i dubljim trupovima zato što se tada uronjeni dio ne mijenja znatno pri nagibanju. [1]

4.2.2 Jedrenje niz vjetar

Osim na kobilicu, hidrodinamičke sile djeluju i na kormilo. To najviše dolazi do izražaja pri jedrenju niz vjetar. Na slici 26 su dvije jedrilice koje jedre niz vjetar. Lijeva jedrilica je uspravna, a desna je nagnuta na privjetrinsku stranu.



Slika 26. Centar plovnosti i centar jedra kod ravnog i nagnutog broda pri jedrenju niz vjetar

Sada ćemo proučiti rotaciju jedrilice oko osi 3 sa slike 21, tj. slučaj kada pramac ide lijevo ili desno.

Na uspravnoj jedrilici centar jedra i centar plovnosti nalaze se na horizontalnoj udaljenosti d . Centar mase broda nalazi se iznad centra plovnosti. Moment sile koja djeluje na centar jedra je u ovom slučaju velik zbog udaljenosti d . Da bi brod jedrio ravno, kormilo mora biti zakrenuto tako da se na njemu također stvori sila čiji će moment poništiti moment sile koja djeluje na centar jedra. U tom slučaju kormilo stvara veliki otpor zbog nestrujavanja vode pod kutom. Kada bi kormilo bilo ravno, otpor bi bio minimalan, ali moment sile u centru jedra bi skretao jedrilicu. [2]

Na desnoj, nagnutoj jedrilici, horizontalna udaljenost između centra jedra i centra plovnosti je manja. Tada je moment sile koja djeluje na centar jedra manji, pa nije potrebno zakrenuti kormilo kao kada je jedrilica uspravna. Time je i otpor mora na kormilu manji. Iz tog razloga je pri jedrenju niz vjetar dobro nagnuti brod na privjetrinsku stranu. [2]

5 Postavke jedra pri jedrenju uz vjetar

5.1 Uvod

Pri jedrenju niz vjetar, postavke jedra ne igraju veliku ulogu koliko sposobnost jedriličara. Poželjno je da kormilar brodom upravlja na način da ga valovi guraju i da time postigne maksimalnu brzinu broda. Pri jedrenju uz vjetar postavke jedra igraju veliku ulogu te je uz sposobnost jedriličara to drugi najvažniji faktor pri ostvarenju maksimalne brzine broda.

Ranije je objašnjeno što je prividni vjetar pri jedrenju uz vjetar. Jedrilica je konstruirana da prati promjene u prividnom vjetru, a ne u pravom. Neprekidno prilagođavanje jedra prema smjeru vjetra omogućuje maksimalno izvlačenje svih svojstava jedrilice. Zbog toga svi regatni jedriličari prate i najmanje promjene u smjeru i jačini puhanja vjetra.

Osim što je svojim prednjim rubom jedro pričvršćeno za jarbol, svojim donjim rubom pričvršćeno je za lantinu ili bum (slika 27).

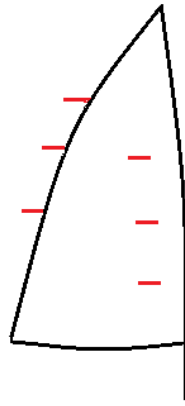


*Slika 27. Lantina i jarbol na olimpijskoj klasi Laser Radial
(fotografirao Goran Martinović, uzeto s dozvolom).*

5.2 Pokazivači protoka vjetra uz jedro

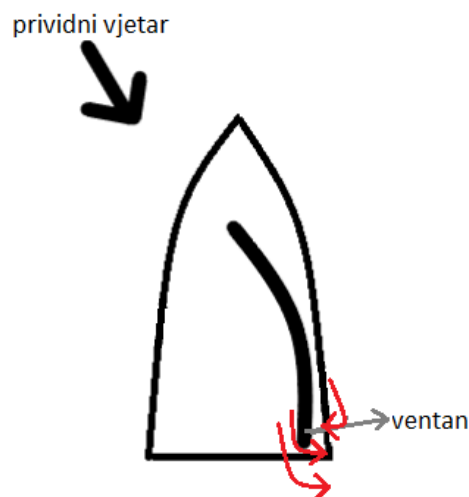
Postavke jedra moraju biti takve da se održi strujanje zraka s obje strane jedra te da bude najveća razlika u tlakovima.

Najbolji način provjere ispravnog strujanja zraka oko jedra je postavljanje pokazivača protoka vjetra. To obično bude komadić vune dugačak 10-ak centimetara s jednim krajem zalijepljenim na jedro. Pokazivači se postavljaju s obje strane jedra na isto mjesto. Ako je jedro dobro postavljeno, pokazivači lepršaju paralelno, a ako se strujanje zraka s jedne strane poremeti, pokazivači na toj strani odmah počinju lepršati dalje od površine platna. Pokazivači se postavljaju u blizini jarbola tako da pokazuju dobro strujanje zraka pri dolasku na površinu jedra te na sami kraj jedra gdje pokazuju pravilno strujanje zraka pri izlasku s površine jedra (slika 28).



Slika 28. Crvenom bojom su označeni pokazivači strujanja vjetra na jedru.

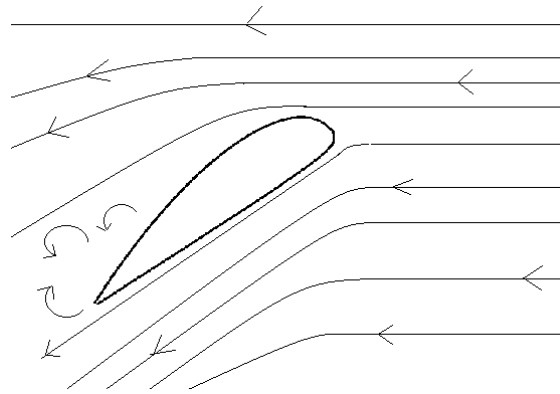
Stražnji dio jedra naziva se ventan te je jako bitno da pokazivači strujanja vjetra na tom dijelu jedra lepršaju u produžetku jedra. Ako se ti pokazivači sakriju iza jedra, to znači da se na kraju jedra stvaraju virovi (turbulencije), tj. da vjetar nepravilno struji (slika 29). U tom slučaju kaže se da je jedro zatvoreno, a kada pokazivači lepršaju u produžetku jedra kaže se da je jedro otvoreno.



Slika 29. Crvenom bojom označeni su virovi koji nastanu ako je ventan zatvoren.

5.2.1 Turbulencije na avionskom krilu

I ovdje se može povući analogija s krilom aviona. Što je veći nagib krila s obzirom na smjer nastrojavanja zraka bit će veća sila uzgona. U idealnim uvjetima zrak bi po gornjoj i po donjoj strani krila strujao priljubljen uz samo krilo, ali u stvarnim uvjetima događa se pojava koja se zove „odvajanje“. Odvajanje se događa na stražnjem dijelu gornje strane profila zbog pada tlaka u tom području. Ukoliko se krilo postavi pod prevelikim kutom u odnosu na smjer strujanja zraka javiti će se takozvana „zavjetrina“ u tom stražnjem gornjem području i tamo će se pojaviti virovi, tj. turbulencije (slika 30). Te turbulencije će uzrokovati poremećaj u strujanju, vibracije krila i gubitak dijela aerodinamičkog uzgona. Zato postoje zakrilca, da spriječe taj efekt odvajanja. [7]



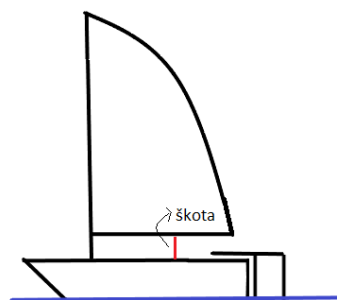
Slika 30. Nastanak turbulencija na stražnjem gornjem dijelu krila kada je prevelik kut krilau odnosu na smjer nastrujavanja zraka.

Porastom brzine sustava (avion ili jedrilica) stvaraju se turbulencije, a njihov početak određen je Reynoldsovim brojem $R = \frac{Lv\rho}{\mu}$ (4) gdje je v brzina fluida koji nailazi na sustav, μ je viskoznost fluida, ρ njegova gustoća, a L je karakteristična duljina sustava (krila, jedra, dimenzija broda, kobilice). Preuređenjem faktora u jednadžbi (4) na način da je $R = \frac{v\rho}{\frac{\mu}{L}}$ možemo reći da je R omjer inercijalnih sila ($v\rho$) i viskoznih sila (μ/L). Turbulencija tipično nastaje kada R prijeđe vrijednost 10^6 . [9]

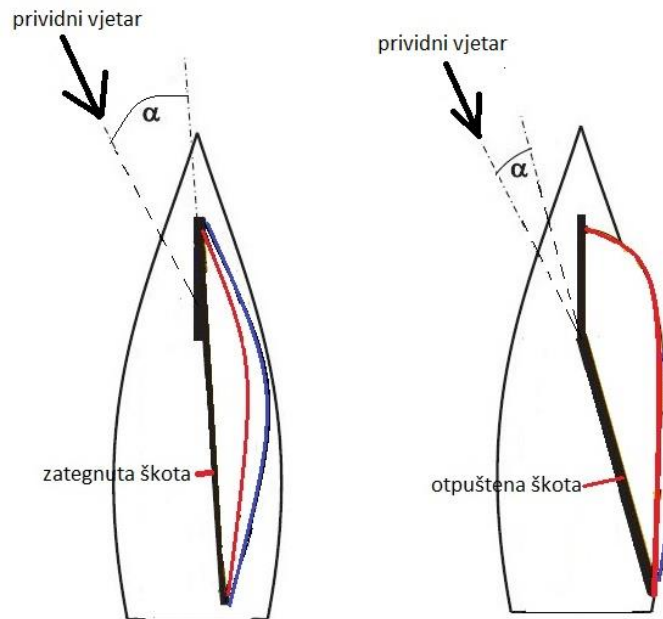
5.3 Kontrole za postavke jedra

Kako će jedriličar namjestiti jedro ovisi o smjeru i jačini vjetra. Ključni faktor pri namještanju jedra je upadni kut vjetra jer je to najvažnija komponenta u stvaranju aerodinamičke sile u jedru. Dublja jedra generiraju veću silu što je pogodno za slabe vjetrove, a plića jedra manju aerodinamičku silu što je pogodno za jače vjetrove.

Postoji nekoliko kontrola kojima se postiže željeni oblik jedra. Osnovna kontrola je konop koji nazivamo škota (slika 31). Pritezanjem škote povlačimo lantinu prema sredini broda. Tada se upadni kut vjetra poveća pa se poveća i aerodinamička sila, a popuštanjem škote smanjuje se upadni kut vjetra pa se smanjuje i aerodinamička sila. Iz tog razloga jedriličari popuštaju škotu kada im vjetar naginje jedrilicu. Sila u jedru bi bila najveća kada bi vjetar na jedro dolazio pod pravim kutem. Pritezanjem škote mijenja se i izvijenost zadnjeg ruba jedra, tj. zatvara se ventan jer se jedro pritezanjem škote rastegne (slika 32). [1]

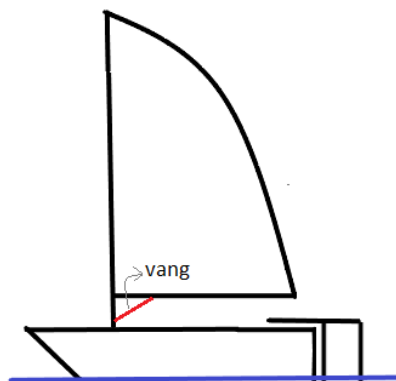


Slika 31. Crvenom bojom označena je škota.

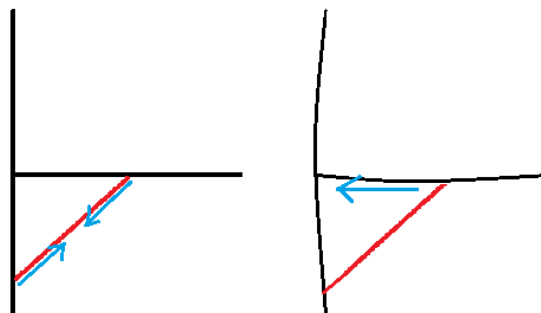


Slika 32. Crvenom bojom označen je stražnji porub jedra (ventan). Kada je zategnuta škota, upadni kut vjetra je veći i ventan je zatvoreniji dok je u slučaju kada je škota otpuštena upadni kut vjetra u jedro manji i ventan je otvoren.

Vang je kontrola koja najviše djeluje na oblik donjeg dijela jedra (slika 33). Pritezanjem vanga spušta se lantina prema dolje i približava se jarbolu te se kao rezultat toga savija donji dio jarbola prema naprijed (slika 34). Na taj se način smanjuje dubina jedra. [1]



Slika 33. Crvenom bojom označen je vang.



Slika 34. Pritezanje vanga rezultira tako što lantina gura donji dio jarbola prema naprijed.

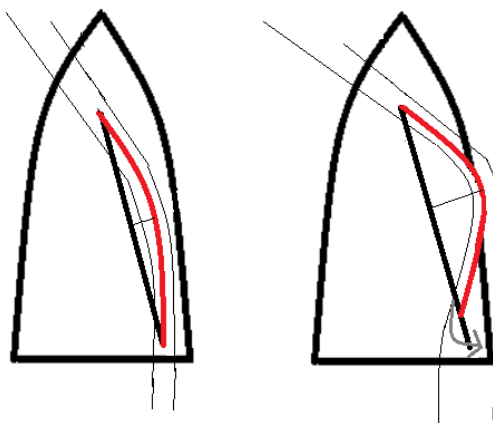


Slika 35. Preotpušteno i preotvoreno jedro ne postiže maksimalan učinak.

Kada aerodinamička sila postane prevelika te škota više ne povlači lantinu prema dolje jer ju je potrebno popustiti da se smanji aerodinamička sila, tada se vang priteže da se spusti lantina. U protivnom bi se popuštanjem škote lantina previše dignula i ventan bi se previše otvorio. [1]

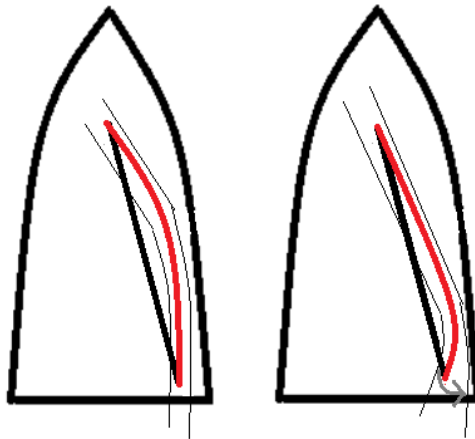
Kao što nije dobro da je ventan zatvoren zbog nastanka turbulencija, nije dobro ni da je previše otvoren jer tada jedro ne iskorištava protok zraka u potpunosti. Ako je jedro previše pušteno i otvoreno, vjetar na njega nailazi pod premalim kutem. Tada nema razlike u protoku zraka s privjetrinske i zavjetrinske strane pa nema ni razlike u tlakovima (slika 35).

Rub jedra koji je pričvršćen za lantinu naziva se baza. Pritezanjem jedra po bazi dubina u donjem dijelu jedra postaje manja te se na taj način smanjuje aerodinamička sila u jedru. Pri jedrenju uz vjetar, cilj pritezanja jedra po bazi je postizanje što bolje aerodinamičke forme. [1] Kada bi jedro bilo preduboko, protok vjetra kroz jedro ne bi bio pravilan. Na slici 36 lijeva jedrilica ima pritegnuto jedro po bazi i pliće je, a desna jedrilica ima otpušteno jedro po bazi i dublje je. Protok jedra na lijevoj jedrilici je pravilan, dok se na desnoj jedrilici stvaraju virovi jer vjetar ne može strujati priljubljeno uz jedro, ne može toliko „skrenuti“.



Slika 36. Jedrilica sa zategnutim jedrom po bazi i s otpuštenim jedrom po bazi.

Posljednja bitna postavka jedra je podigač jedra. Njime se rasteže ili popušta rub jedra uz jarbol te se na taj način mijenja položaj najveće dubine jedra. Položaj najveće dubine nije toliko značajan za aerodinamičku silu jedra, no značajan je za smanjenje otpora jedra. Kada vjetar jača, zbog sve većeg pritiska zraka na jedro, dubina jedra se pomiče prema natrag (slika 37). Tada stražnji dio jedra stvara veliki otpor jer nije pogodno strujanje vjetra, stvaraju se virovi. Pritezanjem jedra po jarbolu, položaj najveće dubine vraća se prema naprijed. [1]



Slika 37. Lijeva jedrilica ima pravilan oblik jedra, dok je na desnoj jedrilici zbog prevelikog vjetra, dubina pomaknuta prema natrag. Pritezanjem jedra uz jarbol dubina jedra se vraća prema naprijed.

6 Zaključak

Jedrenje je veoma opširno i ovisi o mnogo faktora, o vjetru te njegovim promjenama u jačini i smjeru, o valovima, o morskim strujama itd. Ovim radom pokušala sam sažeti samo najvažnije utjecaje zraka i vode na gibanje i brzinu jedrilice. Pokušala sam to iznijeti na što jednostavniji način da jedriličarski laici mogu shvatiti zašto se jedrilica kreće.

Za naučiti jedriti nije dovoljno samo razumjeti navedene zakonitosti hidrodinamike, aerodinamike i trima jedra. Sigurno da poznavanje tih zakonitosti uvelike pomaže u razumijevanju jedrenja i načina na koji se izvlači maksimalan učinak trupa i jedara. Dobar jedriličar mora poznavati sve navedene zakone fizike koji utječu na jedrilicu, ali samo to ne bi ga učinilo dobrim jedriličarom. Koliko god čovjek teorije poznao, dobrog jedriličara ipak čini jako puno prakse i veliki broj sati provedenih na moru.

Osim što se ogromna pažnja pridaje obliku i postavkama jedara o kojima sam govorila, postoji veliki broj istraživanja o tome koji oblici trupa su najpogodniji za pojedine vremenske uvjete. Kakav brod će biti najbrži po velikim ili malim valovima, po jakom ili slabom vjetru. U te izračune ulaze duljina, širina i masa broda, površina trupa koji se nalazi u moru kada je brod ravan i kada je brod nagnut, duljina i težina kobilice te još jako puno faktora. Također je bitno koja duljina jarbola i površina jedara je idealna za pojedinu vrstu broda. Velika pažnja pridaje se i materijalu od kojeg su izrađeni jarbol i jedra. Svaki segment proizvodnje broda je zasebna znanost.

Međutim, uz sva istraživanja i izračune, najbolji pokazatelj kvalitete jedrilice je ipak kada jedriličar digne jedra i zaplovi.

7 Literatura

- [1] Stjepan Vitaljić, *Biti brži*, Recom, Zagreb, 2005.
- [2] John Kimball, *Physics of sailing*, CRC Press, Boca Raton, Florida, SAD, 2010.
- [3] Ecos pilot school, URL: <https://www.ecos-psa.hr/krila-aviona/> (15.9.2019.)
- [4] Raymond A. Serway, John W. Jewett, *Principles of Physics, 3rd edition*, Brooks/Cole, 2001.
- [5] The world's best photos of capsized and laser, URL: <https://hiveminer.com/Tags/capsized%2Claser> (15.9.2019.)
- [6] Wally Class Trophy – North Sails, Nico Martinez, URL: <https://www.northsails.com/sailing/en/2018/10/wally-class-trophy> (15.9.2019.)
- [7] Navigation Spot, URL: <http://infomarina.hr/Default.aspx?tabid=81&error=Multiple+controls+with+the+same+ID+%27ScriptManager%27+were+found.+FindControl+requires+that+controls+have+unique+IDs.&content=07> (15.9.2019.)
- [8] Navigation Spot, URL: <http://infomarina.hr/navigacija/jedrenje/fizikajedrenja3/tabid/83/Default.aspx> (15.9.2019.)
- [9] Bryon D. Anderson, *Physics Today* **61**, 2, 38 (2008)
- [10] Bryon D. Anderson, *Physics Today* **61**, 9, 8 (2008)
- [11] NASA, URL: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bernnew.html> (15.9.2019.)
- [12] Wolfgang Püschl, *Eur. J. Phys.* **39**, 04400 (2018).