



Vedran Jelavić*
Nikša Koboević**

ISSN 0469 - 6255
(221-226)

TEORIJA UZGONA JEDRA THEORY OF LIFT ON SAIL

UDK 929.125.1

Stručni rad
Professional paper

Sažetak

Mnogi jedriličari amateri, a i profesionalni skiperi, ne znaju točno što uzrokuje silu uzgona jedara. Razumijevanje nastanka sile uzgona nužno je za pravilno ugađanje jedara i upravljanje jedrilicom. U većini se literature sila uzgona na jedrima objašnjava strujanjem oko krila aviona. Presjek krila aviona ima punoću i oblik dok je presjek jedra tanka membrana. Ta razlika u geometrijskom obliku je očita.

Ranije očito pojednostavljene teorije uzgona glasile su otprilike ovako: presjek krila je asimetričan i put strujnica s gornje strane profila je duži od puta s donje strane profila. Asimetrija profila prema Bernoulliju uzrokuje razliku brzina strujanja i tlakova s obje strane profila. Podtlak na gornjoj i predtlak na donjoj strani profila dovode do uzgona. Ovakva teorija nije prihvatljiva za jedro, jer je strujanje zraka oko jedra bitno drugačije.

Na početku je strujanje oko jedra paralelno, ali se vrlo brzo na izlaznom porubu formira vrtlog zraka koji zovemo POČETNI VRTLOG. Početni vrtlog pokreće CIRKULACIJU oko jedra, odvaja se i nestaje. Cirkulacija oko jedra ostaje i superpozicijom paralelnog strujanja i cirkulacije dolazi do veće brzine strujanja sa gornje strane, i manje brzine strujanja sa donje strane jedra. Ta razlika brzina uzrokuje razliku tlakova i uzgon na jedru.

Ovu teoriju uzgona razvili su fizičari KUTTA i JOUKOWSKI.

Ključne riječi: paralelno strujanje, početni vrtlog, cirkulacija, točke stagnacije, viskozitet fluida, uzgon

Summary

Many yachtsmen amateurs and professional skippers don't know exactly what causes the force of lift on

sails. The comprehension of the occurrence of the force of lift is essential for proper adjustment of sails and the handling of sailing boat. The majority of sources explains the force of lift on sails by streaming round the planes of an aeroplane. The section of the plane of an aeroplane has certain volume and shape whereas the section of the sail is a thin membrane. The difference in geometrical shape is obvious.

Former, simplified theories of lift have roughly explained that the section of the plane is asymmetric and that the path of the streaming lines on the upper part of the profile is longer than the path on the lower part of the profile. The asymmetry of the profile according to Bernoulli causes differences of the velocity of the streaming and the pressure on both sides of the profile. Positive pressure on the upper side and negative pressure on the lower side of the profile cause lift. This theory is not acceptable for the sail because the streaming of the air round the sail is quite different.

At the beginning, the streaming round the sail is parallel but very soon, on the exit edge the vortex of air is formed which is called STARTING VORTEX. The starting vortex causes circulation round sails, it is separated and it vanishes. The circulation round sails remains and by superposition of parallel streaming and circulation the quicker circulation occurs on the upper part and lower speeds of streaming on the lower part of the sail. The difference in speeds causes differences in pressures and lift on sail. This theory has been developed by physicist KUTTA and JOUKOWSKI.

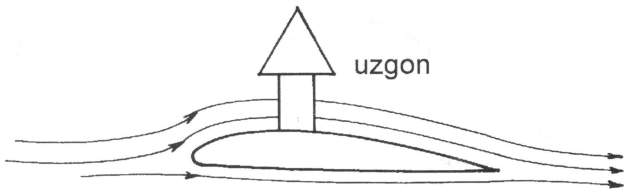
Key words: parallel streaming, starting vortex, circulation points of stagnation, viscosity of fluid, lift.

1. Uvod Introduction

Za uspješno voziti automobil nije potrebno poznavati toplinski proces koji se odvija u cilindru motora, ali za uspješno upravljati jedrilicom potrebno je shvatiti bit aerodinamičkog procesa koji nastaje oko jedra. Neke od ranijih (pojednostavljenih) teorija jedrenja za primjer uzimaju asimetričan aerodinamički profil (presjek krila aviona, sl. 1).

* mr. sci. Vedran Jelavić
Veleučilište u Dubrovniku, Dubrovnik

** Nikša Koboević, dipl. ing
Veleučilište u Dubrovniku, Dubrovnik



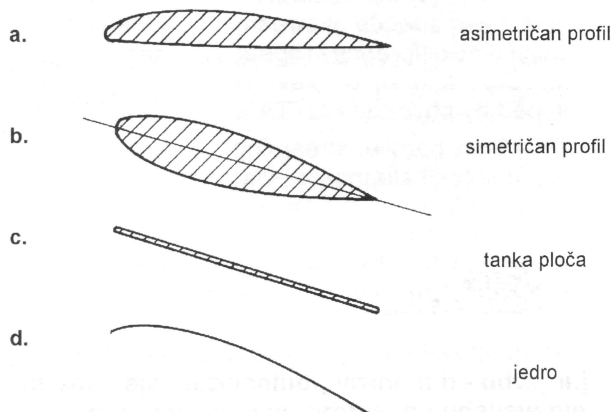
Slika 1. Nastajanje uzgona na asimetričnom profilu
Figure 1. The occurrence of lift on asymmetrical profile

Uzgon na ovakvom profilu objašnjava se na slijedeći način: Strujanjem zraka oko profila strujnice s donje strane profila imaju kraći put od strujnica s gornje strane. Zbog duljeg puta strujnice s gornje strane povećavaju brzinu da bi stigle na kraj profila u isto vrijeme kad i strujnice s donje strane. Razlika brzina prema Bernoulliju uzrokuje razlike u tlakovima, tj. podtlak na gornjoj i predtlak na donjoj strani profila. Razlika tlakova rezultira silom uzgona na gornjoj strani profila koja je okomita na smjer strujanja.

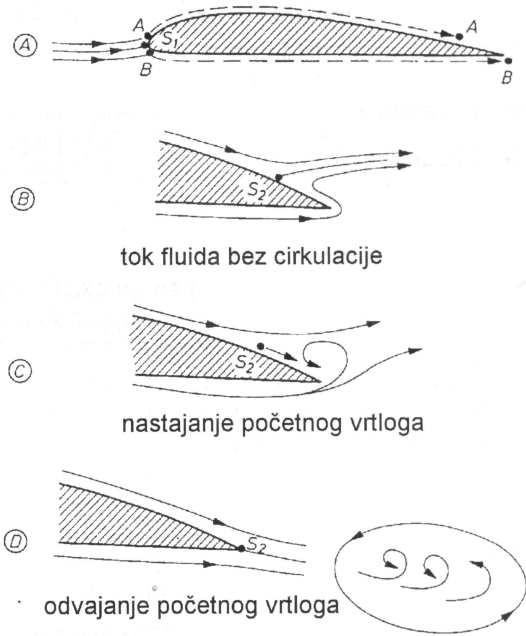
Međutim, ova je teorija neprihvatljiva za strujanja oko jedra i to iz niza razloga. Odmah se uočava razlika u oblicima profila i jedra. Profil ima poprečni presjek odgovarajuće punoće i oblika koji, ako je asimetričan, čini stazu s jedne strane duljom od one s druge strane. Presjek jedra je vrlo tanka membrana jednake duljine s obje strane - privjetrinske i zavjetrinske.

Teorija uzgona jedra znatno je kompleksnija od ranije spomenute. Za njeno objašnjenje potrebno je točno utvrditi karakteristike strujanja uz jedro kao i okolno strujanje. Takav opis i objašnjenje prikladno je početi od asimetričnog aerodinamičkog profila (sl. 2-a) kakvim se je služila ranije pojednostavljena teorija, te postupno preko simetričnog profila (sl. 2-b) i ravne tanke ploče (sl. 2-c) doći do profila jedra (sl. 2-d).

Ovakav pristup određen je činjenicom da su osnovni zakoni i teoremi mehanike fluida otkriveni i objašnjeni



Slika 2. Aerodinamički profili upotrebljeni u pokusima
Figure 2. Aerodynamic profiles used in experiments



Slika 3. Strujanje oko asimetričnog profila i nastajanje početnog vrtloga
Figure 3. Streaming around asymmetrical profile and the occurrence of starting vortex

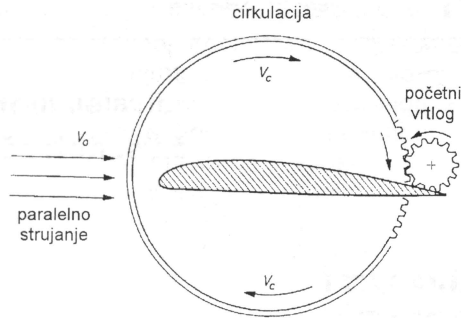
obično na aerodinamičkim profilima. Sličnost između oblika nekih aerodinamičkih profila i jedra postoji, pa je moguće primijeniti i na jedra zakone mehanike fluida i stečena iskustva na profilima. Danas je to znatno olakšano simulacijom na računalima i pokusima u zračnim tunelima, a upravo tako su tretirani primjeri u tekstu.

2. Strujanje oko asimetričnog profila
Streaming around asymmetric profile

Na fluidu koji jednoliko paralelno struji oko asimetričnog profila definirane su dvije čestice A i B - iznad i ispod točke zastoja S_1 . Budući da je brzina strujanja čestica jednaka, a put čestice B, koja struji donjom površinom profila, kraći, čestica B dolazi na kraj profila prije čestice A koja struji gornjom stranom



Fotografija 1. Početak strujanja oko profila prije nastanka cirkulacije
Photography 1. The beginning of the streaming around the profile before the occurrence of circulation



Slika 4. Mehanička analogija početnog vrtloga i cirkulacije

Figure 4. Mechanical analogy of starting vortex and circulation

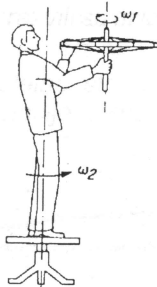
i ima dulji put. Čestica B obilazi oko oštrog izlaznog ruba, penje se uz profil do nešto ispred druge točke zastoja S_2 i dalje nastavlja strujati paralelno sa strujnicama koje su se kretale s gornje strane profila (sl.3-B).

Ovakvo strujanje moglo bi se održati u idealnom fluidu bez trenja. U realnom fluidu uz stjenku profila javljaju se sile viskoziteta koje pogoduju nastanku vrtloga i turbulencija.

Vizualizacijom strujanja (fotografija 1) uočljive su oštre promjene smjera strujanja oko donjeg ruba profila, koje na tom mjestu uzrokuju povećanje brzina, sila inercije i viskoziteta, pa je takvo strujanje neodrživo za neko dulje vrijeme. Zbog toga ubrzo nakon skretanja fluida oko donjeg ruba profila dolazi do pojave vrtloženja fluida, klizanja vrtloga niz rub profila i njegovog odvajanja od profila i druge točke zastoja S_2 . Pomicanjem vrtloga prema kraju profila pomiče se i točka zastoja S_2 na sam kraj profila.

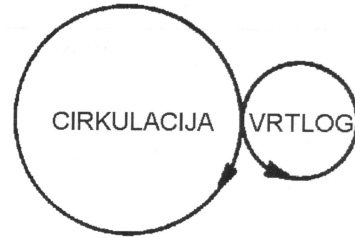
Nastao je fenomen koji se naziva **početni vrtlog** (eng. Starting vortex).

Posljedica početnog vrtloga je proturotacija fluida oko profila u suprotnom smjeru. Proturotacija fluida nastaje zbog viskoziteta strujnica zahvaćenih vrtlogom. Kutna brzina rotacije se povećava, strujnice skreću i potiču na kružno strujanje oko profila druge nadolazeće strujnice. Ovaj fenomen može se vjerno



Slika 5. Kružno gibanje čovjeka i okretnog diska na postolju

Figure 5. Circular movement of a man and rotating wheel on the base



Slika 5a. Cirkulacija i vrtlog
Figure 5a. Circulation and vortex

predočiti sličnom mehaničkom analogijom - rotacijom malog zupčanika koji pokreće veći zupčanik (sl. 4).

Kružno strujanje fluida oko profila, koje se javlja kao reakcija na nastajanje vrtloga i suprotno je usmjereno, zove se **cirkulacija**. Pojavi cirkulacije ide u prilog i Newtonov zakon akcije i reakcije primjenjen na kružna gibanja predočena na slici (sl. 5).

Čovjek stoji na okretnom postolju i jednom rukom drži osovinu diska, a drugom pokreće disk koji rotira (akcija). Ako se trenje u ležaju zanemari, čovjek rotira skupa s postoljem u suprotnom smjeru kao reakcija na rotaciju diska. Ravnoteža takvog kružnog gibanja uspostaviti će se kada se veličine $I_1 \omega_1$ i $I_2 \omega_2$ izjednače:

- I_1 - moment inercije diska
- I_2 - moment inercije čovjeka
- ω_1 - kutna brzina diska
- ω_2 - kutna brzina čovjeka

Iskustvo dinamike fluida pokazuje da jedan vrtlog ne može postojati sam, da se vrtlozi javljaju u parovima i da im je ukupna cirkulacija jednaka nuli. Prema tome, nastajanje cirkulacije potaknute početnim vrtlogom je logično i izvjesno, intenziteti su im jednaki, a smjerovi suprotni.

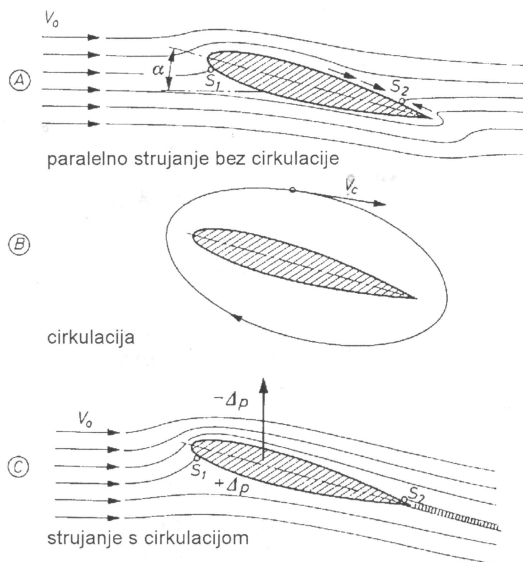
$$\Gamma_c = -\Gamma_v \tag{1}$$

Daljnijim strujanjem nastali početni vrtlog će se izgubiti, a cirkulacija oko profila će ostati. Energiju za održavanje cirkulacije će namicati nove mase fluida koji nadolaze.

3. Strujanje oko simetričnog profila Streaming around symmetrical profile

Postavi li se simetričan profil paralelno sa strujom fluida - fluid će glatko otjecati niz profil. Pojaviti će se otvor (trenja i oblika), ali ne i uzgon.

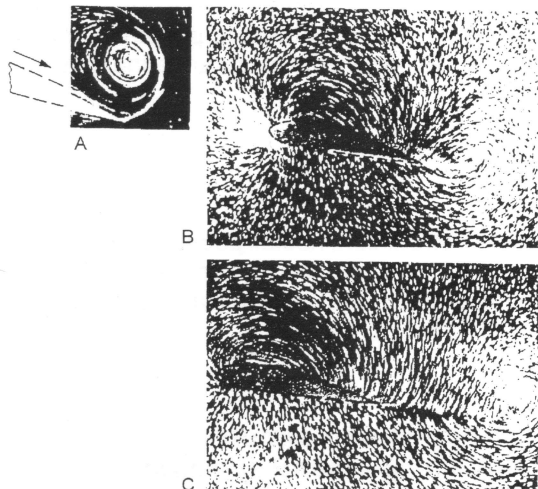
Da bi se dobilo različito strujanje fluida oko gornje i donje površine simetričnog profila ovaj se mora zakrenuti u odnosu na smjer paralelnih strujnica koje nailaze jednolikom brzinom (sl.6.).



Slika 6. Strujanje oko simetričnog profila i nastajanje cirkulacije
Figure 6. Streaming around symmetrical profile and the occurrence of circulation

Zakretanjem profila za kut α u odnosu na struju fluida, početno strujanje je identično ranije opisanom oko asimetričnog profila (sl. 3-a, b, c, d). Takvo strujanje oko oštrog ruba će trajati vrlo kratko i prestati čim se pojave sile viskoziteta. Nakon toga nastaje vrtlog koji potiče cirkulaciju oko profila (sl.6.). Na fotografiji (2-c) se vidi nastajanje vrtloga, uspostava cirkulacije i odvajanje od profila.

Znakovito je da se uspostavom cirkulacije točka zastoja S_2 pomiče prema kraju profila (sl. 6-c). To znači da više nema razlike u brzinama strujanja na



Fotografija 2. Strujanje sa cirkulacijom
a - nastajanje početnog vrtloga; b - odvajanje početnog vrtloga od profila; c - udaljavanje početnog vrtloga i cirkulacija
Photography 2. Streaming with circulation
a - occurrence of starting vortex, b - separation of starting vortex from profile; c - departure of starting vortex and circulation

gornjoj i donjoj površini na kraju profila, već su brzine strujanja na tom mjestu jednake.

Superpozicijom paralelnog jednolikog strujanja i cirkulacije oko profila brzina strujanja se oko gornje površine povećava (cirkulacija i paralelno jednoliko strujanje jednako su usmjereni), a oko donje površine smanjuje (cirkulacija i paralelno jednoliko strujanje suprotno su usmjereni). Prema Bernulijevom zakonu povećanje brzine prati proporcionalno smanjenje tlaka, a smanjenje brzine proporcionalno povećanje tlaka. Tako će na gornjoj površini profila rasti podtlak, a na donjoj predtlak, što će za rezultat imati stvaranje sile uzgona na profilu. (sl.6-c).

Sila uzgona na profilu proporcionalna je zbroju paralelnog jednolikog strujanja i cirkulacije, što su početkom stoljeća otkrili znanstvenici Kutta i Joukowski. Oni su utvrdili da je nužan uvjet stabilnog strujanja izjednačenje brzina na kraju profila i spuštanje točke zastoja S_2 . U znanosti se ovaj fenomen danas zove Kutta uvjet i kad je taj uvjet zadovoljen sila uzgona se može izračunati formulom:

$$L = \Gamma \rho v_0 b \tag{2}$$

gdje je:

- L - uzgon,
- ρ - gustoća fluida,
- v_0 - brzina paralelnog jednolikog strujanja,
- Γ - cirkulacija fluida,
- b - duljina profila.

$$\Gamma = v_c \cdot 2 \pi r_o = 2 \omega r_o^2 \pi \tag{3}$$

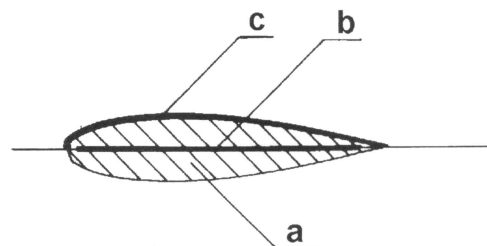
gdje je:

- v_c - obodna brzina cirkulacije fluida,
- r_o - polumjer cirkulacije
- ω - kutna brzina cirkulacije.

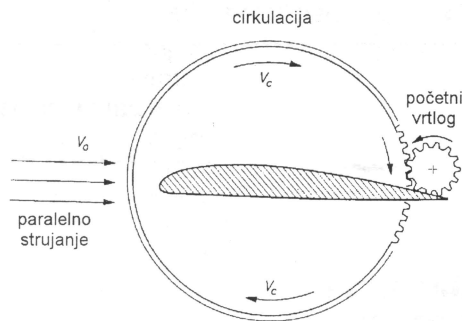
Izraz (2) poznat je kao Kutta-Joukowski teorem uzgona.

Za cilindrični profil veličine u formuli jednostavno je definirati, dok je za aerodinamične profile nešto kompleksnije.

Površina jedra može se usporediti sa simetričnim profilom (sl. 7), jer je tanka površina jedra jednako duga s obje strane (privjetrine i zavjetrine), pa se strujanje oko simetričnog profila (a) može primijeniti i na strujanje oko ravne tanke površine (b), a zakrivljenjem te površine (c) i na jedro.



Slika 7. Gemetrijska sličnost simetričnog profila i jedra
Figure 7. Geometrical similarity of symmetrical profile and sail



Slika 4. Mehanička analogija početnog vrtloga i cirkulacije

Figure 4. Mechanical analogy of starting vortex and circulation

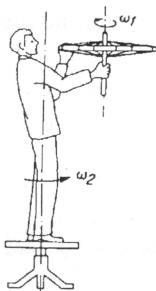
i ima dulji put. Čestica B obilazi oko oštrog izlaznog ruba, penje se uz profil do nešto ispred druge točke zastoja S_2 i dalje nastavlja strujati paralelno sa strujnicama koje su se kretale s gornje strane profila (sl.3-B).

Ovakvo strujanje moglo bi se održati u idealnom fluidu bez trenja. U realnom fluidu uz stjenku profila javljaju se sile viskoziteta koje pogoduju nastanku vrtloga i turbulencija.

Vizualizacijom strujanja (fotografija 1) uočljive su oštre promjene smjera strujanja oko donjeg ruba profila, koje na tom mjestu uzrokuju povećanje brzina, sila inercije i viskoziteta, pa je takvo strujanje neodrživo za neko dulje vrijeme. Zbog toga ubrzo nakon skretanja fluida oko donjeg ruba profila dolazi do pojave vrtloženja fluida, klizanja vrtloga niz rub profila i njegovog odvajanja od profila i druge točke zastoja S_2 . Pomicanjem vrtloga prema kraju profila pomiče se i točka zastoja S_2 na sam kraj profila.

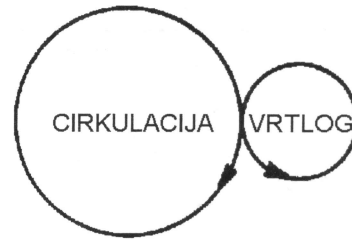
Nastao je fenomen koji se naziva **početni vrtlog** (eng. Starting vortex).

Posljedica početnog vrtloga je proturotacija fluida oko profila u suprotnom smjeru. Proturotacija fluida nastaje zbog viskoziteta strujnica zahvaćenih vrtlogom. Kutna brzina rotacije se povećava, strujnice skreću i potiču na kružno strujanje oko profila druge nadolazeće strujnice. Ovaj fenomen može se vjerno



Slika 5. Kružno gibanje čovjeka i okretnog diska na postolju

Figure 5. Circular movement of a man and rotating wheel on the base



Slika 5a. Cirkulacija i vrtlog
Figure 5a. Circulation and vortex

predočiti sličnom mehaničkom analogijom - rotacijom malog zupčanika koji pokreće veći zupčanik (sl. 4).

Kružno strujanje fluida oko profila, koje se javlja kao reakcija na nastajanje vrtloga i suprotno je usmjereno, zove se **cirkulacija**. Pojavi cirkulacije ide u prilog i Newtonov zakon akcije i reakcije primjenjen na kružna gibanja predložena na slici (sl. 5).

Čovjek stoji na okretnom postolju i jednom rukom drži osovinu diska, a drugom pokreće disk koji rotira (akcija). Ako se trenje u ležaju zanemari, čovjek rotira skupa s postoljem u suprotnom smjeru kao reakcija na rotaciju diska. Ravnoteža takvog kružnog gibanja uspostaviti će se kada se veličine $I_1 \omega_1$ i $I_2 \omega_2$ izjednače:

- I_1 - moment inercije diska
- I_2 - moment inercije čovjeka
- ω_1 - kutna brzina diska
- ω_2 - kutna brzina čovjeka

Iskustvo dinamike fluida pokazuje da jedan vrtlog ne može postojati sam, da se vrtlozi javljaju u parovima i da im je ukupna cirkulacija jednaka nuli. Prema tome, nastajanje cirkulacije potaknute početnim vrtlogom je logično i izvjesno, intenziteti su im jednaki, a smjerovi suprotni.

$$\Gamma_c = -\Gamma_v \quad (1)$$

Daljnijim strujanjem nastali početni vrtlog će se izgubiti, a cirkulacija oko profila će ostati. Energiju za održavanje cirkulacije će namicati nove mase fluida koji nadolaze.

3. Strujanje oko simetričnog profila Streaming around symmetrical profile

Postavi li se simetričan profil paralelno sa strujom fluida - fluid će glatko otjecati niz profil. Pojaviti će se otpor (trenja i oblika), ali ne i uzgon.

Da bi se dobilo različito strujanje fluida oko gornje i donje površine simetričnog profila ovaj se mora zakrenuti u odnosu na smjer paralelnih strujnica koje nailaze jednolikom brzinom (sl.6.).

Tek nakon formiranja graničnog sloja stvaraju se uvjeti za nastanak početnog vrtloga. Granični sloj je važan jer unutar njega djeluju sile viskoziteta od kojih ovisi brzina strujanja fluida. Brzina čestica fluida u dodiru s jedrom jednaka je nuli. Povećanjem udaljenosti čestica od jedra povećava im se i brzina.

Na određenoj udaljenosti čestice fluida gibaju se brzinom okolnog strujanja. Crta na kojoj čestice dostižu brzinu okolnog strujanja zove se "granica" graničnog sloja izvan kojeg sile viskoziteta više ne djeluju, a fluid struji slobodno. Promjena brzine strujanja unutar graničnog sloja, od nule do brzine slobodnog strujanja, čini to područje "nestabilnim" za masu fluida koji ga ispunja. U graničnom sloju moguće je nastajanje vrtloga i turbulencije fluida zbog prisutnih promjena tlakova i brzina strujanja.

Početni vrtlog nastaje u graničnom sloju na samom kraju jedra i svojim nastankom remeti i razbija granični sloj.

Nakon odvajanja vrtloga granični sloj se odmah formira s obje strane izlaznog poruba jedra uzrokujući ravnomjerno strujanje s jednakim brzinama i tlakovima (KUTTA efekt). Kada tlakovi na izlaznom porubu ne bi bili jednaki, porub bi se deformirao.

Suvremeno jedro lako i brzo mijenja svoj oblik pa se i situacija u graničnom sloju brzo mijenja, što se nepovoljno odražava na strujanje fluida i silu uzgona.

6. Zaključak Conclusion

- Sila uzgona na jedru nastaje zbog razlike tlakova na privjetrinskoj i zavjetrinskoj strani jedra, a što je posljedica razlika u brzinama strujanja.

- Razlika brzina na privjetrinskoj i zavjetrinskoj strani jedra ne nastaje zbog duljeg puta na zavjetrinskoj strani jer je taj put praktično isti.

- Razlika brzina nastaje pojavom cirkulacije inicirane početnim vrtlogom, koji se formira na izlaznom porubu jedra, a potom od njega odvaja.

- Uzajamnim djelovanjem cirkulacije i paralelnog jednolikog strujanja oko jedra brzine se na zavjetrinskoj strani jedra zbrajaju, a na privjetrinskoj odbijaju.

- Ova teorija o uzrocima razlike brzina i nastanku uzgona znatno je prihvatljivija od ranijih teorija zasnovanih na strujanju oko asimetričnog profila.

- Sve iznešeno je teorijski i eksperimentalno dokazano i fotografirano u zračnim tunelima.

I na kraju, razmišljajući i govoreći jedriličarski, riječ fluid lako je zamijeniti rječju vjetar i tretirati ga kao zrak koji se giba i posjeduje energiju koju jedriličar koristi kao "gorivo" za pokretanje jedrilice.

Literatura

References

[1] C. A. MARCHAJ, AERO - HYDRODYNAMICS OF SAILING, London 1988.

[2] C. MASON, THE BEST OF SAIL TRIM, London 1990.

[3] T. WHIDDEN, THE ART AND SCIENCE OF SAILS, London 1990.

[4] M. PEČORNIK, TEHNIČKA MEHANIKA FLUIDA, Školska knjiga Zagreb, 1989.

Rukopis primljen: 2.12.1997.

LUKA DUBROVNIK

RASPOLAŽE:

Vlastitim zatvorenim
otvorenim skladištima,
dizalicama, traktorima,
autoliftovima, kamionima
i drugom lučkom
mehanizacijom.

DUBROVNIK

Gruška obala 1
Telefon: 23-350
Telefax: 23-352
Brzovjav: LUKA DUBROVNIK

OBAVLJA:

Utovar i istovar brodova
za robu namijenjenu
uvozu i izvozu, tranzitu
i razvozu. - Špediciju robe
u razvozu. - Održava i
izgrađuje obale. - Pruža
kompletni servis jahtama.