



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Ekmanov transport u fluidima

- diplomski rad -

Mentor:

Dr Imre Gut

Kandidat:

Bojan Lazarević, 10/05

Novi Sad, 2010

Ovom prilikom bih želeo da se zahvalim svim svojim prijateljima koji su bili uz mene sve ove godine i koji su mi pružili neizmernu podršku, što su bili tu da me ohrabre, oraspolože i nasmeju čak i kada je bilo teško. Posebno se zahvaljujem svojim koleginicama što su bile uz mene i u teškim, ali i onim lepim trenucima tokom studiranja.

Zahvaljujem se kolektivu Prirodno-matematičkog Fakulteta, odsek: Fizika, smer: Meteorologija i modeliranje životne sredine, a posebno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. Imretu Gutu, na ukazanom poverenju, podršci, strpljenju i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj porodici koja mi je pomogla da ostvarim svoj cilj. Najviše sam zahvalan svojoj sestri kojoj posvećujem ovaj rad, jer je sve vreme imala poverenje u mene i moju sposobnost, trud i rad.

Sadržaj

1	UVOD	5
1.1	Istorijat	7
1.2	Nansen-ovi kvalitativni rezultati	8
2	REŠENJE	10
2.1	Navije-Stoksove jednačine	10
2.2	Uticaj viskoznosti	11
2.3	Turbulencija	13
2.3.1	Turbulentni naponi	14
2.4	Analogija sa molekularnom viskoznosću	18
2.5	Ispitivanje Ekmanovih pretpostavki	19
2.6	Ekmanovo rešenje	19
2.7	<i>Ekmanov sloj na površini mora</i>	21
2.8	Vrednost Ekmanove konstante, V_0	23
2.9	Dubina Ekmanovog sloja	24
2.10	<i>Ekmanov broj: Koriolisova sila i sila trenja</i>	25
2.11	<i>Donji Ekmanov sloj</i>	26
2.12	<i>Posmatranje toka u blizini morske površine</i>	28
3	EKMANOV TRASPORT MASE	30
3.1	<i>Transport zapremine, Q</i>	31
3.2	<i>Primena Ekmanove teorije</i>	33

3.2.1	<i>Obalno izviranje, Upwelling</i>	33
3.2.2	<i>Obalno uviranje, Downwelling</i>	35
3.2.3	<i>Ekmanovo pumpanje - Ekman Pumping</i>	36
4	EKSPERIMENT	44
4.1	<i>Postavljanje problema</i>	44
4.2	<i>Posmatranje mogućih rešenja</i>	44
4.3	<i>Realizacija eksperimenta</i>	45
4.3.1	<i>Realizacija donjeg Ekmanog sloja</i>	47
4.4	<i>Rezultati eksperimenta</i>	48
5	ZAKLJUČAK	55
6	LITERATURA	56

1 UVOD

Opisivanje fizičkih procesa i izračunavanje fizičkih veličina, koji se javljaju u atmosferi, morima i okeanima, nije ni malo jednostavno. Posmatrajući atmosferu i okeane kao dva različita fluida sa različitim osobinama, mogu se okarakterisati i opisati njihove karakteristike i videti međusobni uticaji.

Kretanje u atmosferi je po svojoj prirodi turbulentno i odlikuje se potpunom haotičnošću. To kretanje se može predstaviti sistemom jednačina koje opisuju svaki uzrok i uticaj kojim je stvoreno takvo kretanje. Taj sistem čini sistem Navije-Stoksovih jednačina. Za opisivanje takvog vida kretanja koristi se pristup po kome se trenutne vrednosti fizičkih veličina razlažu na osnovnu (srednju) vrednost i odstupanja od te vrednosti. Kada se ovakvo razlaganje primeni na sistem Navije-Stoksovih jednačina, mogu se dobiti posebno sistemi jednačina za srednje vrednosti i posebno sistemi jednačina za odstupanja. U sistemu jednačina za srednje vrednosti javljaju se novi članovi zbog nelinearnosti početnih jednačina. Naime, primenjujući linearno razlaganje (Rejnoldsovo razlaganje) na nelinearne jednačine, stvara se problem zatvaranja sistema. Broj nepoznatih veličina postaje veći od broja jednačina. Da bi se ovaj problem rešio, koriste se razne aproksimacije. Isključivanjem uticaja koji su jako mali u odnosu na uticaje koje najviše doprinose stvaranju pojedinih procesa, smanjuje se broj nepoznatih u jednačinama kretanja. Na taj način se mogu dobiti rešenja koja veoma dobro prikazuju aproksimiran proces.

Na ovaj način se mogu dobiti i jednačine koje će opisivati uticaj između atmosfere i okeana. Za dobijanje ovih jednačina, prvo se treba pozabaviti njihovom fizičkom problematikom. Pronalaženjem fizičkih procesa koji utiču na granici ova dva fluida i njihovom analizom, analitički se mogu predstaviti procesi u jednačinama kretanja. Sagledavanjem prirodnih procesa, uočava se da se na granici atmosfere i okeana, prilikom relativnog kretanja jednog fluida u odnosu na drugi, javlja bitna karakteristika u fluidima, a to je trenje. Zbog te karakteristike, javlja se sila trenja koja se uključuje u razmatranje za kretanje, samim tim uključuje se i u jednačini kretanja. Zbog sile trenja, okeani na svojoj površini, osetljivo reaguju na pravac i intenzitet vazdušnih strujanja, tako da je cirkulacija gornjih slojeva okeana uglavnom forsirana odozgo, sa površine okeana, udarima vetra. Dalje, svi se nalazimo na rotirajućoj planeti i relativno mirujemo u odnosu na njeno okretanje. Zbog

toga se ne može zanemariti uticaj rotacije na tela koja se kreću. Zbog rotacije Zemlje, javlja se još jedna sila – Koriolisova sila, koja deluje u desno od smera kretanja na severnoj hemisferi, a u levo na južnoj hemisferi Zemlje. Smatrajući da su ove dve sile najbitnije i zanemarivanjem ostalih komponenti koje se nalaze u jednačini kretanja, dobija se uprošćen, aproksimiran sistem jednačina za kretanje vode u gornjem graničnom sloju na površini okeana. Rešavajući sistem, dobija se rešenje za brzinu kretanja vode za svaku dubinu u graničnom sloju.

U ovom radu je opisan uticaj vetra koji duva iznad vodenih površina kao i uticaj trenja koji se javlja na dnu okeana u rotirajućem sistemu. Vetar na površini mora i okeana stvara kretanje površinskih vodenih struja. Zbog pojave trenja između slojeva u vodi, uticaj gornjeg toka struje će se osećati do određene dubine u vodi. Gornji sloj vode u kome se oseća uticaj vетром stvorene struje vode naziva se *gornji Ekmanov sloj*, a dubina od površine vode, pa do prestanka uticaja površinskog toka – *Ekmanova dubina*. Dno okeana se kreće većom brzinom u odnosu na brzinu sloja vode iznad. Ovaj donji sloj vode je sličan sloju vode na površini pa se zato naziva *donji Ekmanov sloj*. Ukupan transport vodene mase, koji se javlja zbog duvanja vetra na površini vode, je u stranu od smera duvanja vetra ili kretanja dna. Ovaj transport vode dovodi do značajnih karakteristika koje se dešavaju na obali i na ekvatoru kao i u rotirajućem fluidu. Neki od njih su obalno i Ekvatorsko izviranje vode, ili poniranje vode u zavisnosti od smera rotacije fluida.

Cilj ovog rada je da se predstave rešenja koja opisuju kretanja vode stvorena duvanjem vetra na morskoj površini, kao i kretanjem morskog dna. Način na koji se prenosi uticaj u dublje slojeve vode, kao i ukupan transport vodene mase, je jedan od ciljeva kao i da se nađe verzija, modalitet, po kojem će se na jednostavan način i sa jednostavnom aparaturom eksperimentalno dobiti Ekmanova spirala i Ekmanov transport.

U ovom radu su predstavljane formule koje opisuju procese u atmosferi i hidrosferi u Ekmanovom sloju i aproksimacije koje važe za donji sloj atmosfere i gornji i donji sloj okeana i mora. Rešenje sistema jednačina daje brzine vode za svaku dubinu u Ekmanovom sloju. Računanjem Ekmanove dubine i Ekmanovog broja dobija se broj koji opisuje veličinu uticaja koji se stvara, tj. do koje dubine u vodi se oseća uticaj vetra. Tabelarno je prikazan uticaj geografske širine na dubinu Ekmanovog sloja. Takođe je u obliku formuli opisan Ekmanov transport vodene mase i uticaji do kojih ovaj proces dovodi. Vizuelno prikazivanje Ekmanove spirale je dato u grafičkom obliku i u eksperimentalnom delu su prikazane slike načinjene tokom izvođenja eksperimenta.

Ideju za temu ovog diplomskog rada sam dobio tokom pohađanja predavanja i učenja nekih od ispita koje je držao i sam mentor. Tokom obrade teme Ekmanov transport i Ekmanova spirala, jako me je zaintesovala ta vrsta materije. Slike koje sam viđao, u početku, priznajem da su me očarale, iako smisao nisam u početku shvatao. To me je navelo da savladam i razumem neke od dešavanja ovih procesa i napišem diplomska rad na tu temu.

Za eksperimentalno dobijanje i prikazivanje Ekmanove spirale, ideju sam dobio pregledavanjem internet stranica, uz profesorovu veliku pomoć [6]. Na njima je, međutim, bio samo vizuelno prikazan video snimak na kojem se vidi Ekmanova spirala, ali nije bio opisan način pripreme i realizacija i nije bio iznet ni opis dobijenog eksperimenta. Logičnim zaključkom i obradom formula za dobijanje Ekmanovih brzina, pokušali smo da dobijemo sličan eksperiment. Pošto u formulama figurišu dva člana: sila trenja i Koriolisova sila, zaključili smo da se spirala javlja delovanjem ove dve sile. Realizaciju eksperimenta smo postepeno korigovali raznim pokušajima i proverama. Posudu sa eksperimentalnom tečnošću smo postavili na rotirajući točak simulirajući na taj način Koriolisovu silu. Za dobijanje gornjeg Ekmanovog sloja, na površini vode, potrebno je da deluje vetrovna sila. Duvanje vetra nije bilo moguće simulirati zbog nemogućnosti uključivanja fena koji bi se rotirao zajedno sa posudom i eksperimentalnom tečnošću. Zbog toga smo se opredelili da simuliramo silu trenja koja se javlja na dnu posude. Na taj način smo dobili donji Ekmanov sloj sa pratećim karakteristikama.

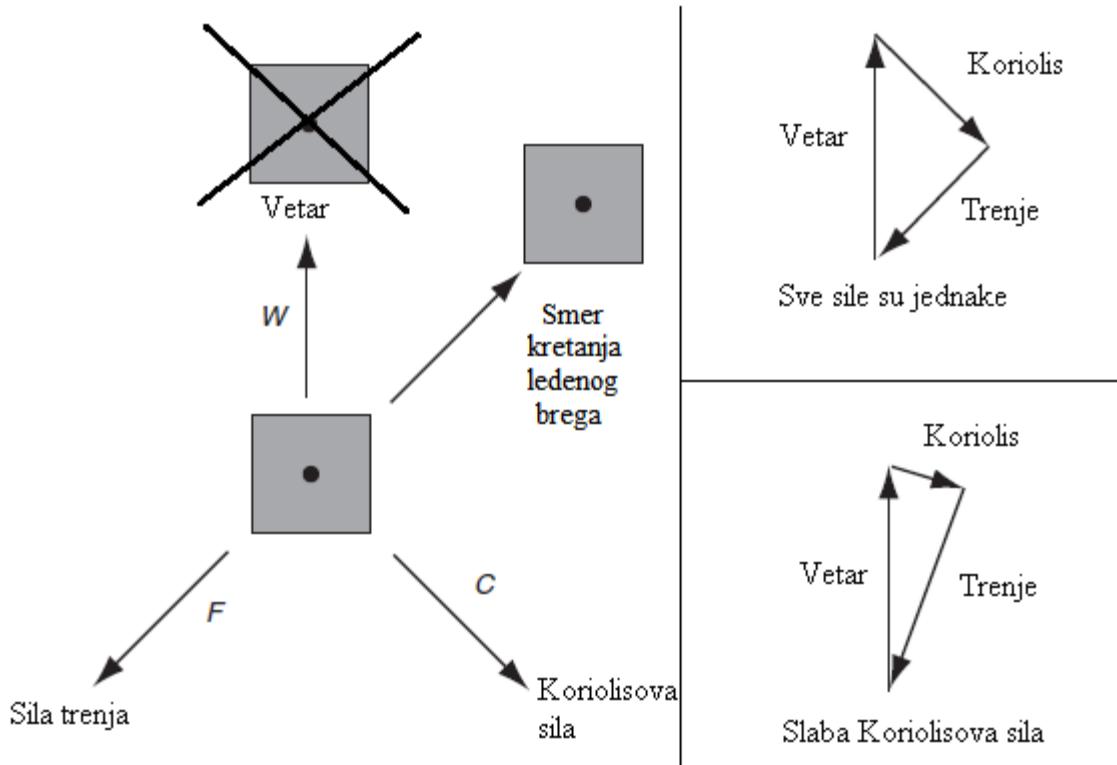
Prilikom izvođenja eksperimenta, načinjeni su slike i video snimci koji su priloženi uz diplomski rad na dvd-u.

1.1 Istorijat

Neprekidno duvanje vetra na površini mora i okeana stvara tanak horizontalni granični sloj u vodi, Ekmanov sloj. Pod tankim slojem se podrazumeva sloj od nekoliko stotina metara debeline, što je tanko u poređenju sa dubinama vode u okeanima. Sličan granični sloj postoji i na dnu okeana i naziva se donji Ekmanov sloj. Naziv Ekmanov sloj je dobio ime po profesoru Valfridu Ekmanu koji se bavio dinamikom fluida. Ekmanov rad je bio jedan od mnogih izvanrednih studijskih istraživanja, tokom prve polovine dvadesetog veka, koja je dovela do razumevanja kako vetrovi utiču na okeansku cirkulaciju.

1.2 Nansen-ovi kvalitativni rezultati

Fridtjof Nansen (1861. godine – 1930. godine) je primetio da veter teži da oduva ledeni breg pod uglom od 20° - 40° u desno od smera vetra na Arktiku [1]. (slika 1.1)



Slika 1.1. Ravnoteža sila koja deluje na ledeni breg kada duva veter na rotirajućoj Zemlji

Nansen je kasnije otkrio ravnotežu sila koje moraju postojati kada veter duva noseći ledeni breg niz veter.

Tri sile koje čine ravnotežu su:

1. Sila koju stvara veter, \mathbf{W} ;
2. Sila trenja, \mathbf{F} ; u suprotnom bi se ledeni breg kretao brzinom vetra,
3. Koriolisova sila, \mathbf{C} .

Dalje, Nansen zaključuje i da sile moraju imati prateće efekte:

1. Trenje mora biti suprotno pravcu kojim se ledeni breg kreće;
2. Koriolisova sila mora biti normalna, pod 90° stepeni, u odnosu na smer kretanja leda;
3. Sile moraju biti u ravnoteži:

$$\mathbf{W} + \mathbf{F} + \mathbf{C} = \mathbf{0}.$$

Nansen je pitao Bjerknesa (Vilhelm Bjerknes) da dopusti jednom od studenata, da napravi teorijsku studiju o uticaju Zemljine rotacije na vodene struje stvorene vetrom. Valfrid Ekman (Valfrid Ekman) je izabran i nakon velikog rada, rezultate objavljuje u svojoj tezi u Upsali („Uppsalla“, Kulenberg, 1954. godine). Ekman je rođen u Stokhomu 3. maja 1874. godine i tokom uspešnog početka, nastavlja da proširuje studiju ka uključivanju uticaja kontinenata i razliku u gustinama u fluidima (1905. godine). Kao profesor mehanike i matematičke fizike na univerzitetu u Lundu u Švedskoj, Ekman postaje jedan od vodećih okeanografa u to vreme. Ovaj odlikovan teoretičar je takođe pokazao izvrsne eksperimentalne sposobnosti i iza sebe ostavio mnogobrojna dela. Umro je 9. marta 1954. godine.

2 REŠENJE

Za definisanje fizičkih održivih principa kao što su: održanje kretanja (Njutnov zakon kretanja), održanje mase i održanje polja promenljivih veličina, koriste se Navije-Stoksove jednačine.

2.1 Navije-Stoksove jednačine

Za opisivanje stanja atmosfere i hidrosfere u meteorologiji se koristi osnovni sistem jednačina kretanja. To je sistem nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina izvedenih na osnovu drugog Njutnovog zakona. Po ovom zakonu, totalni diferencijal vektora brzine jednak je zbiru sila po jedinici mase koje deluju na predmet. Ovaj sistem nelinearnih jednačina je praktično nemoguće rešiti analitički. Rešavanje ovih jednačina je moguće samo aproksimativnim metodama, tj. rešenja se mogu tražiti samo za idealizovane atmosferske i hidrosferske probleme zanemarujući članove koji veoma malo utiču na razmatrane procese. Polazi se od toga da je za kontinualan fluid definisan sistem jednačina, koje u Kartezijanskom koordinatnom sistemu mogu da se zapišu u obliku

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u - fv &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v + fu &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} + F_z - g \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2.1)$$

gde su x , y , z odgovarajući pravci u Kartezijanskom koordinatnom sistemu. u , v , w predstavljaju komponente vektora brzine, t je vreme, $f = 0.88 \cdot 10^{-4}$ je Koriolisov parametar. P je dinamički pritisak, ρ je trenutna vrednost gustine, ρ_0 je srednja vrednost gustine, a $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ je gravitaciono ubrzanje.

Prvi član u jednačini je lokalni, vremenski, izvod x komponente brzine, a drugi član je advekcija koja govori o premeštanju posmatranog delića fluida. Treći član sa leve strane je Koriolisova sila. Vidi se da ova sila nema efekta pri promeni brzine po vertikali, pa se stoga gubi u trećoj jednačini sistema. Sa desne strane, prvi član predstavlja silu gradijenta pritiska po jedinici mase, drugi član u sebi sadrži informaciju o trenu fluida, a treći član sa desne, koji se javlja jedino u poslednjoj jednačini sistema, je geopotencijal koji se javlja usled sile Zemljine teže. On predstavlja potencijalnu energiju tela koja se javlja u polozaju tela u gravitacionom polju.

Koriolisova sila je, u ovom sistemu jednačina, predstavljena u razvijenom obliku po koordinatama, a opšti oblik je

$$\vec{F}_{cor} = 2\vec{\Omega}\vec{V} \sin \varphi$$

gde je $\vec{\Omega}$ vektor rotacionog ubrzanja Zemlje, \vec{V} je vektor brzine kretanja posmatranog delića, a φ je geografska širina. Odavde se vidi da je na polovima uticaj Koriolisa najjači, dok je na ekvatoru nula.

Difuzija, bilo koje od tri komponente brzine kretanja, je data u obliku

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

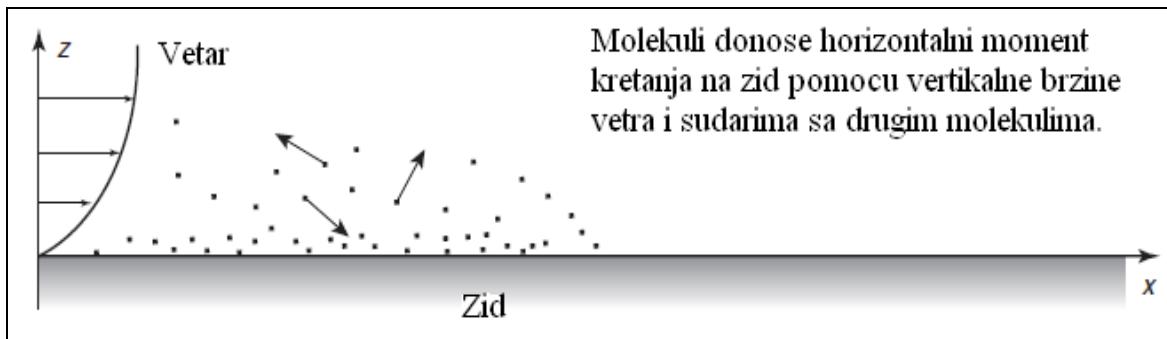
gde su A_h horizontalne i A_z vertikalne vrtložne viskoznosti koji parametrišu efekte turbulencije. Više o ovim parametrima biće rečeno u daljem tekstu.

2.2 Uticaj viskoznosti

U unutrašnjosti okeana i atmosfere uticaj viskoznosti je relativno mali, pa možemo sa sigurnošću reći da je u toj oblasti tok bez trenja. Međutim, na granici između okeana i atmosfere, trenje, u obliku viskoznosti, postaje značajano. Ovaj tanak, viskozni sloj atmosfere je nazvan *granični sloj*. Unutar graničnog sloja, brzina se smanjuje od površine do tipične srednje vrednosti brzine u unutrašnjosti i od tipične vrednosti u unutrašnjosti do nule na čvrstoj granici. Ako granica nije čvrsta, onda je granični sloj tanak sloj u kome se brzina

intenzivno menja. Primer je planetarni granični sloj gde se brzina vazduha kreće od nekoliko metara u sekundi, u slobodnoj atmosferi, do nekoliko desetina centimetara u sekundi na morskoj površini.

Profil vetra u blizini tla, u stacionarnom slučaju, je posledica kombinovanog dejstva sile gradijenta pritiska i Koriolisove sile. Približavanjem tlu, vetr slabi. Šta bi mogao biti razlog tome? Sila gradijenta pritiska se ne menja sa približavanjem tlu, a Koriolisova sila može samo da promeni pravac vetra, te mora da postoji neki drugi mehanizam smanjenja brzine tj. odvođenja količine kretanja. Za dobijanje ovog odgovora, posmatraće se dva susedna sloja fluida. Slojevi koji se dodiruju, kreću se relativno jedan prema drugom i pri tom se razvija unutrašnji otpor između njih: sloj manje brzine usporava sloj veće brzine. Taj se unutrašnji otpor strujanju fluida naziva „viskoznost“. Svi realni fluidi poseduju viskoznost (lepljivost) koja je posledica izmene količine kretanja između molekula fluida koji se sudaraju prelazeći iz sloja u sloj. Razmatranjem sile trenja, vidi se da molekuli vazduha u blizini vodene granice udaraju u granicu, na površinu vode i prenose količinu kretanja na nju (slika 2.1). Taj prenos količine kretanja je nazvan *molekularna viskoznost*.



Slika 2.1. Sudaranje molekula vazduha sa zidom i donošenje horizontalne količine kretanja na zid. Zid može da bude čvrsta podloga ili tečnost.

Molekularna viskoznost $\rho\nu$ je srazmerna naponu smicanja veta \bar{T} i brzini smicanja fluida na granici. Napon smicanja veta \bar{T} je zavisан od koordinata i opšti princip je razvijanje na devet komponenti. \bar{T} je tangencijalan na granici fluida, a tangencijalna sila, koja deluje na jedinicu površine između slojeva fluida, je u obliku:

$$T_{xz} = \rho\nu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.3a)$$

$$T_{yz} = \rho v \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.3b)$$

gde su T_{xz} i T_{yz} , x i y komponenta napona smicanja unutar mora gustine ρ , a na površini predstavljaju komponente napona vetra. Formula (2.3) važi za tok u x , y ravni na nekoliko milimetara iznad tla, gde je v koeficijent molekularne viskoznosti fluida. Tipično, koeficijent molekularne viskoznosti za vodu na temperaturi od 20°C iznosi $v = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$.

Razvijajući, po x komponenti, jednačinu kretanja za fluid (2.1) dobijamo

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f v - F_x \quad (2.4)$$

gde je $\frac{\partial u}{\partial t}$ lokalni, trenutni izvod x komponente brzine kretanja, $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$ je advekcija, tj. premeštanje, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ je sila gradijenta pritiska u x pravcu. $f v$ predstavlja x komponentu Koriolisove sile, a F_x je sila trenja po jedinici mase koja se javlja na granici između vazduha i vode.

Za nestišljive fluide, sila trenja po jedinici mase ima oblik:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2.5)$$

Pomoću molekularne viskoznosti je opisan prenos količine kretanja na morsku površinu. Usled tog prenosa se na morskoj površini stvara gornji Ekmanov sloj. Slično, uticaj otpora sredine izaziva smicanje na morskom dnu stvarajući donji Ekmanov sloj.

2.3 Turbulencija

Pošto se zna da je molekularna viskoznost značajna samo za nekoliko milimetara fluida i nije značajna za većinu okeanskog toka, postavlja se pitanje kako je onda uticaj granice prenet u unutrašnjost toka. Odgovor je - preko turbulencije.

Turbulencija nastaje od nelinearnog člana u jednačini kretanja, $u \frac{\partial u}{\partial x}$. Značaj ovog člana je predstavljen preko bezdimenzionog broja, *Rejnoldsovog broja Re*, koji se računa kao odnos nelinearnih članova i članova viskoznosti:

$$\text{Re} = \frac{\text{Nelinearni član}}{\text{Član viskoznosti}} = \frac{\left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\left(v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)} \approx \frac{U \frac{U}{L}}{v \frac{U}{L^2}} = \frac{UL}{v} \quad (2.6)$$

gde je U karakteristični razmer brzine, L je karakteristični razmer dužine, a v je koeficijent molekularne viskoznosti. Za male vrednosti U i L , a velike vrednosti v , dobija se mali Rejnoldsov broj i laminaran tok, dok za velike vrednosti U i L , a male vrednosti v , dobija se veliki Rejnoldsov broj koji karakteriše turbulentan tok. Karakteristične vrednosti za brzinu su $U = 0.1 \frac{m}{s}$, za dužinu $L = 1.000 \text{ Km} = 1.000.000 m$, a za koeficijent molekularne viskoznosti je $v = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$, odakle je vrednost Rejnoldsovog broja, $\text{Re} = 10^{11}$. Za vrednost Rejnoldsovog broja od manjeg od 2000, $2000 \leq \text{Re}$, tok je laminaran, dok je za vrednosti Rejnoldsovog broja većeg od 2000 tok je turbulentan, $\text{Re} \geq 2000$. Za vrednost Rejnoldsovog broja od $\text{Re} = 10^{11}$ okean je turbulentan.

2.3.1 Turbulentni naponi

Prandtl, Karman i ostali koji su studirali mehaniku fluida početkom dvadesetog veka [1], pretpostavili su da se delići fluida u turbulentnom toku kreću po istim zakonitostima količine kretanja unutar toka kao i kada se molekuli kreću u laminarnom toku. Za dobijanje jednačina koje figurišu turbulentni tok, uvodi se princip po kome se trenutne vrednosti razlažu na srednje vrednosti i odstupanja (fluktuacije). Ovaj metod razlaganja se zove *metod perturbacija*. Primenom ovog metoda na sistem Navije-Stoksovih jednačina, dobijaju se posebno sistemi jednačina za srednje vrednosti i posebno sistemi jednačina za odstupanja. U sistemu jednačina za srednje vrednosti javljaju se novi članovi zbog nelinearnosti početnih jednačina. Ti novi članovi su nazvani turbulentni naponi (Rejnoldsovi članovi).

Kako se dobijaju ti članovi? Najpre se članovi trenutnih vrednosti razlože na srednje (U, V, W) i turbulentne (u^*, v^*, w^*) članove:

$$u = U + u^*; \quad v = V + v^*; \quad w = W + w^*; \quad p = P + p^* \quad (2.7)$$

gde je srednja vrednost U izračunata usrednjavanjem vrednosti po vremenu ili prostoru kao

$$U = \langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad \text{ili} \quad U = \langle u \rangle = \frac{1}{X} \int_0^X u(x) dx. \quad (2.8)$$

Nelinearni članovi u jednačinama kretanja usrednjeni *operacijom usrednjavanja* se mogu zapisati u obliku:

$$\left\langle \mathbf{U} + u^* \cdot \frac{\partial \mathbf{U} + u^*}{\partial x} \right\rangle = \left\langle U \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle U \frac{\partial u^*}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u^* \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u^* \frac{\partial u^*}{\partial x} \right\rangle. \quad (2.9)$$

Kod ove jednačine iskoristićemo dve pretpostavke. Jedna od njih je da drugi član sa desne strane jednakosti predstavlja usrednjene promene turbulentnih veličina za neko malo rastojanje u velikom razmeru. Član govori o tome kako se za velike razmere mala promena ne oseti. Zbog toga se taj član izjednačuje sa nulom, $\left\langle U \frac{\partial u^*}{\partial x} \right\rangle = 0$. Dalje, treći član sa desne strane jednakosti opisuje usrednjene promene srednjih vrednosti za neko malo rastojanje u veoma malom razmeru. Ovaj član ne dovodi do promene na srednji tok zbog čega se i ovaj član izjednačuje sa nulom, $\left\langle u^* \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle = 0$. Usled ovih pretpostavki, formula (2.9) dobija sledeći oblik:

$$\left\langle \mathbf{U} + u^* \cdot \frac{\partial \mathbf{U} + u^*}{\partial x} \right\rangle = \left\langle U \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u^* \frac{\partial u^*}{\partial x} \right\rangle. \quad (2.10)$$

Zamenom uslova (2.7) u x komponentu jednačine kretanja (2.4) dobija se

$$\begin{aligned} \frac{\partial(U + u^*)}{\partial t} + (U + u^*) \frac{\partial(U + u^*)}{\partial x} + (V + v^*) \frac{\partial(U + u^*)}{\partial y} + (W + w^*) \frac{\partial(U + u^*)}{\partial z} &= \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(P + p^*)}{\partial x} + f \left(\mathbf{U} + v^* \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(U + u^*)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(U + u^*)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(U + u^*)}{\partial z} \right) \right) & \end{aligned} \quad (2.11)$$

daljim sređivanjem izraza, x komponenta jednačine kretanja za trenutne vrednosti je

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} + \\ + w \frac{\partial U}{\partial z} + W \frac{\partial u}{\partial z} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fV + fv - \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dobijena je jednačina za rezultujuće, trenutne vrednosti kao zbir srednje vrednosti i odstupanja. Jednačina za srednje vrednosti izgleda

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial U}{\partial z} \right). \quad (2.13)$$

Oduzimanjem jednačine za srednje vrednosti (2.13) od jednačine za trenutne vrednosti (2.12) i operacijom usrednjavanja (2.9) dobija se usrednjena x komponenta jednačine kretanja za turbulentni tok:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fV + \frac{\partial}{\partial x} \left[v \frac{\partial U}{\partial x} - \langle u' u' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \frac{\partial U}{\partial y} - \langle u' v' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v \frac{\partial U}{\partial z} - \langle u' w' \rangle \right] \quad (2.14)$$

Usrednjavanjem turbulentnog toka dobijamo veličinu koja govori o tome koliko turbulentni tok doprinosi srednjem toku. Uočava se da se u jednačinama za srednje vrednosti na desnoj strani javljaju novi članovi, pored očekivanih članova. Prema drugom Njutnovom zakonu ti novi članovi su nekakve sile, preciznije sile za jediničnu masu. Tako, kao posledica jedne matematičke operacije (razlaganja na srednje vrednosti i odstupanja) javljaju se "nove" sile. Odgovor na pitanje kako se uticaj granice prenosi u unutrašnost fluida nam daje dodatna sila po jednici mase stvorena zahvaljujući turbulentciji i ta sila ima oblik:

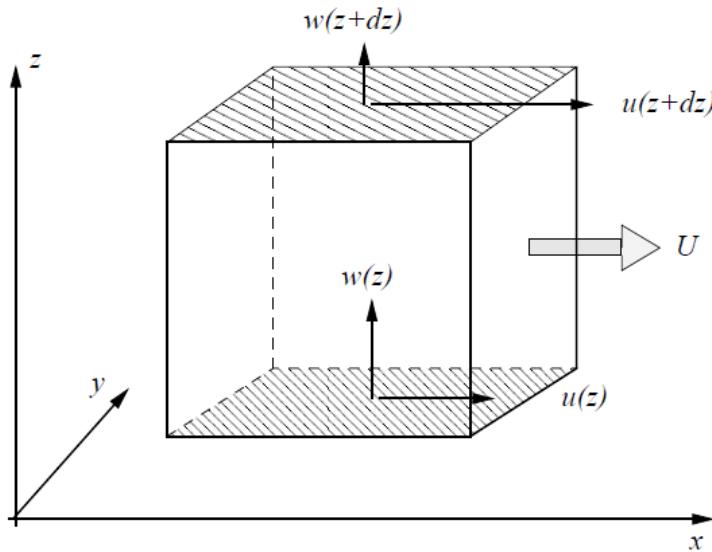
$$F_x = -\frac{\partial}{\partial x} \langle u' u' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle u' v' \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle u' w' \rangle \quad (2.15)$$

Ako bi jednačine pomnožili sa ρ tada bismo govorili o bilansu količine kretanja odnosno o promeni količine kretanja elementarne zapremine. Novi članovi na desnoj strani će tada biti

$$-\frac{\partial}{\partial x} \langle \rho \langle u' u' \rangle \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle \rho \langle u' v' \rangle \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle \rho \langle u' w' \rangle \rangle \quad (2.16)$$

Oni se nazivaju **Rejnoldsovi naponi** u jednačinama kretanja, odnosno Rejnoldsovi članovi. Oni predstavljaju *konvergenciju srednjeg fluksa x komponente količine kretanja* u uočenoj elementarnoj zapremini.

$\frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle$ je srednji neto priliv x komponente količine kretanja u pravcu z ose u uočenu elementarnu zapreminu.



Slika 2.2 Razlika količina kretanja brzine između gornjeg i donjeg sloja

Drugim rečima, u uočenu zapreminu postoji priliv/odliv količine kretanja zbog postojanja odstupanja (fluktuacija) u polju brzine. Masa fluida u uočenoj zapremini je konstantna. Tako, da zbog relativnog kretanja fluktuirajućeg dela toka, u odnosu na uočenu masu koja se kreće srednjom brzinom, dolazi do promene srednje brzine. Na primer, posmatrajmo turbulentni tok kretanja fluida koji vertikalnim putem dovodi određenu količinu kretanja u uočenu zapreminu. Ukoliko postoji razlika između količine kretanja fluida koji ulazi i količine kretanja fluida koji izlazi iz uočene zapremine, doći će do horizontalnog ubrzavanja ili usporavanja fluida. Ako veća količina kretanja uđe nego što izade, doći će do horizontalnog ubrzavanja. Ukoliko veća količina kretanja fluida izade nego što uđe, doći će do horizontalnog usporavanja fluida u uočenoj zapremini. Tj. svaka promena količine kretanja u jedinici vremena dovodi do ubrzanja/usporenja. Odavde se dobija odgovor na pitanje kako se prenosi količina kretanja u dublje slojeve fluida. Perturbacije u polju brzine među slojevima, dovode do stvaranja turbulencije. Usled turbulencije mnogo veći sloj vode biva zahvaćen mešanjem, nego sloj

vode na koji utiče molekularna viskoznost. Zbog toga se i uključuje turbulencija u članu trenja za dobijanje rešenja Ekmanovih brzina.

2.4 Analogija sa molekularnom viskoznošću

Na slici (2.1) je prikazan granični sloj iznad ravne ploče. Prepostavlja se da je kretanje iznad ploče turbulentno. Ovo je veoma uobičajen tip kretanja u graničnom sloju.

Za kretanje fluida iznad graničnog sloja, prepostavljamo da je kretanje nepromenljivo tokom vremena i da je konstantno u x i y pravcu. Ovo znači da osobina kretanja zavisi samo u z pravcu. Dakle,

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad (2.17)$$

i zbog toga u jednačini kretanja ostaju samo sledeći članovi:

$$\cancel{\frac{\partial U}{\partial t}} = -\frac{1}{\rho} \cancel{\frac{\partial P}{\partial x}} + 2\Omega V \sin \varphi + \cancel{\frac{\partial}{\partial x} \left[v \frac{\partial U}{\partial x} - \langle u' u' \rangle \right]} + \cancel{\frac{\partial}{\partial y} \left[v \frac{\partial U}{\partial y} - \langle u' v' \rangle \right]} + \cancel{\frac{\partial}{\partial z} \left[v \frac{\partial U}{\partial z} - \langle u' w' \rangle \right]} \quad (2.18)$$

$$2\Omega V \sin \varphi + \frac{\partial}{\partial z} \left[v \frac{\partial U}{\partial z} - \langle u' w' \rangle \right] = 0 \quad (2.19)$$

Sada se prepostavlja po analogiji sa (2.3), da je Rejnoldsov turbulentni član, tj. napon, izjednačen sa naponom smicanja fluida:

$$\rho \langle u' w' \rangle = T_{xz} = \rho v \frac{\partial u}{\partial z} = \rho A_z \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.20)$$

gde je A_z vertikalni koeficijent vrtložne viskoznosti koji parametriše efekte turbulencije ili kraće - *VRTLOŽNA VISKOZNOST*. Vrtložna viskoznost zamenjuje molekularnu viskoznost u (2.3). Sa ovom prepostavkom je

$$\frac{\partial T_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho A_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \approx \rho A_z \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (2.21)$$

gde se sada pretpostavlja da je A_z konstantan ili da nema promene u z pravcu.

Za homogeni i turbulentni granični sloj ispod ili iznad horizontalne površine, x i y komponente jednačine kretanja su u obliku

$$\rho f V + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (2.22a)$$

$$\rho f U - \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (2.22b)$$

gde je $f = 2\Omega \sin \varphi$ Koriolisov parametar. Prvi član u jednačinama sistema figuriše Korolisovu silu, a drugi napon smicanja veta po vertikli. U naponu smicanja figuriše turbulentni član predstavljen u obliku koeficijenta vertikalne vrtložne viskoznosti.

2.5 Ispitivanje Ekmanovih pretpostavki

Pre uzimanja u obzir zakonitost Ekmanove teorije za opisan tok struja u površinskom graničnom sloju okeana, okarakterisaće se Ekmanove pretpostavke:

1. Nema granica. Ovo važi daleko od obale.
2. Duboka voda. Važi ukoliko je dubina vode veća od 200 m.
3. Stacionarno stanje. Ovo je važeće ukoliko vetar duva ne duže od polovine dana. Ovde se još primećuje i to da je Ekman računao vremensko - zavisno rešenje.
4. A_z je konstantno.
5. Homogenost u gustini. Dosta dobra pretpostavka.

2.6 Ekmanovo rešenje

Posmatrajući uslov kada vetar duva ka severu na severnoj hemisferi, led se kreće u desno od pravca duvanja veta za oko 40° . Ekman dolazi do zaključka da trenje mora biti suprotno pravcu kojim se ledeni breg kreće i da Koriolisova sila mora biti normalna, pod 90° stepeni, u odnosu na smer kretanja leda. Zbog toga pretpostavlja u jednačinama kretanja

vremenski stacionaran, prostorno homogen i horizontalan tok fluida sa trenjem na rotirajućoj Zemlji. Stoga su horizontalni i lokalni vremenski izvodi jednakci nuli:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0. \quad (2.23)$$

Ekman dalje prepostavlja konstantan vertikalni koeficijent vrtložne viskoznosti, A_z koji figuriše u naponu smicanja:

$$T_{xz} = \rho A_z \frac{\partial u}{\partial z}, \quad T_{yz} = \rho A_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.24)$$

gde su T_{xz} i T_{yz} komponente sile koju vetar stvara u x i y pravcu, a ρ je gustina morske vode.

Sa ovim prepostavkama i koristeći (2.22) u x i y komponentama jednačina kretanja, dobio je dve sile koje figurišu takvo kretanje:

$$fv + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2.25a)$$

$$-fu + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \quad (2.25b)$$

Ekman je na ovaj način dobio sistem jednačina koje se sastoje od Koriolisovog člana i turbulentno predstavljenog člana usled trenja, tj. viskoznosti.

Da bi se dobila rešenja jednačina (2.25), uvodi se oznaka $a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}}$:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{fv}{A_z} \rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -2va^2$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{fu}{A_z} \rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 2ua^2$$

i ovo je sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina drugog reda, čije rešenje se traži u oblicima: $u = \hat{u}e^{-iaz}$ i $v = \hat{v}e^{-iaz}$.

Primenom zadatih rešenja na sistem parcijalnih izvoda drugog reda, dobija se rešenje za x i y komponentu brzine kretanja svakog sloja fluida po dubini z :

$$u = V_0 e^{-az} \cos\left(\frac{\pi}{4} + az\right) \quad (2.26a)$$

$$v = V_0 e^{-az} \sin\left(\frac{\pi}{4} + az\right). \quad (2.26b)$$

gde je $V_0 e^{-az}$ kvadratni koren zbiru kvadrata x i y komponente brzine

$$\sqrt{u^2(z) + v^2(z)} = V_0 e^{-az}, \quad (2.27)$$

a V_0 je brzina vode na morskoj površini.

Konstante su

$$V_0 = \frac{T}{\sqrt{\rho^2 \cdot f \cdot A_z}} \quad \text{i} \quad a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}}$$

kada vetar duva ka severu ($T=T_{yz}$), a kada duva ka istoku ($T=T_{xz}$).

2.7 Ekmanov sloj na površini mora

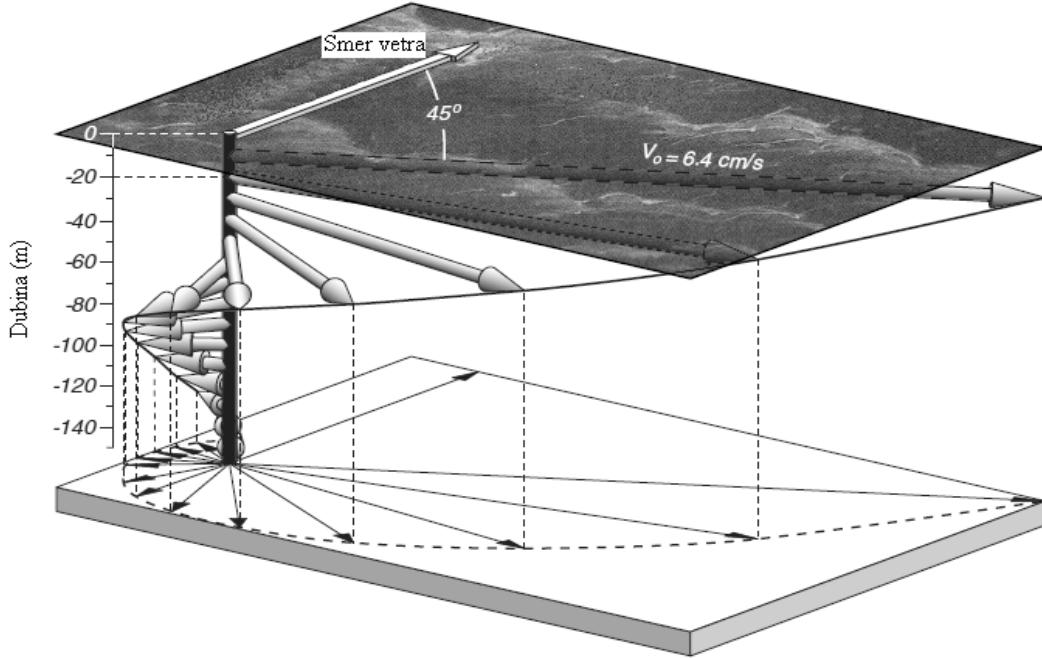
Oblik rešenja brzine kretanja vode na morskoj površini izgleda:

$$u(0) = V_0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (2.28a)$$

$$v(0) = V_0 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (2.28b)$$

jer je na morskoj površini $z=0$ pa je $e^{-az} = e^0 = 1$. Kosinusi i sinus u prethodnim jednačinama daju vrednost od $\frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = \cos(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ (videti sliku 2.3)}$$



Slika 2.3. Grafički prikaz Ekmanove spirale: promena vektora brzine sloja po dubini

Sa slike se vidi da, ukoliko je veter usmeren ka severu, brzina vode na površini V_0 je usmerena ka severoistoku. Drugim rečima, brzina vode na površini V_0 , tj. vodena struja je usmerena 45° na desno od smera vetra na severnoj hemisferi Zemlje. Struja na južnoj hemisferi će biti usmerena isto pod 45° , ali na levo od smera vetra. Treba napomenuti da su na slici visine, tj. dubine z prikazane sa negativnim predznakom, ali se u formulama koristi pozitivna brojčana vrednost.

U gornjem površinskom sloju javlja se Ekmanov sloj, za čije brzine kretanja svakog sloja figuriše oblik jednačina (2.26)

$$u = V_0 e^{-az} \cos\left(\frac{\pi}{4} + az\right)$$

$$v = V_0 e^{-az} \sin\left(\frac{\pi}{4} + az\right).$$

Iz ovih rešenja za brzine kretanja vode po visini, vidi se da se u rešenjima javlja eksponencijalni član. e^{-az} je amplitudni član koji govori da ispod površine, brzina kretanja vode **opada eksponencijalno** sa dubinom. Brzina opada eksponencijalno do brzine konstantnog unutrašnjeg toka fluida koji se nalazi ispod površinskog Ekmanovog sloja odnosno iznad donjeg Ekmanovog sloja.

2.8 Vrednost Ekmanove konstante, V_0

Vetrovne struje: energija vetra koji duva nad površinom mora prenosi se delom u energiju kratkoperiodičnih površinskih talasa, a delom u energiju vetrovnih struja. Delovanje vetra na površinu mora, rezultat je sile trenja, koju još nazivamo i napon vetra. Napon vetra je dobro poznat i Ekman je iskoristio formulu po kojoj je:

$$T = \rho_{air} C_D U_{10}^2. \quad (2.29)$$

gde je T napon smicanja vetra. Konstante u (2.29) su zasnovane na tome da je $\rho_{air} = 1.25 \frac{Kg}{m^3}$ gustina vazduha i U_{10} je brzina vetra na 10 m iznad vode. C_D je u jednačini koeficijent povlačenja. To je bezdimenziona veličina i predstavlja silu koja se prenosi na slobodnu, čvrstu ili tečnu površinu iz fluida jedinične površine i jedinične mase pri jediničnoj brzini kretanja fluida. Drugim rečima, to je efikasnost prenošenja interakcije iz fluidne površine na podlogu. Ekmanova vrednost za koeficijent povlačenja je $C_D = 2.6 \times 10^{-3}$.

Ekman se okreće ka literaturi da dobije vrednost za V_0 kao funkciju od brzine vetra. Otkrio je zavisnost u obliku:

$$V_0 = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \quad , \quad |\varphi| \geq 10^\circ \quad (2.30)$$

gde je φ geografska širina, a U_{10} je x komponenta brzine vetra na deset metara visine. Sa ovom informacijom, Ekman je mogao da izračuna brzinu kretanja fluida kao funkciju od dubine poznavajući brzinu vetra na 10 m, U_{10} i pravac vetra.

2.9 Dubina Ekmanovog sloja

Površinski sloj vode u kome se oseća uticaj vetra i u kome se javlja spirala ima svoju dubinu. Ekmanov sloj je važan zbog toga što brzina kretanja vodenih struja opada eksponencijalno sa dubinom. Ekman predlaže da debljina sloja treba biti dubina D_E na kojoj je tok fluida suprotan kretanju fluida na površini. To se dešava na dubini $D_E = \frac{\pi}{a}$, gde je

$a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}}$. Dubina Ekmanovog sloja se izračunava pomoću formule:

$$D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 A_z}{f}} . \quad (2.31)$$

Koristeći (2.29) u (2.28), deleći sa U_{10} i koristeći (2.30) i (2.31) dobija se:

$$D_E = \frac{7.6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \quad (2.32)$$

u SI sistemu mernih jedinica, gde vetar u metrima po sekundi daje dubinu u metrima.

Koristeći izraz (2.32) sa karakterističnim vetrovima, dubina Ekmanovog sloja varira od 45 do 300 metara (Tabela 2.1)

Tabela 2.1 Karakteristične Ekmanove dubine u morskoj vodi

$U_{10} \frac{m}{s}$	Ekmanova dubina u metrima	
	15° severne geografske širine	45° severne geografske širine
5	75	45
10	150	90
20	300	180

Koriolisov uticaj je najjači na polovima jer jer ($\sin 90^\circ = 1$, a $\sin 0^\circ = 0$), pa deljenjem sa većim brojem dobijamo manju vrednost dubine. Pa tako, udaljavanjem od ekvatora, vrednost Ekmanove dubine se smanjuje.

2.10 Ekmanov broj: Koriolisova sila i sila trenja

Debljina Ekmanovog sloja je dubina sloja vode od površine mora do dubine na kojoj je sila trenja jednaka Koriolisovoj sili. Koriolisova sila je fu , a sila trenja $A_z \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$. Odnos ove dve sile daje bezdimenzionu vrednost, koju nazivamo *Ekmanov broj*, E_z .

$$E_z = \frac{\text{Sila trenja}}{\text{Koriolisova sila}} = \frac{A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}{fu} = \frac{A_z \frac{u}{d^2}}{fu}$$

$$E_z = \frac{A_z}{fd^2} \quad (2.33)$$

gde se aproksimiraju tipične vrednosti za brzinu u i tipična vrednost za dubinu Ekmanovog sloja d . Što je dubina veća, to je trenje manje i, eventualno, može da preostane samo Koriolosova sila. Ekmanov broj govori o odnosu dve sile i sve dok je njihov odnos različit od nule, do tad se oseća uticaj trenja. Rešavajući (2.33) za dubinu d dobija se

$$d = \sqrt{\frac{A_z}{fE_z}} \quad (2.34)$$

što se slaže sa funkcionalnim oblikom (2.31) što je prepostavio Ekman. Upoređujući ove dve jednačine, (2.31) i (2.34), vidi se da je u Ekmanovoj dubini deo $E_z = \frac{1}{2\pi^2} = 0.05$.

2.11 Donji Ekmanov sloj

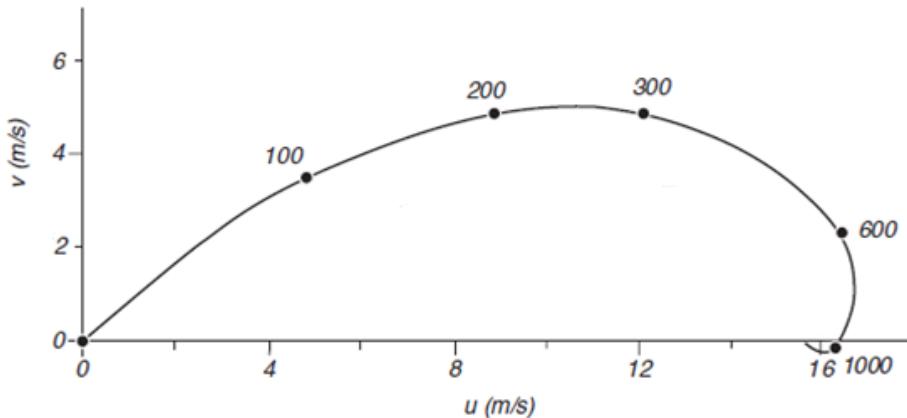
Ekmanov sloj na dnu okeana i atmosfere razlikuje se od sloja na površini okeana. Rešenje za donji granični sloj na dnu fluida u x pravcu je

$$u = U \left[-e^{-(az)} \cos(az) \right] \quad (2.35a)$$

$$v = U \left[-e^{-(az)} \sin(az) \right]. \quad (2.35b)$$

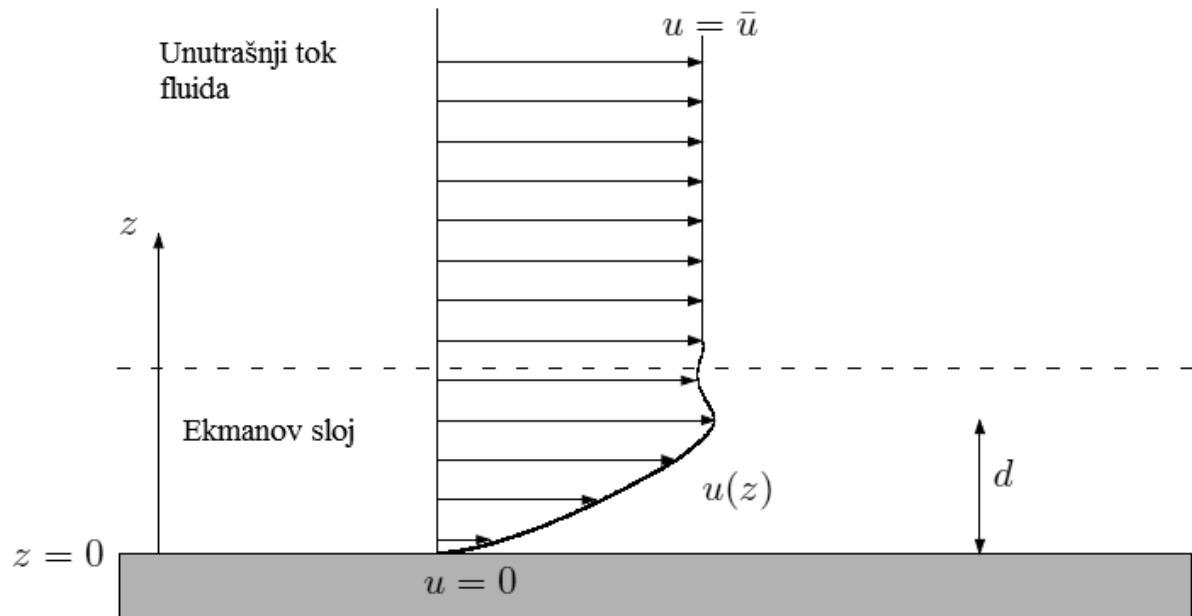
gde je U brzina fluida u konstantnom toku. Uzimajući za visinu na granici tj. samom dnu, da ima vrednost nula $z=0$, može se lako izračunati da je brzina na granici nula $u=v=0$. Sa udaljavanjem od granice, visina raste. Sa porastom visine, eksponencijalni član dobija na značaju, ali jako malo jer je negativan predznak. Kako se povećava visina, eksponencijalni član raste i za neku određenu vrednost visine, eksponencijalni član ima vrednost jednak jedinici. To znači, da na toj visini prestaje da se oseća uticaj podloge na posmatrajuću tečnost.

Na grafiku 2.4 se mogu videti komponente brzine vetra u Ekmanovom sloju u najnižem kilometru atmosfere kao i visine ispod površine.



Grafik 2.4 Komponente brzine vetra u Ekmanovom sloju u najnižem kilometru atmosfere. Brojevi pored tačaka govore o visini u metrima ispod površine. Ekmanov sloj na dnu okeana ima sličan oblik krive.

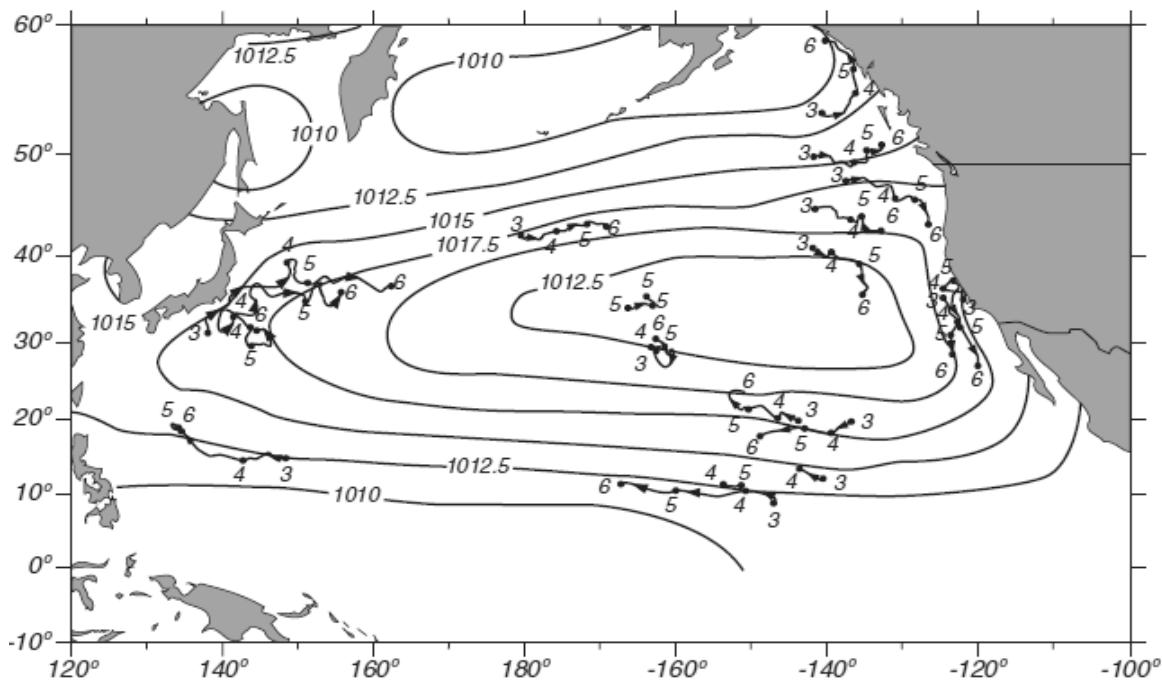
Na slici (2.5) je predstavljen vertikalni presek horizontalne brzine vetra unutar fluida. Pri dnu se javlja Ekmanov sloj, iznad kojeg se fluid kreće konstantnom brzinom.



Slika 2.5 Uticaj trenja podloge na dnu u ujednačenom toku fluida u rotirajućem sistemu

Dubina Ekmanovog sloja d ne obuhvata celu debljinu donjeg Ekmanovog sloja. Ovo se dešava zbog toga što se pod dubinom d smatra sloj od površine, u ovom slučaju dna, do visine na kojoj je sila trenja jednaka sa Koriolisovom silom. Pošto iznad ove visine trenje počinje naglo da slabi, od dna pa do te visine se uzima da je to dubina Ekmanovog sloja.

Slično se dešava i na granici između vazduha i vode. Vetrovi iznad planetarnog graničnog sloja su normalni na gradijent pritiska u atmosferi i paralelni linijama konstantnog površinskog pritiska. Vetrovi na površini su 45° u levo u odnosu na te vetrove iznad, a površinske stuje su 45° u desno u odnosu na smer vetra na površini. Zbog toga očekujemo da će stujnice na morskoj površini biti približno u smeru vetrova iznad planetarnog graničnog sloja i paralelne linijama konstantnog pritiska. Osmatranja površinskih kretanja u Pacifiku teže da potvrde hipoteze (slika 2.6)



Slika 2.6 Trajektorije površinskih kretanja struja zajedno sa površinskim pritiskom u atmosferi usrednjene na mesec dana. Primećuje se da površinske morske struje teže da prate linije konstantnog pritiska na većim visinama.

2.12 Posmatranje toka u blizini morske površine

Da li se kretanje u blizini morske površine slaže sa Ekmanovom teorijom? Merenja struja napravljena tokom nekoliko veoma uspešnih eksperimenata pokazuju da je Ekmanova teorija izvanredno dobra. Teorija uredno opisuje srednji tok struja tokom više dana.

Izvršena su mnogobrojna merenja tokom poslednjih 30 godina i njihovom obradom prikupljenih podataka su dobijeni rezultati. „Niiler“ i „Ralph“ [2] su otkrili 1503 struja koje su bile postojane na 15 metara dubine u Pacifiku od marta 1987. godine do decembra 1994. godine. Informacije o vetu su bile dobijane na svakih 6 sati iz ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

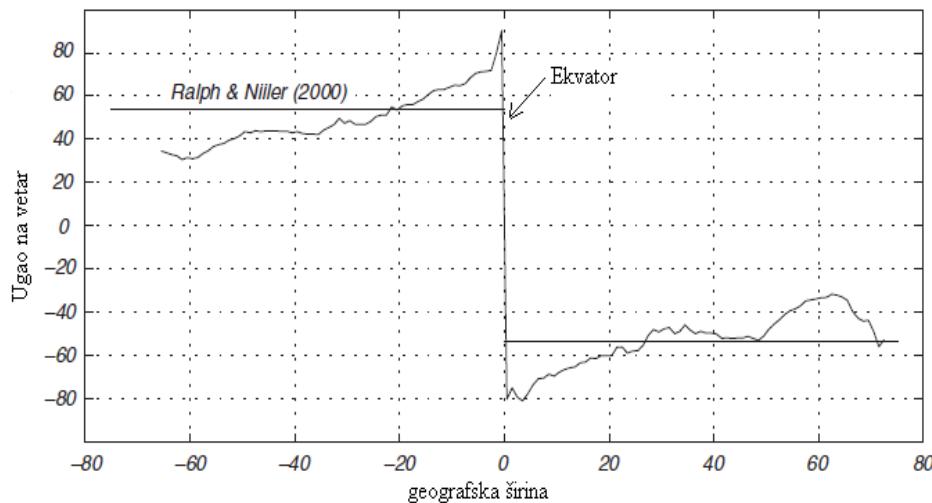
Rezultati merenja pokazuju sledeće:

1. Dubina Ekmanovog sloja D_E je približno tačna kao što je prepostavio Ekman (2.32), ali površinska struja je polovina prepostavljene (2.30).

$$D_E = \frac{7.6}{\sqrt{\sin|\phi|}} U_{10} \quad (2.36)$$

$$V_0 = \frac{0.0068}{\sqrt{\sin|\phi|}} U_{10} \quad (2.37)$$

2. Prilikom merenja je uočeno i to da je ugao između vetra i površinke struje vode oko 45° i da zavisi od geografske širine. Na slici 2.6 se vidi da je ugao između vetra i površinske struje u blizini polova jako mali, a da u blizini Ekvatora taj ugao dostiže vrednosti oko 80° .



Slika 2.7 Ugao između vetra i toka fluida na površini

3 EKMANOV TRASPORT MASE

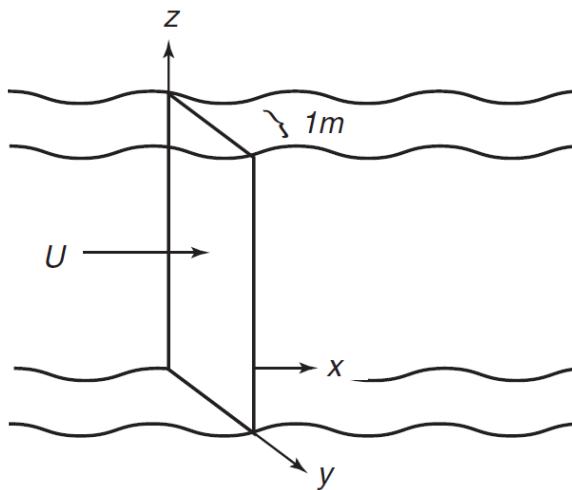
Ekmanov transport je prirodan proces koji se stvara duvanjem vetra iznad morske površine. Pri tom se voda kreće po već rečenom zakonu i svaki sloj ispod površinske struje se kreće sve sporije i sporije i pri tom smer struje skreće sa dubinom.

Ekmanov transport M_E je definisan kao integral Ekmanove brzine U_E, V_E od površine do dubine d ispod Ekmanovog sloja. Dve komponente transporta su M_{Ex} i M_{Ey} :

$$M_{Ex} = \int_{-d}^0 \rho U_E dz \quad (3.1a)$$

$$M_{Ey} = \int_{-d}^0 \rho V_E dz \quad (3.1b)$$

Jedinica transporta je $\frac{Kg}{m \cdot s}$. To je masa vode koja prolazi kroz vertikalnu ravan koja je, jedan metar širine, normalna na transport, a zahvata dubinu od površinskog sloja do dubine d . (pogledati sliku 3.1)



Slika 3.1 Transport mase kroz površinu 1 m širine i dubine d

Integracijom jednačina (2.22) i (3.1) dobijamo Ekmanov transport mase

$$f \int_{-d}^0 \rho V_E dz = f M_{Ey} = - \int_{-d}^0 d T_{xz} , \quad f \int_{-d}^0 \rho U_E dz = f M_{Ex} = - \int_{-d}^0 d T_{yz}$$

$$fM_{Ey} = -T_{xz}|_{z=0} + T_{xz}|_{z=-d}, \quad fM_{Ex} = -T_{yz}|_{z=0} + T_{yz}|_{z=-d} \quad (3.2)$$

gde T_{xz} i T_{yz} predstavljaju komponente napone veta. Na nekoliko stotina metara ispod površine Ekmanove brzine se približvaju nuli i u poslednjem uslovu (3.2) je nula. Zbog toga je transport mase određen samo naponom vetra na morskoj površini ($z=0$). Na sličan način, može se izračunati transport mase u x pravcu uključujući dve komponente Ekmanovog transporta:

$$fM_{Ey} = -T_{xz}(0) \quad (3.3a)$$

$$fM_{Ex} = T_{yz}(0) \quad (3.3b)$$

gde su $T_{xz}(0)$ i $T_{yz}(0)$ dve komponente napona smicanja vetra na morskoj površini.

Iz formule 3.3 se vidi da kada je napon smicanja u x pravcu, transport mase je u y pravcu (normalan na njega). Odnosno, u formuli 3.3a veter duva ka istoku, a transport mase je ka severu (u desno u odnosu na veter na severnoj hemisferi). Ukoliko je veter ka severu u pozitivnom y pravcu (južni veter) $T_{yz}(0)$, onda su

$$T_{xz}(0) = 0, \quad M_{Ey} = 0, \quad \text{a} \quad M_{Ex} = \frac{T_{yz}(0)}{f}.$$

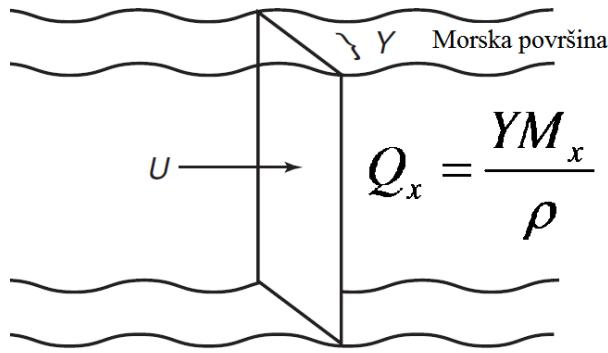
Na severnoj hemisferi, f je pozitivno, a transport mase je u *desno*, a na južnoj hemisferi je transport mase u *levo*.

3.1 Transport zapremine, Q

Pod transportom zapremine se smatra transport mase neke tečnosti (vode) određene gustine ρ koja se kreće širinom Y normalnom na transport.

$$Q_x = \frac{YM_x}{\rho} \quad ; \quad Q_y = \frac{XM_y}{\rho} \quad (3.4)$$

gde je Y severno-južno rastojanje koje predstavlja širinu prilikom kretanja mase u x pravcu, a X je istočno-zapadno rastojanje koje predstavlja širinu prilikom kretanja mase u y pravcu (slika 3.2) .



Slika 3.2 Transport zapremine

Transport zapremine ima dimenziije metar kubni po sekundi $\frac{m^3}{s}$. Univerzalna jedinica za transport zapremine je milion kubnih metara u sekundi. Ova jedinica se zove Sverdrap (Sverdrup), Sv .

$$10^6 \frac{m^3}{s} = Sv$$

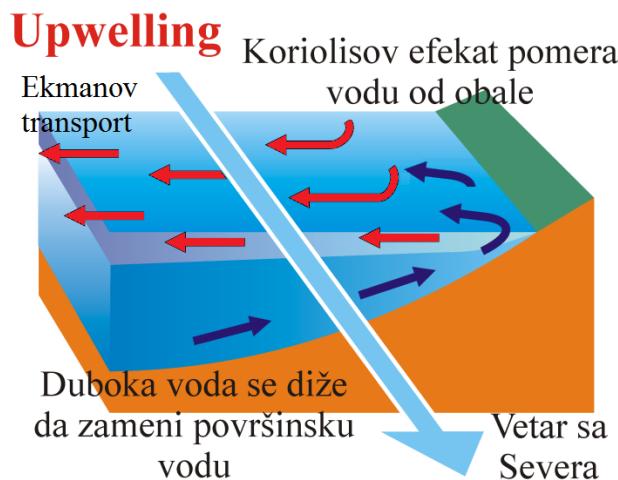
Nedavna osmatranja Ekmanovog transporta u okeanu slažu se sa teoretskim vrednostima (3.3). Čereskin i Roemih [1] su računali Ekmanov zapreminske transport oko $11^\circ N$ severne geografske širine u Atlantskom okeanu koristeći akustični Doplerov radar. Izračunali su transoprt od $Q_y = 12.0 \pm 5.5 \text{ Sv}$ (severno) direktno mereno na struje, do $Q_y = 8.8 \pm 1.9 \text{ Sv}$ preko merenja vetra koristeći formule (3.3) i (3.4), a vrednost usrednjena preko više godina je iznosila $Q_y = 13.5 \pm 0.3 \text{ Sv}$.

3.2 Primena Ekmanove teorije

Iznad morske površine, zbog ravnomernog duvanja vetra, stvara se Ekmanov sloj koji transportuje vodu u desno u odnosu na smer vetra. Bilo koja prostorna promenljivost vetra ili duvanje vetra duž neke obale, može dovesti do mnogobrojnih uticaja koja su okarakterisana kao prirodni fenomeni. Jedni od uticaja koje vetar stvara, duvajući uz obalu, su obalno izviranje vode tj. *upwelling* ili obalno uviranje vode, *downwelling*.

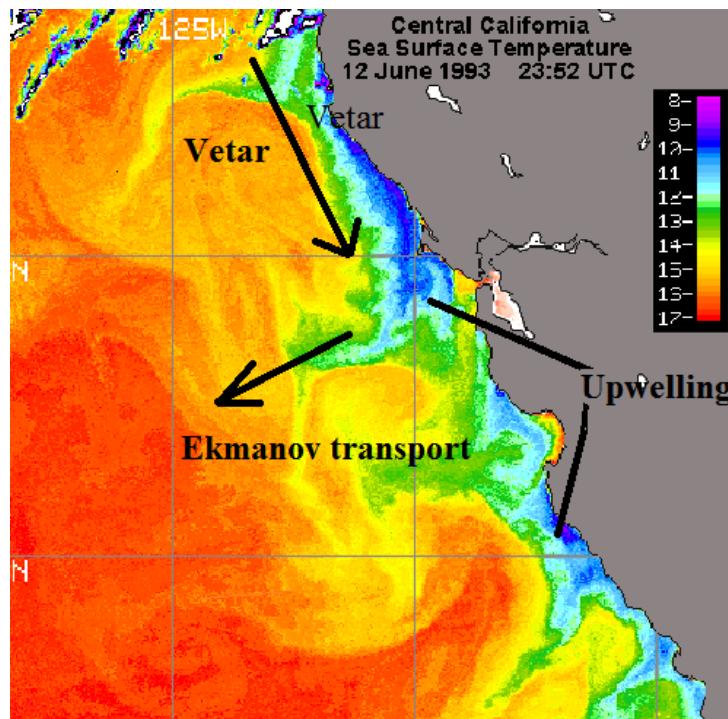
3.2.1 Obalno izviranje, Upwelling

Da bi smo videli kako vetar utiče na izviranje vode, razmotrimo duvanje severnog vetra paralelno sa obalom Kalifornije (slika 4.1)



Slika 4.1. Prikaz Ekmanovog transporta duž obale koji dovodi do izviranja hladne vode duž obale

Vetar, duvanjem iznad morske površine, stvara skretanje morskih struja za 45° u desno od smera duvanja vetra. Ukupan transport vodene mase će biti u desno, za 90° , u odnosu na smer vetra. Na taj način, vetar prouzrokuje transport mase od obale svuda duž cele obale. Odgurana površinska voda se zamenjuje vodom ispod Ekmanovog sloja, zbog sile gradijenta pritiska koji se javlja. Zbog toga što je podižuća voda hladnija, pod uticajem upwelling-a dolazi hladnija voda u taj region. Ovo se naziva obalno izviranje ili ***upwelling***. (slika 4.2)



Slika 4.2. Satelitski snimak koji prikazuje izviranje hladne vode na obali. Svaka boja predstavlja određenu temperaturnu vrednost. Graduisana skala govori o vrednostima temperature za svaku boju.

Crvene boje predstavljaju topliju vodu, dok plave boje predstavljaju hladniju vodu.

Voda koja se izdigla iz dubina je hladna i puna nutreina, u odnosu na vodu koja se može naći na površini. Nutreini hrane fitoplanktone u mešajućem sloju. Fitoplanktone jedu zooplanktoni, čime se hrane male ribe. Malim ribama se hrane veće ribe i tako redom što je za ribolovce i tamošnje stanovništvo od izuzetnog značaja.

Vremenske prilike zapadne obale Amerike su značajno različite od istočne, iako su na istoj geografskoj širini. To se dešava zbog toga što vetar na zapadnoj strani, duž obale Kalifornije i Oregonia, ima jaku komponentu ka jugu (jak severni vetar). Vetar izaziva izviranje vode (upwelling) duž obale, zbog čega je hladnija voda na obali. Vetar sa kopna donosi topliji vazduh na hladniju obalsku vodu, gde se taj topliji vazduh hlađi stvarajući tanak, hladan atmosferski granični sloj vazduha. Dok se vazduh hlađi, stvara se magla duž obale. Konačno, hladan sloj vazduha prekriva San Francisko, hlađeći ceo grad. Toplijii vazduh se nalazi iznad hladnjeg i tako se stvara temperaturna inverzija koja zabranjuje vertikalnu konvekciju zbog čega se oblaci retko stvaraju. Kiša se formira samo onda kada zimska oluja donese na obalu topao vazduh, stvoren zimi na izvirućoj toplijoj vodi. Taj topliji vazduh je lakši od kopnenog i zbog toga se brzo uzdiže do velike visine i tako stvara kišu.



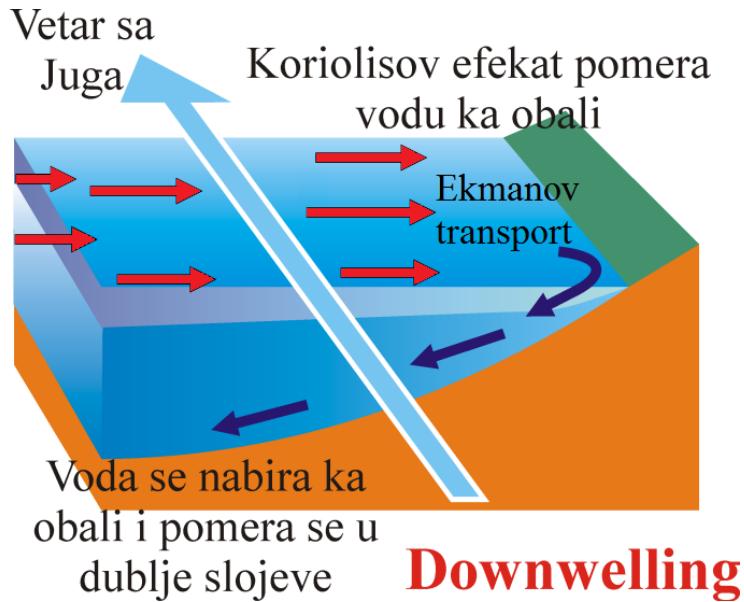
Slika 4.3. San Francisko pod maglom zbog uticaja izviranja hladne vode na obali

Upwelling je bitan zbog:

1. Upwelling povećava bilošku produktivnost, koja pospešuje ribolov;
2. Hladno izviranje vode menja lokalno vreme. Vremenska situacija na obali tog regionala teži da ima maglu, nisku stratusnu oblačnost, stabilnu stratifikovanu atmosferu, malu konvekciju i malo kiše;
3. Prostorna promenljivost transporta u otvorenom okeanu dovodi do izviranja i uviranja vode, koji dovodi do redistribucije mase u okeanu, koji dalje vodi ka geostrofskoj cirkulaciji struja pomoću Ekmanovog pumpanja.

3.2.2 *Obalno uviranje, Downwelling*

Duvanje vetra paralelno sa obalom Kalifornije, (slika 4.4), ali ovoga puta južni vetr, utiče na to da površinska vodena struja skreće u desno za 45° , ka severoistoku. Ukupni transport vodene mase će onda biti usmeren pod 90° u desno od smera vetra, noseći vodu ka istoku. Ekmanov transport donosi površinsku vodu na obalu usled čega se javlja uviranje vode, tj. **downwelling**.



Slika 4.4. Prikaz Ekmanovog transporta duž obale koji dovodi do uviranja površinske vode

Na ovaj način, voda uz obalu je toplija, nema dovoljno hranljivih sastojaka i samim tim je ribolov znatno slabiji.

3.2.3 Ekmanovo pumpanje - Ekman Pumping

Horizontalna promenljivost vetra iznad morske površine dovodi do horizontalne promenljivosti u Ekmanovom transportu. Zbog toga što je masa stalna veličina, važi zakon održanja mase. Prostorna promenljivost u transportu mora dovesti do vertikalne brzine na vrhu Ekmanovog sloja, [3]. Za izračunavanje ove brzine, jednačina kontinuiteta se integrali po vertikali:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^0 \rho u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^0 \rho v dz = -\rho \int_{-d}^0 \frac{\partial w}{\partial z} dz$$

$$\frac{\partial M_{Ex}}{\partial x} + \frac{\partial M_{Ey}}{\partial y} = -\rho \left[w(0) - w(-d) \right]$$

Po definiciji, Ekmanove horizontalne brzine dostižu nulu na dnu Ekmanovog sloja, a vertikalna brzina na dnu sloja $w_E(-d)$ određuje da divergencija Ekmanovog toka mora biti nula.

$$\nabla_H \cdot M_E = \rho w_E(-d) = 0$$

Pa je divergencija na površini:

$$\frac{\partial M_{Ex}}{\partial x} + \frac{\partial M_{Ey}}{\partial y} = -\rho w_E(0) \quad (4.2a)$$

$$\nabla_H \cdot M_E = -\rho w_E(0) \quad (4.2b)$$

gde je M_E vektor transporta mase usled Ekmanovog toka u gornjem graničnom sloju okeana, a ∇_H je operator horizontalne divergencije. Prethodna jednačina, horizontalna divergencija Ekmanovog transporta mase, dovodi do vertikalne brzine u gornjem graničnom sloju okeana. Na taj način se stvara veći pritisak u centralnom delu na površini koji dovodi do poniranja vode kroz centar sistema. Ovaj proces se naziva ***Ekmanovo pumpanje***. [4]

Ako se iskoristi Ekmanov transport mase (3.3) u (4.2) može se naći odnos Ekmanovog pumpanja u odnosu na napon smicanja vetra, T_{xz} i T_{yz} .

$$w_E(0) = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{T_{yz}(0)}{f} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T_{xz}(0)}{f} \right) \right] \quad (4.3a)$$

$$w_E(0) = -\text{rot} \left(\frac{\vec{T}}{\rho f} \right) \quad (4.3b)$$

gde je \vec{T} vektor napona smicanja vetra, ρ gustina, a f Koriolisov parametar.

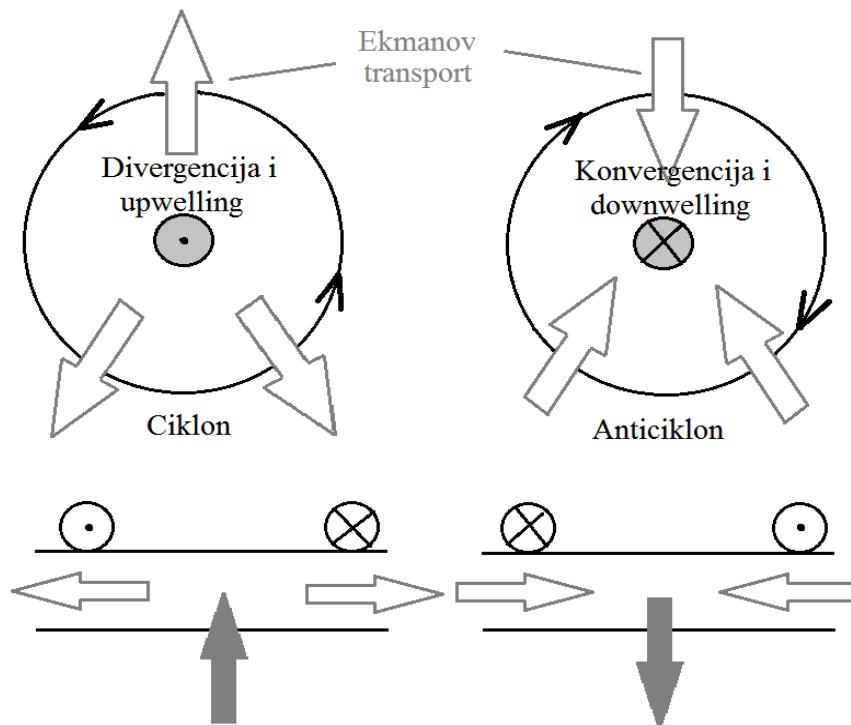
Zaključuje se da rotor napona smicanja vetra \vec{T} proizvodi divergenciju Ekmanovog transporta, $\nabla_H \cdot M_E = -\rho w_E(0)$, dovodeći do vertikalne brzine w_E na vrhu Ekmanovog sloja.

Zbog toga što je vertikalna brzina na površini mora nula, Ekmanova vertikalna brzina mora biti u ravnoteži sa vertikalnom geostrofskom brzinom $w_G(0)$.

$$w_E(0) = -w_G(0) = -\text{rot} \left(\frac{\vec{T}}{\rho f} \right) \quad (4.4)$$

Vertikalna brzina na morskoj površini $w_E(0)$ mora biti nula zbog toga što se površina vode ne može izdići u vazduh, tako da $w_E(0)$ mora biti uravnoteženo sa drugom vertikalnom brzinom. Vertikalna brzina se uravnotežuje sa geostrofskom brzinom $w_G(0)$ na vrhu unutrašnjeg toka u okeanu. Ekmanovo pumpanje w_E vodi vertikalnu geostrofsku struju $-w_G(0)$ u unutrašnjost okeana.

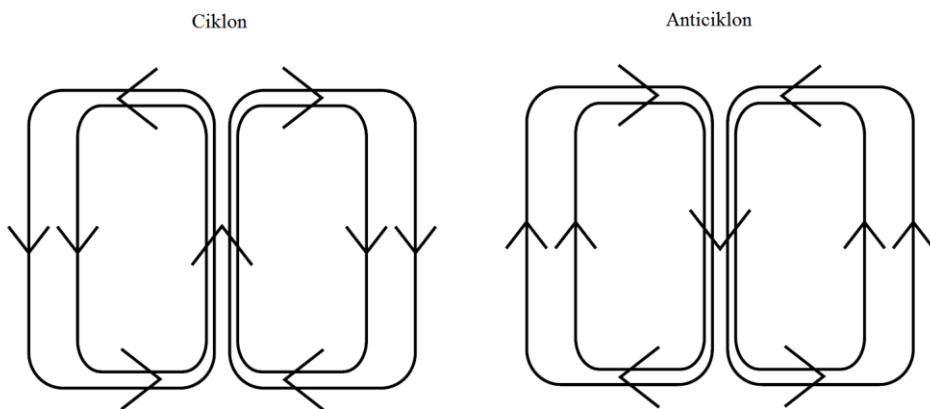
Vetar na površini mora i okeana, u Ekmanovom sloju, uzrokuje kretanje vodene mase u desno u odnosu na smer vetra. Nizak vazdušni pritisak, ciklon, rotira vazduh u smeru suprotnom kretanju kazaljki na satu. Anticiklon, predeo u kome je visok vazdušni pritisak, rotira vazduh u smeru kretanja kazaljki na satu. Kada se ovi vazdušni sistemi nađu iznad vodenih masa, dovode do izviranja vode u centru ciklona ili poniranja vode u centru anticiklona. Na slici 4.5, prikazano je kako ovi sistemi dovode do navedenih cirkulacija. [5]



Slika 4.5. Ekmanov transport vode u ciklonu i anticiklonu

Ekmanov transport je normalan na smer vetra (u desno na severnoj hemisferi). U ciklonu dolazi do divergencije toka uslovljavajući izviranje vode kroz centar sistema, a u anticiklonu zbog konvergencije toka dolazi do poniranje vode.

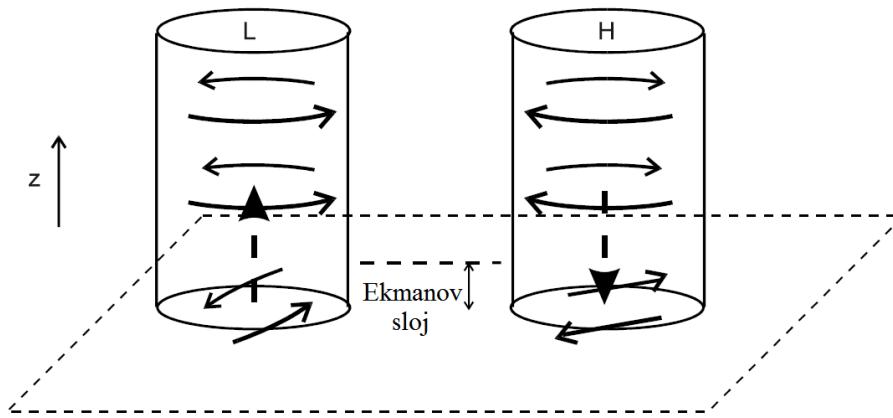
Pri duvanju vetra, u Ekmanovom sloju se stvara cirkulacija vode. U zavisnosti od smera rotacije vetra, stvaraju se različiti smerovi i cirkulacije (slika 4.6)



Slika 4.6 Smer kretanja vodenih struja u okeanu pri različitim atmosferskim pritiscima. Levo slika prikazuje smer kretanja vode u ciklonu, a desna slika prikazuje smer kretanja vode u anticiklonu.

Kada je rotor vetra negativan, tj. anticiklonsko strujanje, vertikalna geostrofska struja – $w_G(0)$ je usmerena na dole, pa voda tone kroz sredinu rotacionog sistema. Na dnu, voda se kreće brzo jer je tok uzak. Sa strane, voda se kreće sporije zbog toga što je tok proširen. Ovo je prvi primetio Sverdrap i opisao da za ovakav tok vode važi jednačina kontinuiteta, tj. nema priliva ni odliva mase, u ovom slučaju vode. Ukoliko je brzina vode veća, tok je uzan i obrnuto. Tamo gde je brzina vode mala, tok je širok.

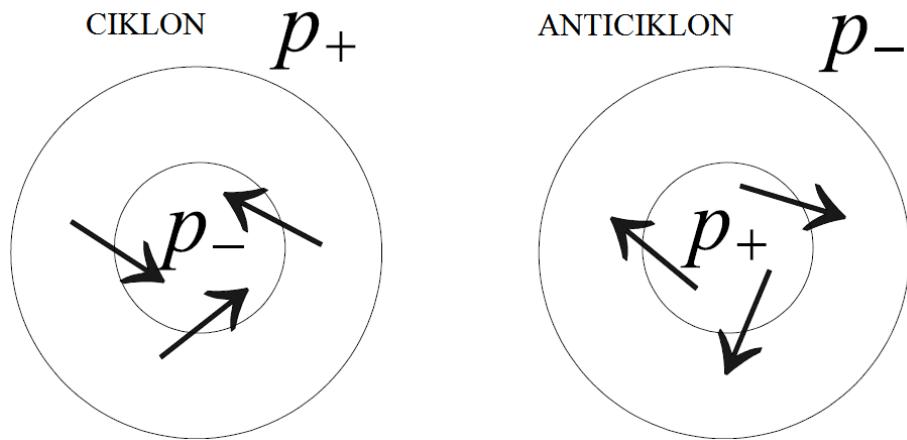
Sada posmatramo rotirajući fluid kada se kreće dno i u zavisnosti od smera rotacije, javlja se niži ili viši pritisak. Na slici 4.7, prikazan je smer struja u rotacionim fluidima u ciklonalnim i anticiklonalnim sistemima.



Slika 4.7 Šematski dijagram koji pokazuje pravac ageostrofskog toka u Ekmanovom sloju izazvan trenjem o tlo pri niskom i visokom pritisku.

U sistemu gde je nizak pritisak, dolazi do konvergencije mase na dnu usled čega se kroz centar rotirajućeg sistema javlja vertikalno kretanje fluida na gore, dok se u sistemu visokog pritiska javlja kretanje fluida na dole kroz centar sistema usled divergencije mase fluida na dnu.

Posmatranjem kretanja fluida na dnu ciklona i anticiklona (slika 4.8), primećuje se da je na dnu ovih sistema skretanje fluida u desno za oko 45° od smera gradijenta pritiska.

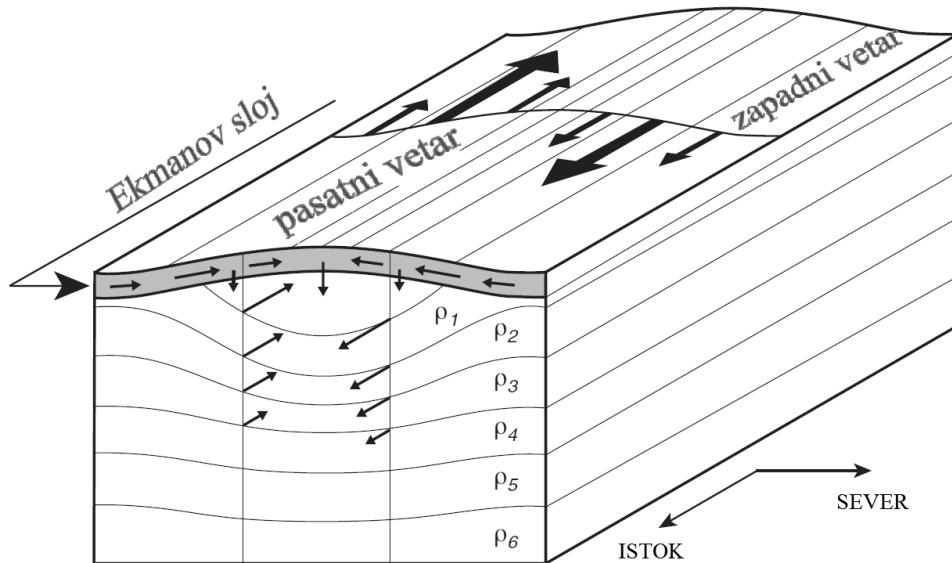


Slika 4.8 Prikaz kretanja fluida na dnu u ciklonu i anticiklonu

U ciklonu, kretanje se vrši od fluida na višem pritisku ka fluidu manjeg pritiska (iz spoljašnjosti ka unutrašnjosti sistema). Usled rotacije, tj Koriolisove sile, donji slojevi fluida uz dno skreću u desno od smera kretanja tečnosti koji stvara gradijent pritiska. Slično važi i za

anticiklon. Veći pritisak je u centru sistema, a na krajevima je niži pritisak i usled toga se javlja kretanje iz centra ka spoljašnjosti. Zbog rotacije sistema, fluid skreće u desno za oko 45° u odnosu na smer kretanja tečnosti koji stvara gradijent pritiska.

Dalje se razmatra Ekmanovo pumpanje u centralnom delu severnog Pacifika gde je rotor vetra negativan-anticiklon (slika 4.9).



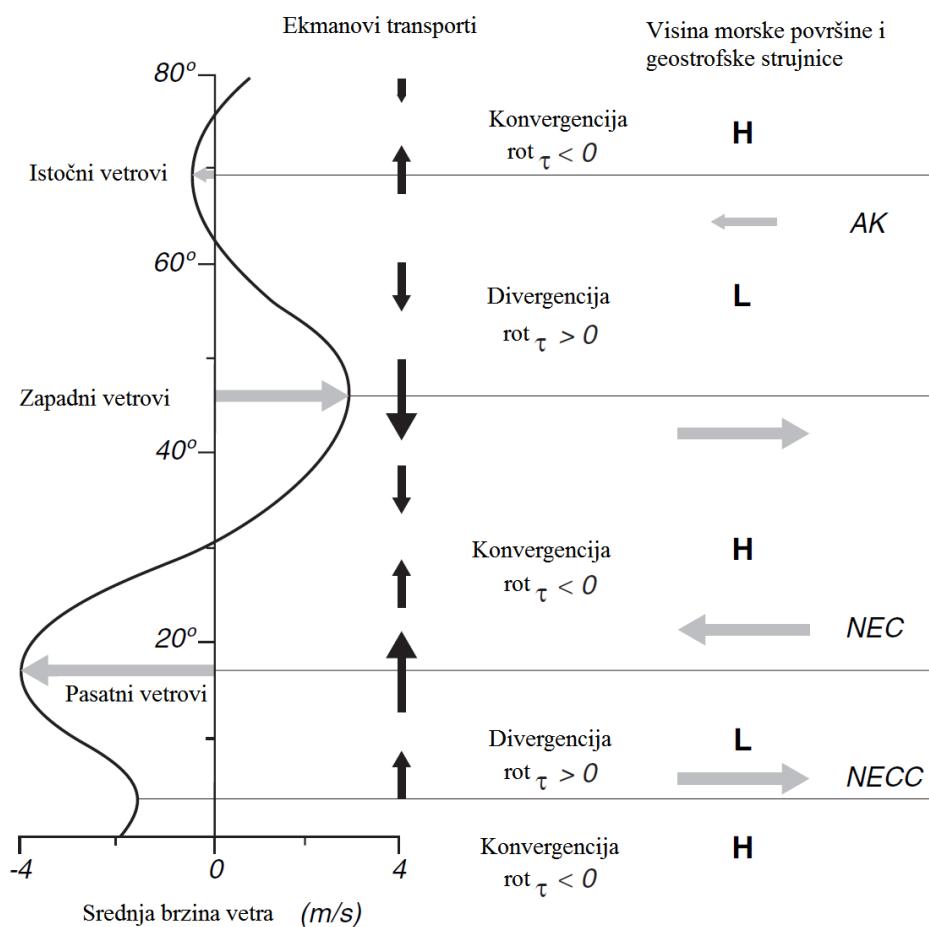
Slika (4.9) Konvergencija Ekmanovog transporta uslovljena pomoću Pasatnih vetrova (Trgovačkih vetrova) i zapadnih vetrova

Vetrovi na površini mora usmeravaju Ekmanov transport u desno u odnosu na vjetar na severnoj hemisferi (sivo osenčeni deo sa strelicama je Ekmanov sloj). Zapadni vetrovi na severu stvaraju južni transport, a trgovački vetrovi na jugu stvaraju severni transport. Konvergencija Ekmanovog transporta uslovljena pomoću Pasatnih vetrova (Trgovačkih vetrova) i zapadnih vetrova uslovljavaju tonjenje geostrofskog toka ispod Ekmanovog sloja (crne strelice na dole). Ova konvergencija Ekmanovog transporta je u ravnoteži sa geostrofskom brzinom tonjenja.

Zbog toga što je voda u blizini površine toplija u odnosu na duboku vodu, vertikalna brzina stvara dubinski kanal tople vode. U mnogo dubljoj vodi u okeanu, vjetrom stvorene geostrofske struje moraju biti nula (Sverdrapova hipoteza) što opisuje jednačina kontinuiteta. Kao rezultat, površina mora težiti izviranjima i izdizanjima vode zbog toga što je stub topline vode duži od stuba hladnije vode, a mase su im iste. Razlika gustina stvara severno–južni gradijent pritiska na srednjim dubinama koji mora biti u ravnoteži sa istočno–zapadnim geostrofskim

strujama. Jednom rečju, divergencija Ekmanovog transporta preraspodeljuje masu dovodeći do stvaranja geostrofskih struja.

Nastavlja se ideja da se uključi ceo severni Pacifik da bi se videlo kako vetrar dovodi do toga da struje teže da izviru, podižući vodu u tom delu – upwelling. Slika (4.10) prikazuje glavnu zonu vetrova na Pacifiku, zajedno sa severno-južnim Ekmanovim transportima stvorenih pomoću zonalnih vetrova. Ekmanov transport, određen vetrovima na severnom Pacifiku (levo), dovodi do Ekmanovog pumpanja (centar), koji podešava severno-južni gradijent pritiska u gornjem okeanu. Gradijenti pritiska su u ravnoteži sa Koriolisovom silom određene istočno-zapadnim geostrofskim strujama (desno). Horizontalne linije pokazuju gde rotor zonalnog vetra menja znak. **AK:** Alaskan Current – Aljaska struje, **NEC:** North Equatorial Current – Severna ekvatorijalna struja, **NECC:** North Equatorial Counter Current – Severna ekvatorijalna struja suprotnog znaka.



Slika (4.10) Primeri kako vetrovi stvaraju geostrofske struje usmeravajući ih na gore.

Primeti se da konvergencija transporta dovodi do skupljanja vode na jednom mestu, tj. uviranja. Taj transport stvara duboki sloj tople vode u gornjem kilometru vodenog stuba i visok nivo vode. Slika (4.10) prikazuje poprečan deo regiona između $10^{\circ}N$ i $60^{\circ}N$, pored ovoga, slika prikazuje i dubinu tople vode u gornjem kilometru vodenog stuba centriranom na $30^{\circ}N$. Suprotno, divergencija transporta dovodi do nižeg nivoa mora i izviranja vode iz dubljih slojeva. Srednji severno-južni gradijent pritiska, zajedno sa visokim i niskim pritiskom, je u ravnoteži zbog Koriolisove sile istočno-zapadnih geostrofskih struja u gornjem okeanu (na slici prikazano u desno).

4 EKSPERIMENT

U prethodnim oblastima su prikazana i opisana matematička rešenja za dobijanje Ekmanove brzine, odnosno Ekmanove spirale, debljine i Ekmanovog transporta mase i zapremine. Takođe, opisani su i uticaji do kojih dovode navedene veličine. Neki od uticaja su upwelling i downwelling, kao i Ekmanovo pumpanje i uvlačenje. Nakon matematičke analize, interesovalo nas je da li se mogu i eksperimentalnim putem vizuelno prikazati neke od pomenutih veličina i uticaja.

4.1 Postavljanje problema

Kao što je rečeno u uvodnom delu, cilj je da se eksperimentalno na lak, jednostavan i ponovljiv način dobije Ekmanova spirala, Ekmanov transport mase, Ekmanovo pumpanje i uvlačenje.

4.2 Posmatranje mogućih rešenja

Za realizaciju eksperimenta, potrebno je stvoriti uslove koji će simulirati prirodne procese koji se javljaju na Zemlji. Prvi pokušaji su bili zasnovani na tome da se duvanjem vazduha iznad vodene površine stvori Ekmanova spirala u gornjem sloju vode. Uslov pri kojem se stvara Ekmanova spirala je taj da se uspostavi ravnoteža Koriolisove sile i sile trenja. Za dobijanje Koriolisove sile, potrebna je rotacija. Za simuliranje rotacije Zemlje i tečnosti na njoj, koristi se rotirajući točak, na koji se postavlja sud sa vodom. Sila trenja se može dobiti duvanjem vetra nad vodenom površinom. Međutim, na ovaj način se eksperiment nije mogao realizovati zbog toga što se odgovarajuća aparatura za simuliranje duvanja vetra, tj. fen, nije mogla postaviti na rotirajući točak. Fen je trebalo rotirati zajedno sa posudom i pri tome da bude uključen u struju, ali se kabal uvrtao i nije dozvoljavao dalju rotaciju. Zbog toga se eksperiment usmerio na dobijanje **donje Ekmanove spirale** pri dnu tečnosti i na uticaje koje stvara kretanje dna na tečnost, koja relativno miruje u odnosu na rotirajući sistem.

Za što bolju izradu eksperimenta, potrebno je da se dobije što veća Ekmanova spirala. Ovo nam je neophodno kako zbog snimanja i slikanja, tako i zbog lakšeg ukazivanja na

procese koji utiču na njeno stvaranje. Takođe, Ekmanova spirala zavisi i od Ekmanove dubine, u kojoj se stvara spirala, pa samim tim i dubina treba da je što veća. Da bi smo videli spiralu, potrebno je da imamo i odgovarajuću boju koja se neće brzo mešati usled difuzije i koja se neće brzo istaložiti. Bitno je i da prilikom sporog tonjenja boje, ona ostavlja veliki i što koncentrovaniji trag boje u obliku niti, od površine do dna tečnosti, kako bi se što bolje videla spirala. Za snimanje eksperimenta, korišćeni su fotoaparat i kamera, koja je bila postavljena na rotirajući točak i zajedno sa eksperimentom se rotirala (na taj način je simuliran čovek koji стоји на rotirajućoj Zemlji.)

4.3 Realizacija eksperimenta

Prilikom izvođenja eksperimenta korišćen je sledeći pribor:

- a) Rotirajući točak
- b) Posude kružnog oblika različitih zapremina
- c) Špric
- d) Kamera/fotoaparat
- e) Ogledalo

Postupak, kojim je rađen eksperiment, je sledeći:

- I. Prvi korak je bio pronaći odgovarajući sud u koji će se sipati eksperimentalna tečnost, zatim je trebalo pripremiti boju koja će biti korišćena u eksperimentu. Nakon neuspelog pokušaja da se sa vodom i kalijum-permagantom, kao bojom, dobije vidljiva Ekmanova spirala, umesto vode se koristi mešavina 80% glicerina (240 ml), $C_3H_8O_3$ (95% glicerol) i 20% vode (60 ml). Glicerin, kao eksperimentalna tečnost, je izabran zbog toga što je providan i što je viskoznost glicerina mnogo puta veća od viskoznosti vode. Usled toga je visina spirale veća i lakše uočljivija. Nije otrovan, nije isparljiv, lako se spira i koristi.

Za boju se koristi mešavina od:

- glicerina, $C_3H_8O_3$ (95% glicerol)
- malo natrijum hidroksida, $NaOH$ (ph vrednosti (8,2-9,8)) i
- ~1% fenoftalajna, $C_{20}H_{24}O_4$.

Fenoftalajn dobija crvenu boju u blago baznim sredinama i zbog toga se smesi glicerina i fenoftalajna dodaje koncentrovaniji natrijum hidroksid.

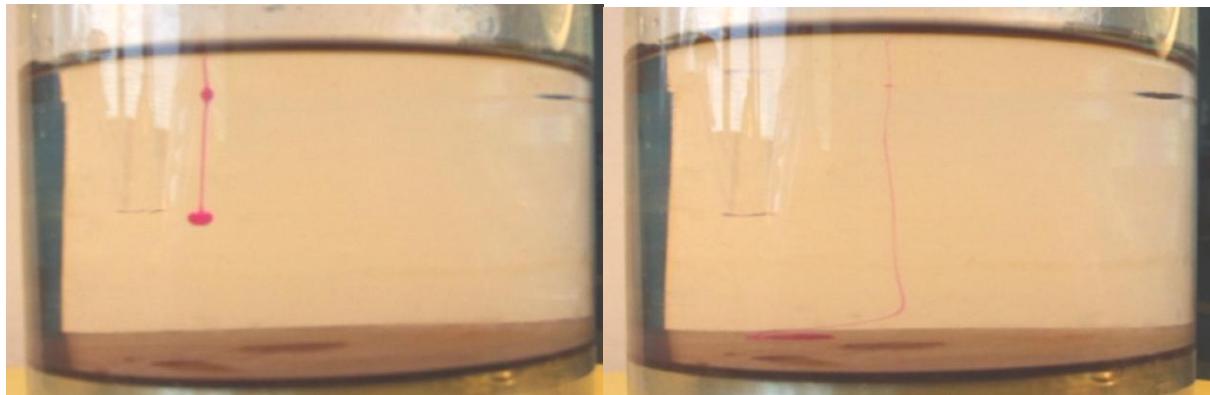
II. Zatim se posude, u kojima se radi eksperiment, napune eksperimentalnom tečnošću, a špic se napuni pripremljenom bojom. Posuda sa tečnošću se postavlja na rotirajući točak (slika 5.1).



Slika 5.1: Eksperiment na rotirajućem postolju i opremom za snimanjem

Pored posude postavlja se i ogledalo po uglom od 45° , koje omogućava da se vidi spirala i po vertikali. Na ceo rotacioni sistem je postavljena kamera koja beleži ceo eksperiment. Pošto kamera ima svoju bateriju, nije bilo nepotrebnih kablova koji bi onemogućavali dalju realizaciju eksperimenta.

Da bi se vuzuelizovala Ekmanova spirala, ušprica se boja u tečnost koja miruje. Zbog veće gustine, boja počinje da tone ostavljajući za sobom koncentrovan trag boje. Dok nit pada, stvara se oblik pečurke zbog sile trenja prilikom poniranja. (slika 5.2 levo)



Slika 5.2 (Levo) Pečurka koja se stvara prilikom poniranja boje i (desno) Ekmanova spirala koja se stvara nakon rotacije

Na taj način se dobija vertikalna nit boje od površine do dna posude, koja će dalje da pokazuje kretanje po nivoima. Zbog toga je bilo potrebno da se dobije što optimalnija gustina boje da bi se stvorila što veća nit koja sporo pada. Kada se formira nit, uključije se rotirajući točak. Točak počinje da rotira, polazeći iz stanja mirovanja, i nakon par sekundi točak dostiže konstantnu brzinu rotacije od oko 20 do 80 obrtaja u minuti.

4.3.1 Realizacija donjeg Ekmanovog sloja

Na početku i u prethodnim oblastima je bilo rečeno na koji način se javlja donji Ekmanov sloj, koji uslovi su potrebni za njegovo stvaranje i kako možemo da vidimo taj sloj. Takođe su bila okarakterisana i opisana dešavanja u tom sloju i na granici.

Eksperimentalno dobijanje donjeg Ekmanovog sloja zahteva poznavanje fizičkih i hemijskih procesa i poznavanje karakteristika korišćenog fluida. Potrebno je poznavanje i procesa koji se javljaju na granici između fluida i podloge kao i u samom fluidu.

Za realizaciju donjeg Ekmanovog sloja potrebno je opisati zašto se i zbog čega javlja donji Ekmanov sloj i spirala. Opisaće se zbog čega je izabran takav sistem u kome treba da postoji trenje i Koriolisova sila i zbog čega se kreće iz stanja mirovanja, a ne iz stanja ravnotežnog rotiranja sistema.

Da bi se stvorila donja Ekmanova spirala potrebno je da deluje Koriolisova sila. Da bi se simulirala Koriolisova sila, posuda sa eksperimentalnom tečnošću se postavlja ekscentrično, udaljeno od centra rotacije. Kada se uspostavi kretanje, dobija se konstantna Koriolisova sila. Kretanje gornjeg graničnog sloja fluida (kod nas je to donji granični sloj tečnosti) se realizuje tako što sistem kreće iz stanja mirovanja, pa na taj način kretanje dna simulira spoljašnju silu koja deluje tangencijalno na graničnoj površini. Ako posmatramo sistem u kojem tečnost miruje, u odnosu na rotirajuće dno, javlja se povlačenje donjeg sloja usled čega se javljaju Ekmanovi efekti, među kojima je i Ekmanova spirala koju možemo slikati i snimati. (slika 5.2 desno)

4.4 Rezultati eksperimenta

Nakon puštanja boje i uspostavljanja vertikalne niti boje, uključuje se rotacioni točak i prate se dešavanja. Dno povlači prvi donji sloj tečnosti sa sobom, koji se kreće istom brzinom kao i dno. To povlačenje izaziva trenje između slojeva. Ovo trenje se prenosi na svaki naredni sloj, koji iz stanja mirovanja pokreće mirujuću tečnost, a prenosi se sve do slojeva koji se kreću istom brzinom tako da nema trenja između njih. Prilikom smicanja tečnosti na dnu, nit boje se deformiše iz sloja u sloj stvarajući na taj način spiralu pri dnu. Oblik spirale u glicerinu je oko 5 cm visine, dok je u vodi visina spirale znatno manja.

Da bi smo uporedili teorijki dobijenu dubinu sa eksperimentalnom, izračunaćemo i pomoću formuli:

$$D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 A_z}{f}}$$

gde su D_E - Ekmanova dubina, f - Koriolisov parametar za vrednost na polu ($\sin 90^\circ = 1$) i računat je kao:

$$f = 2\Omega \sin \varphi = 2 \cdot 20 \frac{\text{obrtaja}}{\text{min}} = 2 \cdot 20\pi \frac{\text{rad}}{\text{min}} = 2 \cdot 20\pi \cdot 60 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2400 \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} .$$

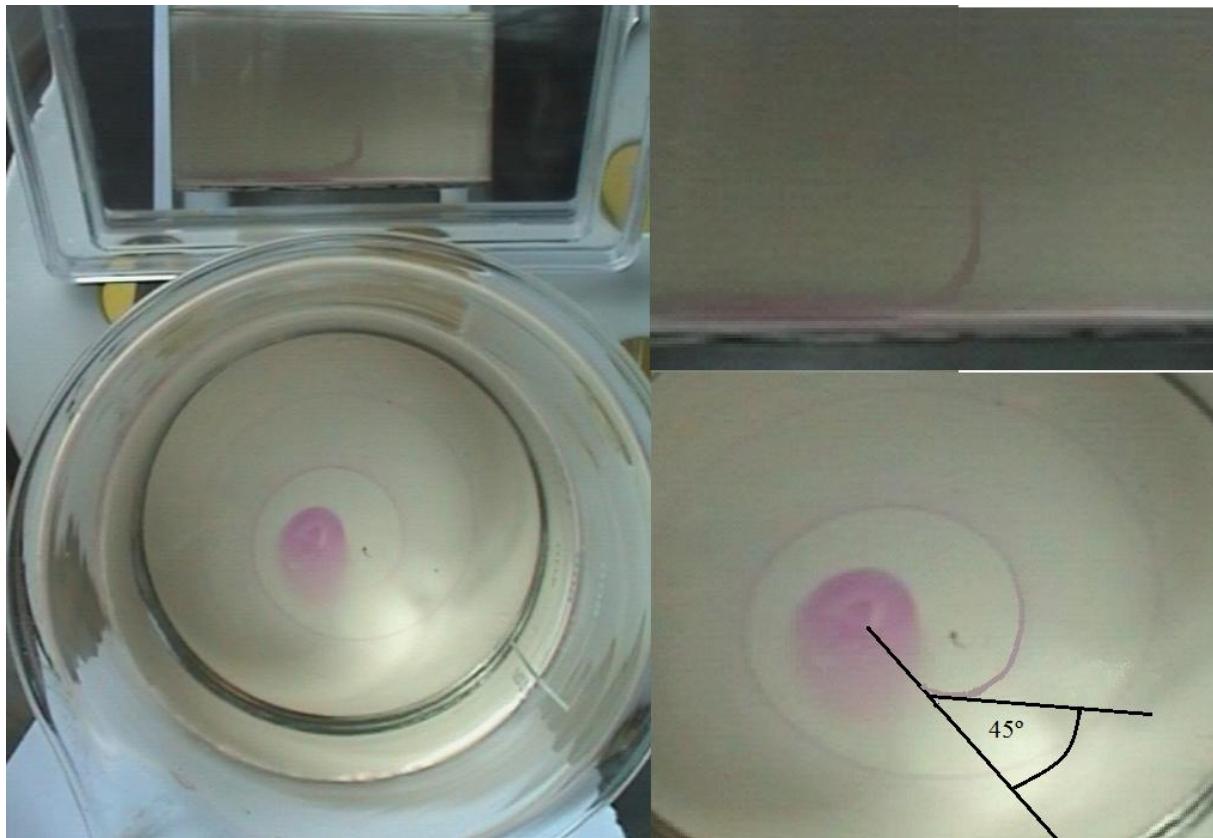
A_z je koeficijent vrtložne viskoznosti, koji za vodu ima vrednost $10^{-6} \frac{m^2}{s}$, dok za glicerin ima vrednost $0,6 \frac{m^2}{s}$. Uvrštavanjem ovih vrednosti u formulu za Ekmanovu dubinu dobiju se vrednosti:

$$\text{za vodu: } D_E = 0,005 \text{ cm}$$

$$\text{za glicerin: } D_E = 4,17 \text{ cm}$$

Upoređivanjem eksperimentalno dobijene visine spirale, tj. dubine sloja sa računski dobijenom dubinom, vidimo da se vrednosti jako dobro slažu.

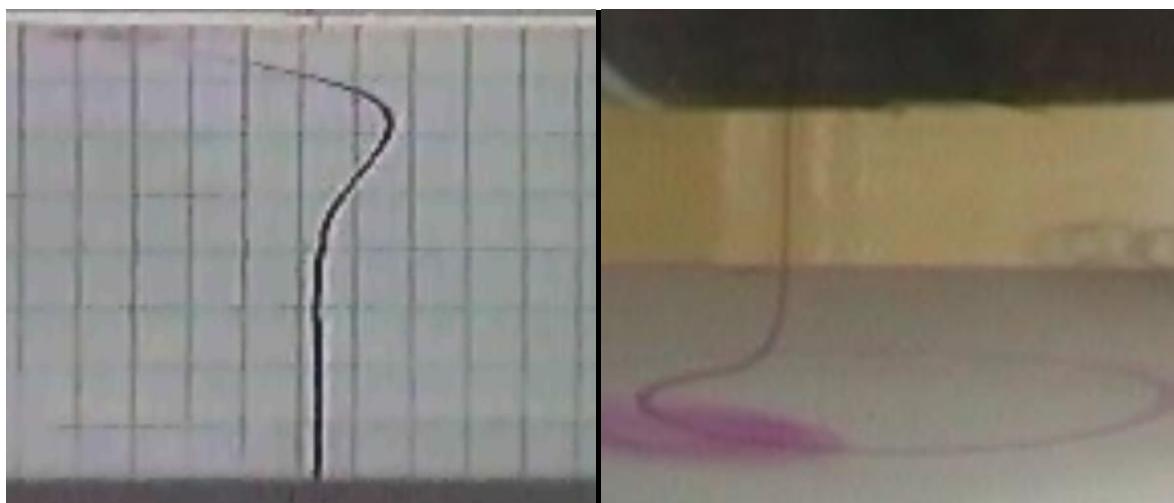
Kako se postavlja Ekmanova spirala? Pošto je u eksperimentu dno posude sredina koja prenosi smicanje na ispitivani fluid, po Ekmanovom rešenju vektor brzine najnižeg sloja u fluidu treba da stoji pod uglom od 45° u odnosu na vektor brzine kretanja površine (u našem slučaju dna posude). (slika 5.3)



Slika 5.3 Ekmanova spirala na dnu

Na slici 5.3 se vidi da usled spuštanja boje, dolazi do njenog taloženja na dno, ali se usled rotacije, Ekmanovim transportom boja izbacuje iz centra ka zidovima. Tangenta na dnu, nacrtana na krugu koji pravi Ekmanov transport, pokazuje da je skretanje pod uglom od 45° u odnosu na smer kretanja dna.

Kod orginalnog izvođenja Ekmanove spirale, vetar duva ka severu, a površinska vodena struja se kreće u desno za oko 45° . Po prepostavci, na dnu Ekmanovog sloja se voda kreće suprotno ukupnom transportu vode (koji je usmeren ka istoku), odakle sledi da je na dnu Ekmanovog sloja, vodena stuja usmerena ka zapadu. Zbog toga se na površinoj spirali javlja ugao obrtanja od oko $270^\circ - 45^\circ = 225^\circ$. Kod korišćene eksperimentalne postavke, tj. kod donje Ekmanove spirale, dno se kreće u jednu stranu, a tečnost zbog inercije kasni i kreće se u suprotnom smeru u odnosu na smer kretanja dna. Zbog toga se ugao obrtanja spirale u donjem delu dobije u vrednosti od oko $180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$. Ova razlika se vidi kada se uporede Ekmanova spirala stvorena na dnu i Ekmanova spirala dobijena na površini usled duvanja vetra. Kod spirale na površini, kada se spirala gleda u vertikalnom preseku, se primećuje da kod završetka spirale u blizini graničnog sloja, postoji zakrivljenje koje se stvara u suprotnom smeru u odnosu na površinski smer, dok ovog zakrivljenja, u donjoj Ekmanovoj spirali stvorenem kretanjem dna, nema. Videti slike (5.4).



Slika 5.4 (Levo)Spirala stvorena duvanjem vetra na površini tečnosti, a (desno) spirala stvorena kretanjem dna.

Na slici 5.4 se vidi da se kod završetka spirale na površini javlja zakrivljenje u suprotnom smeru u odnosu na površinski smer kretanja, a da tog zakrivljenja završetka u spirali na dnu

nema. Spirala nema početnog pregiba na "dnu", gde se pomenuta reč "dnu" odnosi na visinu do koje se oseća uticaj trenja između slojeva tečnosti.

Prilikom rotacionog kretanja uočava se i to da se tečnost kroz sredinu spušta, a na zidove posude diže. Šta je uzrok tome i šta se dešava? Usled rotacije tečnosti, dolazi do Ekmanovog transporta u desno od smera kretanja dna. Na taj način, dolazi ili do konvergencije (nagomilavanja) mase tečnosti ka centru pri dnu, uslovjavajući da se nagomilana voda kreće na gore ili do divergencije (razilaženja) mase tečnosti, što dovodi do spuštanja tečnosti sa vrha kroz sredinu tečnosti.



Slika 5.5 Ekmanov tok u rotirajućem (LEVO) i zaustavljenom (DESNO) sistemu.

Na dnu se vidi zakriviljenost boje, ali posmatrajući smer rotacije dna i sloja tečnosti iznad, kao kretanja suprotnih smerova, može se reći da je zakriviljenost boje u desno. U rotirajućem sistemu, dolazi do spuštanja tečnosti sa vrha na dno, kroz sredinu. Ovde kažemo da je došlo do divergencije tečnosti pri dnu posude. Ovo se dešava sve dok se ne uspostavi ravnotežno rotiranje tečnosti sa posudom.

Kada zaustavimo rotiranje, posuda se zaustavlja, a tečnost nastavlja da se kreće po inerciji. Sada sistem može da se gleda i drugačije – može se posmatrati kao da tečnost stoji, a da se dno (posuda) kreće samo što je smer kretanja suprotan. Tečnost se spušta niz zidove i pri dnu se kreće ka centru posude povlačeći za sobom i boju. Nagomilavanjem tečnosti u centru

(konvergencija), voda se podiže zajedno sa bojom i stvara se vidljivi trag kretanja tečnosti, što se u ogledalu i vidi pomoću nagomilane boje. (Videti sliku 5.5 desno). Ovaj eksperiment se može pogledati na DVD-u pod nazivom (EkmTransport_excententricno.avi).

Hteli smo da probamo šta se dešava kada posudu sa eksperimentalnom tečnošću stavimo na osu rotacije. Tom prilikom smo boju morali da sipamo ekscentrično od centra rotacije.

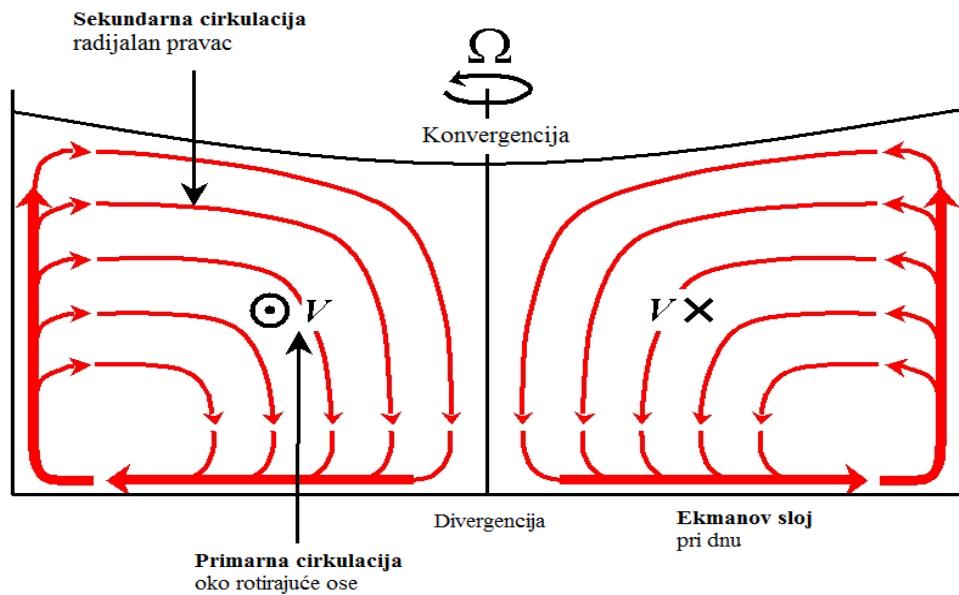
Nakon sisanja boje i stvaranja niti, uključujemo rotirajući točak na obrtanje oko 20 obrtaja u minutu. Na dnu dolazi do povlačenja donjeg sloja tečnosti što izaziva trenje između slojeva. Na taj način dolazi do smicanja tečnosti na dnu, stvarajući spiralu. (slika 5.6)



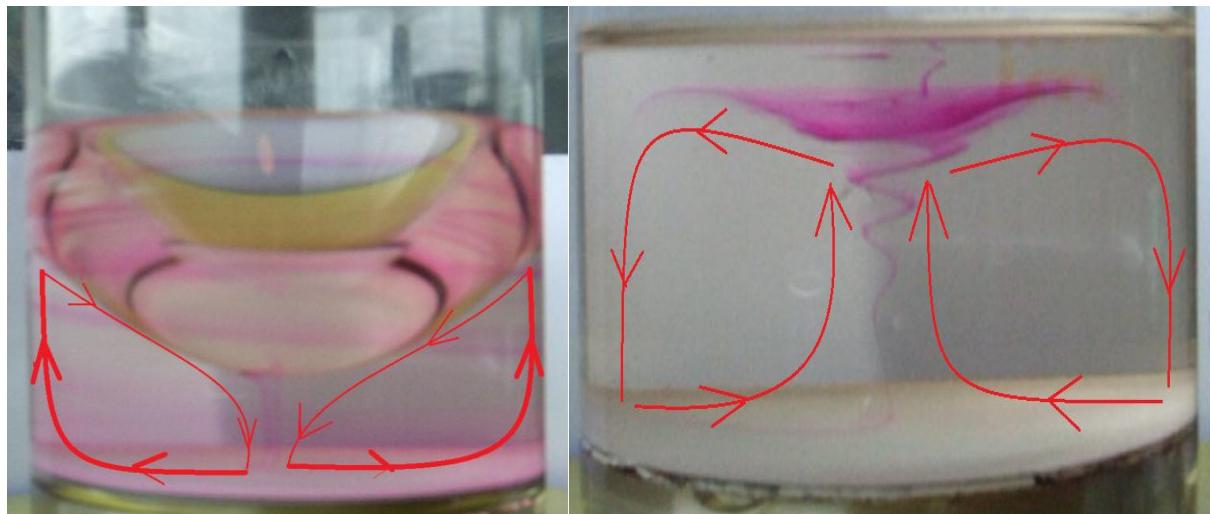
Slika 5.6 Ekmanova spirala prilikom posude postavljene na osu rotacije

Uz ovu sliku ide i video snimak (Ekmanova_spirala_centerrotacije.avi).

Kada smo ubrazavalili rotirajući točak, na oko 150 obrata u minuti, došlo je do divergencije tečnosti na dnu. Ekmanov transport uvlači boju kroz sredinu i izbacuje je sa strane. Primećuje se da boja "izlazi" ka zidu posude i da se boja penje uza zid. (slika 5.7 i slika 5.8 levo)



Slika 5.7 Cirkulacija tečnosti u rotirajućoj posudi i njena divergencija pri dnu



Slika 5.8 (Levo) Divergencija tečnosti i (desno) konvergencija tečnosti pri dnu

To se dešava sve dok se ne uspostavi ravnoteža okretanja tečnosti sa posudom. Po zaustavljanju rotirajućeg točka, dolazi do konvergencije tečnosti na dnu i boja se kreće suprotnim smerom. Boja se nagomilava i podiže kroz centar stvarajući spiralu na vrhu (slika 5.8 desno). Spirala na površini je jako široka zbog uticaja Ekmanovog transporta koji je nosi ka zidovima.

Uz sliku 5.8 je priložen i video snimak (*Ekman-konv_i_div.AVI*) na DVD-u.

DILEMA: U sistemu koji ubrzavamo, Koriolisova sila i centrifugalna sila su istog smera i zbog toga oba člana, na dnu, izbacuju tečnost iz centra na stranu. Kada se zaustavi rotacija sistema, kretanje uz povšinu tla je u suprotnom smeru, pa je Koriolisova sila usmerena ka centru, a centrifugalna sila je i dalje usmerena ka spolja. Zbog ovog objašnjenja može se jasno i sa sigurnošću reći da zakretanje ne vrši centrifugalna sila, već Koriolisova sila.

Nakon završenog eksperimenta, blagim mešanjem tečnosti, natrijum hidroksid iz boje se razblaži sa vodom i usled smanjenja bazičnosti eksperimentalne tečnosti, fenoftalajn gubi boju i eksperimentalna tečnost postaje ponovo providna i spremna za novi eksperiment.

Problemi koji su se javljali prilikom izvođenja eksperimenta su osvetljenje, jer se na snimcima javljaju nepotrebni bljeskovi zbog toga što nismo mogli dobiti homogenu difuznu svetlost. Zatim, postavljanje kamere i držača za kamere na rotirajući sistem i uspostavljanje centra rotacije je zadavao dosta veliki problem. Pronalaženje optimalne gustine boje za eksperiment je bilo vrlo teško naći, jer se boja brzo spuštala i tako spuštala spiralu na dno. Još jedan problem koji se javljaо je bio način na koji se boja sipala u tečnost. U početku se ušpricavala boja sa špricom, zatim je pokušano sa izvlačenjem šprica sa dna, a kada se dobila zadovoljavajuća gustina tečnosti, samo se kašikom kane kap boje veličine nešto manje od zrna graška. Boja je tada polako padala i ostavljala intenzivan trag boje od vrha do dna tečnosti. Prilikom stavljanja posude ekscentrično od ose rotacije, javljaо se problem centra mase, pa se taj problem rešio stavljanjem protiv tega simetrično od posude na rotirajući točak.

Iako je Ekmanov sloj prvi put uočen na morskoj površini, a ne na dnu, ipak je urađen eksperiment na Ekmanovom dnu. Jedina razlika koja bi se dobila između Ekmanovog sloja na dnu i na površini je ta, što bi se u Ekmanovom sloju pri dnu dobila spirala sa uglom skretanja od 135° , a u Ekmanovom sloju na morskoj površini spirala bi pravila ugao od 225° . Još pri izvođenju eksperimenta treba obratiti pažnju na to da se tečnost pri dnu kreće, a ne na površini po predpostavljenom. Na internetu, na sajtu [6], se može naći film o gornjem Ekmanovom sloju i Ekmanovoj spirali koju stvara vetar. Vetar se uključuje odmah nakon puštanja vertikalne niti boje u tečnost. Na tom video snimku se stvaranje Ekmanove spirale izvodi iz stanja uravnotežene rotacije.

5 ZAKLJUČAK

Tema ovog diplomskog rada je bila prikazivanje Ekmanovog transporta i Ekmanovog sloja zbog njegovog izuzetnog značaja za definisanje visine, tj. dubine do koje se oseća uticaj vетра (u našem eksperimentalnom slučaju uticaj dna) na posmatranu tečnost. Uz aproksimacije koje karakterišu ovaj sloj, Navije–Stoksove jednačine nam daju rešenja koja matematički opisuju oblik brzine kretanja tečnosti u zavisnosti od visine. Prilikom izvršenja eksperimenta, Ekmanova spirala je vizuelni posrednik koji nam omogućava da se Ekmanov sloj vidi i opišu njegove karakteristike. Način na koji se uticaj vетра prenosi na morskou površinu (u našem eksperimentalnom slučaju: uticaj dna na donji sloj vode) je putem molekularne viskoznosti, a način na koji se uticaj površine prenosi u dublje sloje vode je preko turbulencije. U radu je prikazan uticaj Ekmanovog transporta na kretanje velikih vodenih tokova kao što su upwelling i downwelling. Prilikom različitih vremenskih uslova, kao što su ciklon ili anticiklon i usled različitog smera kretanja vетра u ovim sistemima, Ekmanovim transportom dolazi do izviranja ili poniranja vode, jednom rečju, dolazi do Ekmanovog pumpanja. Prostorna promenljivost transporta u otvorenom okeanu dovodi do izviranja i uviranja vode, koji dovodi do redistribucije mase u okeanu, koji dalje vodi ka geostrofskoj cirkulaciji struja pomoću Ekmanovog pumpanja. Pilikom realizacije eksperimenta, bazirano je na dobijanju donjeg Ekmanovog sloja i spirale, kao i Ekmanovog transporta mase. Eksperimentalna realizacija Ekmanove spirale i Ekmanovog transporta je moguća samo od momenta uključivanja mirne posude do uspostavljanja konstantne rotacije. Nit boje se formira u stajaćoj vodi i kada se uključi rotirajući točak, nit boje deformiše i stvarajući Ekmanovu spiralu. Prikaz Ekmanovog pumpanja i uvlačenja se javlja pri uspostavljanju konstante brzine rotacije eksperimenta oko ose rotacije.

Ovaj rad je uspešno izveden u eksperimentalnoj laboratoriji katedre za eksperimentalnu fiziku na departmanu za fiziku na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Aparatura za ponavljanje eksperimenta je dostupna, a uslovi za eksperiment su lako ponovljivi. Ekmanova spirala i transport se danas uključuju prilikom raznih merenja upwellinga za kupače i ribolovce, ali sada tu opciju koriste i klimatolozi za proračunavanje kako smera kretanje ledenih bregova, tako i uticaja koji upwelling i downwelling mogu da izazovu na otapanje lednika i glečera.

6 LITERATURA

1. Introduction To Physical Oceanography, Robert H. Stewart, Department of Oceanography Texas A & M University, September 2005 Edition, 105-149, 207-212
2. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, “Physical and Numerical Aspects”, Benoit Cushman-Roisin and Jean-Marie Beckers, November 5, 2006, 217-245
3. Circulation of the Atmosphere and Ocean: an introductory text by John Marshall and Alan Plumb Massachusetts Institute of Technology, September 3, 2004, chapter 7 and chapter 10
4. Physical Oceanography Notes, Barry A. Klinger, George Mason University, Fall, 2003; Spring, 2006, chapter 1
5. A Laboratory Demonstration of Coriolis Effects on Wind-Driven Ocean Currents, By David Beesley, Jason Olejarz ,Amit Tandon, and John Marshall, 2008;
6. Internet stranice:
 - <http://go.owu.edu/~physics/StudentResearch/2003/CoryCasto/home.html>
 - <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/>
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Ekman_transport
 - <http://www.math.ualberta.ca/%7Egfd/eifl/teaching/ekman/>
 - http://www-paoc.mit.edu/labweb/lab8/gfd_9.htm

Biografija



Bojan Lazarević je rođen u Bačkoj Topoli 11.04.1986. godine, gde je i odrastao sa sestrom Suzanom i roditeljima Natašom i Nebojšom Lazarević. 1993. godine je upisao osnovnu školu „Čaki Lajoš“ u Bačkoj Topoli nakon koje upisuje gimnaziju „Dositej Obradović“ 2001. godine. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja, 2005. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, odsek fizika, smer meteorologija i modeliranje životne sredine.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

7 ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Bojan Lazarević

dr Imre Gut, van.profesor

Ekmanov transport u fluidima

srpski (latinica)

srpski/engleski

Republika Srbija

Vojvodina

2010

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

6 poglavlja/56 strana/6 literalnih citata/1 tabela/28 slika/0 grafik/

Fizika

Meteorologija

Ekmanov sloj, Ekmanov transport, vrtložna viskoznost, napon veta, Ekmanovo pumpanje, izviranje i poniranje vode

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

Cilj ovog rada je da se prikažu rešenja koja opisuju Ekmanovu brzinu po različitim slojevima, zatim, ukupan Ekmanov transport, Ekmanovo pumpanje, izviranje i poniranje vode. Takođe je u radu prikazana mogućnost eksperimentalne analize Ekmanove spirale, Ekmanovog transporta i njihovi vizuelni prikazi u obliku slika i video snimaka.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Imre Gut, van.profesor

član:

dr Agneš Kapor, redovni prof.

član:

dr Sonja Skuban, van.profesor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Note:

N

Abstract:

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Monograph publication

Textual printed material

Final paper

Bojan Lazarević

Ph.D. Imre Gut, Associate profesor

Ekman's transport in fluids

Serbian (Latin)

English

Republic of Serbia

Vojvodina

2010

Author's reprint

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

6 chapters/56 pages/6 literature /1 tables/28 pictures/0 graphs/

6 poglavlja/6

Physics

Meteorology and Environmental Modeling

Ekman's layer, Ekman's transport, eddy viscosity, wind stress, Ekman pumping, upwelling and downwelling

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

none

The point of this work is to show mathematical form which describes the velocity in Ekman's layer, further, Ekman's transport, Ekman's pumping, upwelling and downwelling of water. Also, in this work is presented the observation possibility and experimental analysis of Ekman's spiral, Ekman's transport and a visual show such as pictures and video movies.

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Ph.D. Imre Gut, Associate profesor

Member:

Ph.D. Agneš Kapor, full prof.

Member:

Ph.D. Sonja Skuban, Associate profesor