

obujmi trokutom kojemu je svaka stranica razdijeljena na deset jednakih dijelova – to je tzv. trokut miješanja. Vrhovi trokuta ukazuju na termohaline indekse izvornih vodenih masa – u prikazanom primjeru vodene mase su A (11,5 °C; 35,05), B (2,2 °C; 33,80) i C (2,9 °C; 34,85). Sekundarne težišnice, povučene iz polovišta one stranice trokuta miješanja koja povezuje termohaline indekse krajnjih vodenih masa, daju dubine granice među vodenim masama (u prikazanom primjeru to je 200 m između vodenih masa A i B te 1000 m između vodenih masa B i C). Naposljetku, postotni udio vodenih masa na određenoj dubini dobije se projekcijom termohalinog indeksa na stranice trokuta miješanja (u točki označenoj na slici zabilježeno je 25 % vodene mase A, 58 % vodene mase B i 17 % vodene mase C).

3. Postupak za veći broj vodenih masa predstavlja jednostavno poopćenje ovdje opisanih postupaka.

Uobičajeno je da se pri analizi *TS* krivulja ne uzima u obzir površinski sloj mora, čija je dubina oko 100 m. Taj sloj, sa svojom promjenjivošću, nije uzet u obzir pri rješavanju direktnog problema. Stoga je korektno izostaviti ga i iz rješavanja indirektnog problema.

Ovdje izložena analiza vodenih masa predstavlja tek osnovu na koju se nadovezuje niz drugih metoda. Umjesto da se promatraju parovi saliniteta i temperature mjereni duž vertikale, radi se ponekad s parovima izmjerenima duž odabranog horizontalnog pravca ili zabilježenima u vremenu u jednoj točki. Neki autori grupiraju *TS* krivulje. Počevši od R. B. Montgomeryja (1958), razvijaju se metode statističke *TS* analize koje kombiniraju podatke o termohalnim indeksima vodenih masa s informacijom o volumenima vodenih masa.

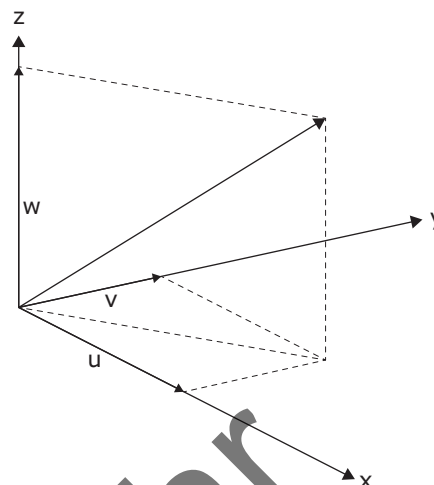
2.6. Struje

Morske se struje najčešće promatraju u pravokutnom koordinatnom sustavu, kojemu su osi *x* i *y* položene u horizontalnoj ravnini, a os *z* je usmjerena vertikalno prema gore (slika 2.16). Komponente struje u takvom sustavu su *u* (duž osi *x*), *v* (duž osi *y*) te *w* (duž osi *z*), a daju se u m/s ili u cm/s. Horizontalne komponente morskih struja u pravilu su znatno veće od vertikalne komponente ($u, v \gg w$) pa se mnoge metode bave određivanjem isključivo horizontalnih komponenata. Često se horizontalna struja promatra kao vektor određen brzinom (*c*) i smjerom (δ), koji su ovako definirani:

$$c = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \delta = \arctg\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2.13)$$

pri čemu je os x usmjerena prema istoku, a os y prema sjeveru. Smjer se u pravilu preračunava u kut što ga vektor struje zatvara prema sjeveru. Kad se taj smjer iskazuje deskriptivno, izriče se strana svijeta prema kojoj struja teče.

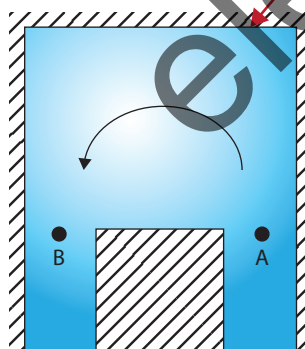
Za mjerenje struja u moru na raspolaganju su tri vrste metoda: indirektna metoda, direktna metoda po Lagrangeu i direktna metoda po Euleru. Razmotrimo redom ove metode.



Slika 2.16. Dekompozicija struje na tri komponente (u , v i w) u pravokutnom koordinatnom sustavu.

Indirektna metoda

Prilikom primjene indirektnih metoda informacija o strujama dobiva se iz raspodjele svojstava mora. Najčešće se kao takva svojstva koriste salinitet i temperatura, a razlog zbog kojeg su indirektna metoda uvijek bile popularne leži u činjenici da je mjerenje svojstava mora najčešće lakše provesti od mjerenja struja.



Prva metoda iz ove grupacije oslanja se na kvalitativnu analizu podataka o salinitetu i temperaturi. Na primjer, ako se promatra neki obalni bazen koji je povezan vratima A i B s otvorenim morem (slika 2.17), ako u taj bazen utječe relativno hladna riječna voda, te ako je pronađeno da je voda u vratima B nižeg saliniteta i manje temperature nego u vratima A, može se zaključiti da je strujanje usmjereno od A prema B – tj. da je strujanje ciklonalne (protusatne) orijentacije. To je način na koji je A. Gavazzi (1914)

Slika 2.17. Strujanje (*crna strelica*) u obalnom bazenu koji je dvojim vratima (A i B) povezan s otvorenim morem. U bazen dotječe relativno hladna riječna voda (*crvena strelica*), a mjerenjem je utvrđeno da je voda u vratima B nižeg saliniteta i manje temperature nego u vratima A.

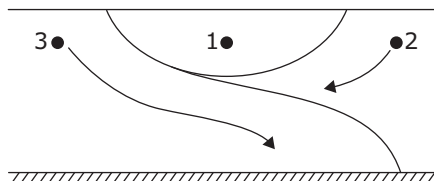
zaključio da je strujanje na površini Riječkog zaljeva ciklonalno tijekom zime, koristeći podatke koji su bili prikupljeni na prvim hrvatskim oceanografskim ekspedicijama provedenima brodom *Vila Velebita* 1913. i 1914. godine.

Nešto je egzaktnija metoda zasnovana na analizi vodenih masa pomoću *TS* dijagrama. Poznajemo li raspodjelu vodenih masa kao i njihovo izvorišno područje, možemo doći do zaključka o smjeru gibanja tih vodenih masa (kako je shematski prikazano na slici 2.18 za dvodimenzionalni slučaj).

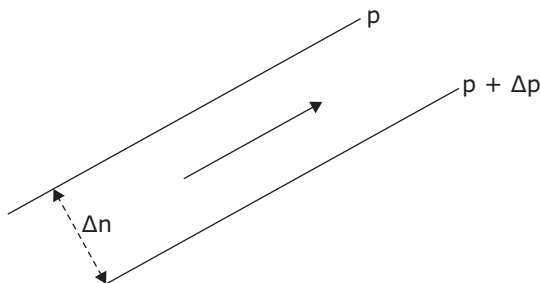
Svakako najvažnija metoda bazirana na podacima o salinitetu i temperaturi jest tzv. klasična metoda dinamičkog računa. Metoda se temelji na dvjema aproksimacijama – geostrofičkoj i hidrostatskoj. Prema geostrofičkoj aproksimaciji, horizontalna struja c povezana je s promjenama tlaka u horizontalnoj ravnini u skladu sa sljedećom relacijom:

$$c = \frac{1}{f\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (2.14)$$

gdje je: f – Coriolisov parametar ($f = 2\Omega \sin \varphi$), Ω – kutna brzina rotacije Zemlje ($7,29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), φ – zemljopisna širina, ρ – gustoća mora, Δp – razlika tlaka između dviju izobara, a Δn – udaljenost dviju izobara. Smjer struje δ je takav da struja ostavlja viši tlak s desne strane na sjevernoj hemisferi (slika 2.19), s lijeve strane na južnoj hemisferi. Dakle, za određivanje smjera i brzine struje potrebno je poznavati raspodjelu tlaka u horizontal-



Slika 2.18. Shematski prikaz triju vodenih masa (1–3) i strujanja o kojem se može zaključivati na osnovi položaja granica među vodenim masama (vertikalni presjek). U realnosti se gibanje ne odvija samo u dvije dimenzije, pa se recimo može očekivati da će na sjevernoj hemisferi struje biti otklonjene udesno te da se gibanje vodenih masa 2 i 3 neće odvijati u istom vertikalnom presjeku.



Slika 2.19. Ilustracija odnosa geostrofičke struje i izobara, na sjevernoj hemisferi.

noj ravnini, a ona se može odrediti uz upotrebu hidrostatske aproksimacije (2.7). Prema tome, iz mjerenja saliniteta i temperature može se izračunati gustoća pomoću jednadžbe stanja, izraz (2.7) tada omogućuje da se odredi raspodjela tlaka u horizontalnoj ravnini ako je poznata visina morske površine, a izraz (2.14) potom omogućuje da se odredi raspodjela struja u horizontalnoj ravnini. Na ovu ćemo se metodu još vratiti u ovoj knjizi. Spomenimo ovdje da je metoda razvijena u znanstvenim člancima što su ih objavili skandinavski autori, H. Mohn (1883) te J. W. Sandström i B. Helland-Hansen (1903). A njezino osnovno ograničenje je da se oslanja na dvije aproksimacije, geostrofičku i hidrostatsku: u situacijama u kojima tim aproksimacijama nije udovoljeno, metoda neće davati zadovoljavajuće rezultate.

Direktne metode po Lagrangeu

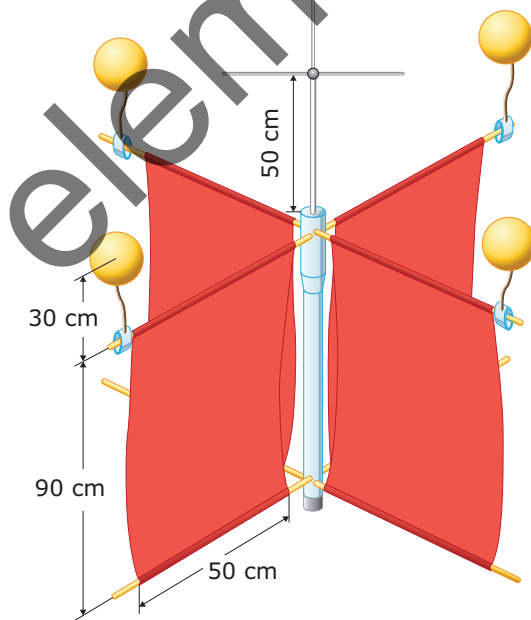
Ove su metode nazvane po talijanskom matematičaru i astronomu Josephu Louisu Lagrangeu. On se nije bavio mjerenjem struja u moru i nije konstruirao odgovarajuće mjerne instrumente, ali je razvio jedan od teorijskih pristupa istraživanju fluida na kojemu se zasnivaju i ovakva mjerenja. Riječ je o praćenju čestica fluida u prostoru i vremenu i određivanju **putanja**, odnosno **trajektorija**.

Jedna od najstarijih metoda iz ove grupacije oslanja se na praćenje zanošenja broda tijekom niza sukcesivnih dana. Na osnovi svakodnevnih brodskih podataka može se odrediti razlika između položaja broda izmjenjenog nekog dana i položaja broda izračunatog na osnovi podataka o položaju te o brzini i smjeru gibanja broda izmjenjenima prethodnog dana. Razlika izmjenjenog i izračunatog položaja daje brzinu i smjer površinske struje, a upotrebom podataka s niza brodova kroz dulje vremensko razdoblje može se odrediti polje površinskih struja. Metoda je postala praktična nakon što se započelo s redovitim i preciznim određivanjem ne samo zemljopisne širine nego i zemljopisne duljine, a to je bilo moguće nakon što je John Harrison krajem 18. stoljeća završio svoj rad na izumu kronometra. Nekoliko desetljeća nakon toga počelo je objavljivanje karata površinskih struja, a prvi su autori takvih karata bili J. Rennell (1832) i M. F. Maury (1855) – kako je prikazano na slikama 1.3 i 1.4.

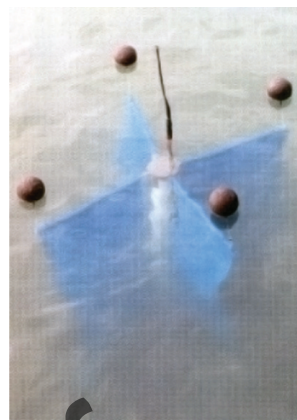
Još jedna rana metoda iz ove grupacije oslanja se na poruke u boci ili u plastičnoj ovojnici, kojima se moli nalaznika da javi mjesto i vrijeme pronalaska poruke. Na osnovi tog podatka, kao i podatka o mjestu i vremenu bacanja boce, odnosno plastične ovojnice, može se približno odrediti brzina i smjer površinske struje. Očigledno je da se tom metodom podcjenjuje brzina, ne samo zato što je procijenjena udaljenost u pravilu manja od stvarne udaljenosti nego i stoga što je procijenjeno vrijeme putovanja najčešće veće od stvarnog vremena putovanja.

U novije su se vrijeme ponekad koristile i boje bačene u more za određivanje ne samo brzine i smjera struje nego i za prikupljanje informacije o miješanju o moru. Pritom su se rabile boje koje su ekološki prihvatljive (recimo, *Rhodamine B*), ali je takva metoda zahtijevala stalnu prisutnost istraživačkog broda što ju je činilo složenom i skupom.

Lagrangianske su metode dobile na važnosti nakon što se počelo s razvojem instrumenata čiji se položaji mogu kontinuirano pratiti kroz dulja vremenska razdoblja. Jedan od takvih instrumenata je radioplutača koja emitira signale što se registriraju obalnim prijamnicima. Korisnim se pokazao i neutralno plutajući plovak koji se slijedi pomoću akustičkih prijamnika postavljenih na istraživački brod; tim je izumom J. C. Swallow (1955) silno unaprijedio istraživanje dubinskih struja. Međutim, danas su najviše zastupljeni tzv. drifteri, kako površinski (koji se prate sa satelita) tako i dubinski (koji periodički izlaze na površinu radi komunikacije sa satelitom). Jedan od najčešće korištenih površinskih driftera, onaj što ga je konstruirao R. E. Davis (1985), prikazan je na slici 2.20, a njegova je primjena ilustrirana slikom 2.21. Razvoj driftera počeo je nakon što je satelitska tehnologija omogućila redovito određivanje položaja širom Zemlje. Osobito se važnim pokazao Global Positioning System (GPS), koji – posebno u tzv. diferencijalnom modu rada – osigurava visoku preciznost određivanja položaja (± 1 m) i to s izvrsnom vremenskom rezolucijom. Drifteri su tijekom proteklih tridesetak godina omogućili stjecanje brojnih novih spoznaja o strujama u morima i oceanima.



Slika 2.20. Shematski prikaz površinskog driftera (prema: R. E. Davis, 1985).



Slika 2.21. Površinski drifter prije otiskivanja s istraživačkog broda *Bios* u studenom 2002. godine (*lijevo*) te u moru (*desno*, iz autorove arhive).

Direktne metode po Euleru

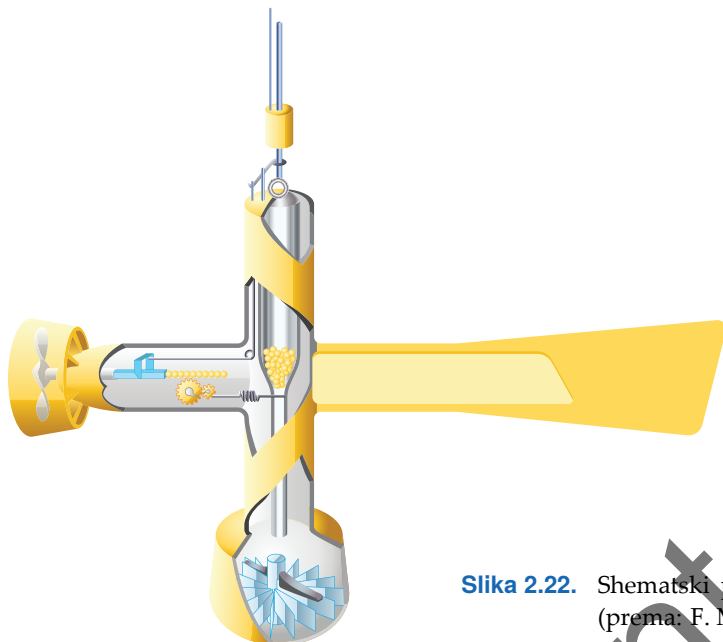
Naziv ovih metoda upućuje na njihovu povezanost sa švicarskim matematičarom, fizičarom i inženjerom Leonhardom Eulerom. Međutim, ni on se – kao ni Lagrange – nije bavio mjerenjem struja u moru niti konstruiranjem odgovarajućih mjernih instrumenata, nego je razvio svoj vlastiti teorijski pristup istraživanju fluida na kojemu se zasniva ovakav način mjerenja. Taj se pristup oslanja na određivanje brzine i smjera struje na pojedinim lokacijama unutar fluida, što predstavlja osnovu za iscrtavanje **strujnica**.

Eulerijanske se metode zasnivaju na instrumentima koji se zovu strujomjeri. Prvi prijedlozi za konstrukciju takvih instrumenata potječu iz početka 19. stoljeća. Međutim, mi ćemo ovdje prikazati način rada triju tipova strujomjera, koji su – svaki u svoje vrijeme – dominirali i hrvatskom fizičkom oceanografijom. Pritom su se najviše angažirali Institut za oceanografiju i ribarstvo iz Splita, Hrvatski hidrografski institut iz Splita, Centar za istraživanje mora Instituta „Ruđer Bošković“ iz Rovinja te Geofizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Od starijih strujomjera najrašireniji je bio onaj što ga je konstruirao V. W. Ekman (1905b, 1932). Taj je mehanički strujomjer shematski prikazan na slici 2.22. Glavni dijelovi instrumenta su propeler, kompas i krilo. Strujomjer se blokiran spušta s broda u more. Na određenoj se dubini aktivira pomoću utega koji se spušta niz žicu na koju je ovješena instrument. Propeler se okreće, što se registrira na brojčaniku; broj okretaja u nekom vremenskom intervalu kalibracijskim je faktorima vezan za brzinu struje:

$$c = a + bn \quad (2.15)$$

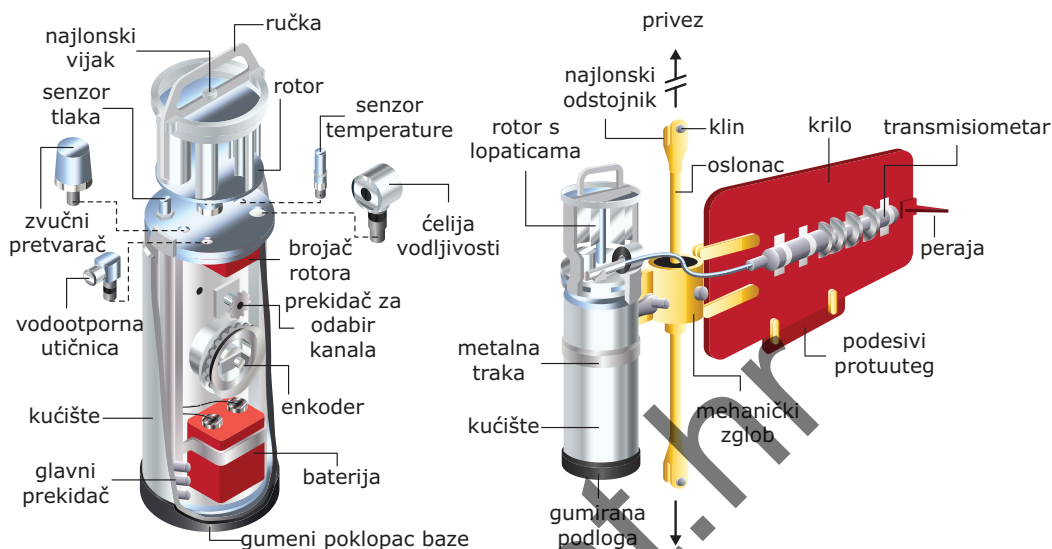
gdje je n broj okretaja propelera u jedinici vremena dok su a i b kalibracijski faktori. Kako



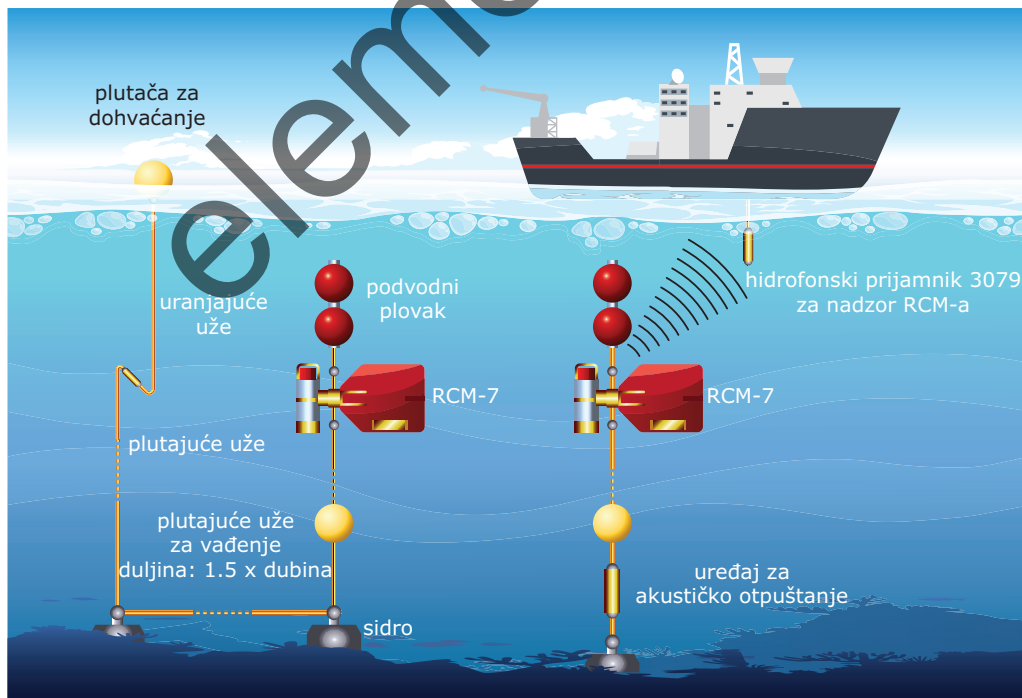
Slika 2.22. Shematski prikaz strujomjera tipa Ekman (prema: F. Mosetti, 1964).

se propeler okreće, iz spremišta se ispuštaju male bronzane kuglice. One padaju na magnetsku iglu, kotrljaju se po njezinom jarku i ulaze u odjeljke koji su smješteni pri dnu instrumenta i čiji položaj ovisi o tome kako je krilo postavilo instrument u smjer struje. Iz raspodjele kuglica po odjeljcima određuje se smjer struje. Nakon što protekne zadani vremenski interval, strujomjer se zaustavlja pomoću drugog utega. Nedostatak instrumenta je da samo jedan može biti obješen o žicu, da ga treba iznositi na površinu za svako očitavanje, a problemi se mogu pojaviti i s magnetskom iglom ako se mjerenje obavlja s metalnog broda. Osim toga, rad je nemoguć ako su vremenske prilike loše, pa se takvim strujomjerom ne mogu dokumentirati vjetrovne struje, tj. njime se prakticira ono što se zove oceanografijom lijepog vremena.

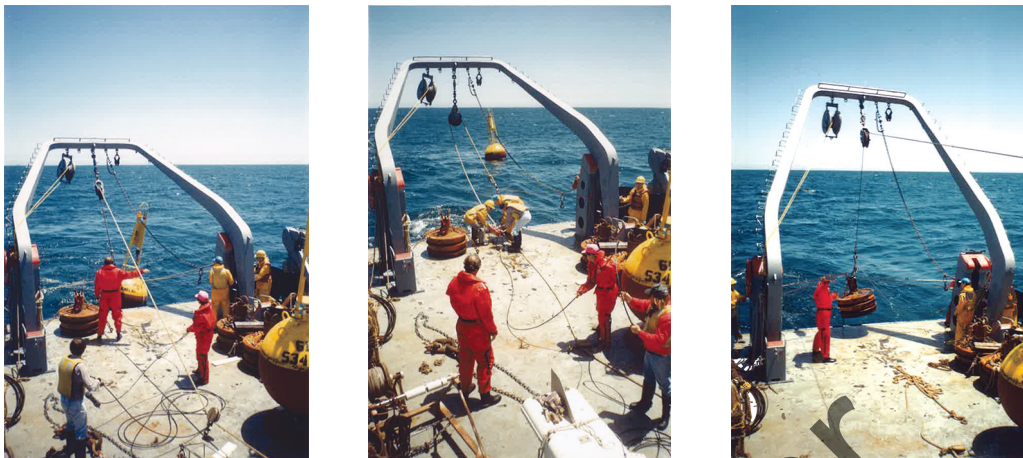
Radi otklanjanja ovih nedostataka konstruiran je niz drugih strujomjera te su razvijeni sustavi koji omogućuju njihov rad u moru kroz dulja vremenska razdoblja. Jedan od popularnijih takvih instrumenata bio je autonomni strujomjer (slika 2.23) koji se koristio u kombinaciji s pripadnim sidrenim sustavom (slika 2.24), a sve je razvio I. Aanderaa sa suradnicima u svojoj, norveškoj kompaniji početkom 1960-ih godina. Senzori ovog instrumenta su rotor s vertikalnom osi, kompas i krilo, a uzorkovanje je kontrolirano kvarcnim satom. Instrument se postavlja u more obješen na usidrenu plutaču (slika 2.25) te vrši mjerenja brzine i smjera struje tijekom nekoliko mjeseci. Nakon konverzije u električne signale podatci se pohranjuju na magnetskom mediju. Po svršetku mjerenja zapis se vadi iz strujomjera i očitava, a dobivene se veličine pomoću kalibracijskih izraza preračunavaju u vremenske iznose brzine i smjera struje. Preciznost takvog određivanja brzine (± 1 cm/s) i smjera ($\pm 5^\circ$) pokazala se izvrsnom. Treba naglasiti da se na istu vertikalu može



Slika 2.23. Shematski prikaz strujomjera tipa Aanderaa (prema: W. J. Emery, R. E. Thomson, 1997): unutrašnjost mjernog uređaja (*lijevo*) te vanjski izgled cijelog instrumenta (*desno*).



Slika 2.24. Dva načina sidrenja autonomnih strujomjera (prema: Aanderaa Instruments, 1988a): U-sidrenje (*lijevo*) te I-sidrenje (*desno*).



Slika 2.25. Tri faze u postavljanju strujomjerne postaje u more (istraživački brod R. G. Sproul, Tihi ocean, svibanj 1993.): otiskivanje plutače (lijevo), spuštanje strujomjera u more (sredina) te otpuštanje sidra i postavljanje cijele vertikale u more (desno, iz autorove arhive).

nanizati nekoliko strujomjera, pa se istovremeno dobivaju podatci s raznih dubina. Sve je to predstavljalo veliki napredak u odnosu na rad s ranijim, mehaničkim strujomjerima, ali je imalo i neke nedostatke: ribari su često svojim mrežama zahvaćali strujomjerne postaje što je dovodilo do gubitaka ne samo instrumenata nego i podataka, a mjerenja su se mogla vršiti na samo nekoliko dubina – dakle, nije bilo moguće zabilježiti kontinuirani profil struja s dubinom.

Daljnji je napredak ostvaren razvojem nove generacije strujomjera, tzv. akustičkih strujomjera, kao i novih uređaja za njihovo postavljanje u more. Akustički se strujomjeri u anglo-američkoj literaturi često nazivaju pokratom ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), prema instrumentima što ih je 1980-ih godina razvila američka kompanija RD Instruments. Princip rada takvog strujomjera prikazan je slikom 2.26, a riječ je o modelu koji se postavlja na dno mora. Uređaj emitira zvučne valove koji putuju prema površini mora. Valovi se reflektiraju na plutajućim česticama i na planktonu u moru te se dijelom vraćaju prema instrumentu koji registrira odjek s raznih dubina. Budući da taj odjek potječe prvenstveno od pasivnih plivača u moru, brzina struje u smjeru gibanja vala može se odrediti iz frekvencijskog pomaka reflektiranog vala u odnosu na emitirani val:

$$\Delta v = 2vV/C \quad (2.16)$$

gdje je v frekvencija zvučnog vala, V je relativna brzina instrumenta i pasivnog plivača na kojem se val reflektira (koja je pozitivna kad se taj plivač primiče instrumentu), a C je brzina zvuka u moru. Frekvencije variraju od nekoliko desetaka kiloherca (kad se radi



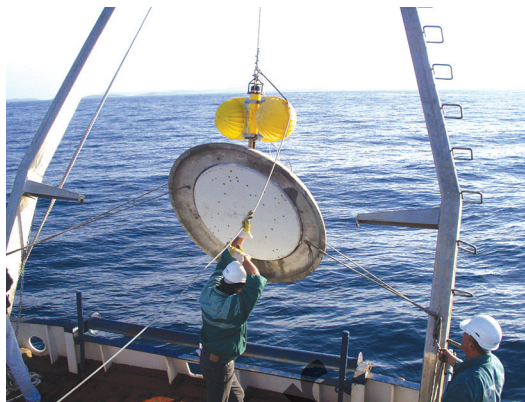
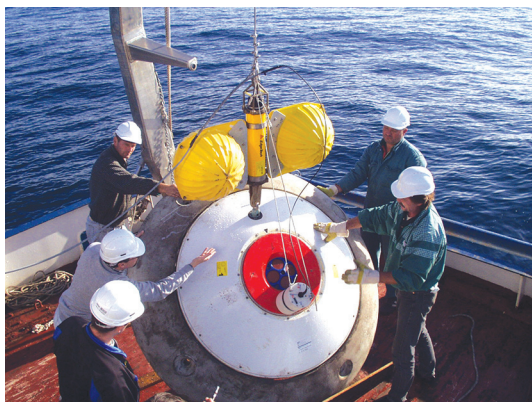
Slika 2.26. Shematski prikaz rada akustičkog strujomjera postavljenog na dno mora (prema: Aanderaa Instruments, 1996).

u dubokom moru) do nekoliko tisuća kiloherca (pri radu u plitkom moru). Da bi se dobila informacija o tri komponente strujanja, potrebna su tri različito usmjerena senzora. U praksi se radi s četiri senzora, što omogućuje provjeru kvalitete prikupljenih podataka. Akustički strujomjer može se na dno postaviti npr. u uređaj što su ga razvili H. Perkins *et al.* (2000), a koji se sastoji od plovka (u kojem se nalazi strujomjer), kućišta (u kojem su smješteni otpusnici) te sidrenog bloka (slika 2.27). Takav uređaj ne predstavlja prepreku



Slika 2.27. Jedan način postavljanja akustičkog strujomjera na dno mora i njegovog vađenja iz mora (uređaj su razvili H. Perkins *et al.*, 2000).

postavljanje



vađenje



Slika 2.28. Postavljanje i vađenje akustičkog strujomjera u srednjem Jadranu, istraživački brod *Bios*, studeni 2002. godine (*gore*) i svibanj 2003. godine (*dolje*, iz autorove arhive).

ribarskim mrežama, a akustičkim se strujomjerom dobiva kontinuirani profil struja s dubinom, pa su tako riješena dva velika nedostatka ranijih mjerenja autonomnim strujomjerima. Ovakav strujomjer u kombinaciji s opisanim uređajem za njegovo postavljanje u more omogućio je da se u Jadranu započne s mjerenjem struja tijekom dugih vremenskih razdoblja, najprije tijekom šest mjeseci (slika 2.28), a potom i dulje. Inače, akustički se strujomjer može koristiti ne samo tako da 'gleda' prema gore nego i tako da 'gleda' prema dolje – recimo, postavljanjem na dno broda, pri čemu treba uzeti u obzir korekciju za brzinu i smjer gibanja broda.