

Fizikalna oceanografija v Sloveniji: kratek oris ob petindvajsetletnici delovanja Slovenskega društva za geodezijo in geofiziko

Matjaž Ličer*, Dušan Žagar** in Vlado Malačič

V tem prispevku bomo orisali nekatere ključne korake v razvoju fizikalne oceanografije v Sloveniji. Pri tem se bomo zlasti naslonili na eksperimentalne in modelske napore, ki so v preteklih desetletjih potekali na Morski biološki postaji (MBP) Nacionalnega inštituta za biologijo, na numerične modele morja, ki so jih in jih še razvijajo na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG). Izpostavili bomo tudi morske merilne postaje, ki danes delujejo v okviru Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Kot bomo videli, lahko zaradi omenjenih naporov danes trdimo, da slovensko morje, vsaj kar se tiče postavitve in gostote merilnih postaj in numeričnih modelov, sodi med dobro pokrita območja. Če pomislimo, da je slovensko morje plitko ter izpostavljeno številnim antropogenim pritiskom (luki v Kopru in Trstu, poseljenost obalnega pasu, rast turizma in pomorskega prometa), je to nadvse dobrodošlo dejstvo, saj brez tovrstnih podatkov ni mogoče sprejemati utemeljenih odločitev o trajnostnem ravnanju z morjem.

Opazovanja

Med zaslužnimi, ki so utirali pot meritvam fizikalnih parametrov in lastnosti severnega Jadrana, s tem pa tudi slovenski oceanografiji, velja izpostaviti morskega biologa prof. dr. Jožeta Štirna, ki je leta 1965 vodil prva sistematska vzorčenja stanja morja v severnem Jadranu. Rezultate teh vzorčenj je kasneje (1968) obravnaval geograf France Bernot ter v besedilu opisal razširjenost oslajene vode, ki izteka iz ustja reke Pad.

V letu 1970 se je prof. Štirn vključil v delo Morske biološke postaje (MBP), ki je bila tedaj ustanovljena v okviru Inštituta za biologijo Univerze v Ljubljani. Prof. Štirn je MBP v obdobju 1970-1977 tudi vodil. Z ustanovitvijo MBP je oceanografija kot znanstvena panoga dobila svoj prvi institucionalizirani oziroma znanstveni prostor. To ni zanemarljivo, saj so za uspešno znanstveno delo potrebni tako usposobljeno osebje kot primerna infrastruktura.

Prve uspešne in zabeležene meritve tokovanja so raziskovalci MBP opravili v letih 1986-1987, čeprav so bili prvi, a žal neuspešni poskusi, opravljeni že v sedemdesetih letih. V devetdesetih letih so vpeljali redna mesečna vzorčenja Tržaškega zaliva, ki so predpogoj za analizo sezonske dinamike stanja morja. Leta 1991 so na MBP vpeljali prve sistematične meritve slanosti s t.im. 'file scale profiler' sondo (University of Western Australia, Perth), boljše izvedenko 'CTD' sonde (conductivity, temperature depth), ki so temeljile na meritvah električne prevodnosti morske vode. Pred tem so slanost merili z določevanjem koncentracije kloridov v morski vodi. S tem so si odprli vrata v kvantitativno obravnavo stratifikacije (vertikalnega profila gostote) vodnega stolpca in zalivske geostrofske cirkulacije, o čemer je v devetdesetih letih pisal prof. dr. Vlado Malačič.

V letu 2000 so na pozicijo današnje boje Vida (dva kilometra severno od Piranskega rta Madona) postavili prvo testno oceanografsko merilno postajo, ki je bila leta 2002 zamenjana z operativno in delujočo oceanografsko bojo COSP (Coastal Oceanographic Station Piran)

* Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Fornače 41, Piran

**Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

s podatkovno bazo in zajemom podatkov v realnem času. Leto 2002 tako pomeni začetek operativne eksperimentalne oceanografije na MBP. Operativne meritve odtlej potekajo neprekinjeno. Iz njih smo se naučili, da se lahko tokovanje na površini celo v plitkih morjih, kot je severni Jadran, bistveno razlikuje od tistega pri dnu, in da za dober modelski opis pogosto potrebujemo visoko ločljive tridimenzionalne numerične modele. Neprekinjen niz meritev omogoča vpogled v spremembe morskega okolja na desetletni časovni skali.

Nabor parametrov, ki jih je merila boja COSP, je leta 2008 zrasel, bojo pa so preimenovali v Vido. Danes boja Vida predstavlja merilni sistem s senzorji za valove, temperaturo, slanost, koncentracijo klorofila-a ter raztopljeni kisik. V bližine boje je na morskem dnu akustični Dopplerski merilnik morskih tokov (ADCP), ki na svoji lokaciji meri horizontalne tokove na vsak vertikalni meter vodnega stolpca. Meritve so v realnem času javno dostopne na spletni strani MBP, kjer so poleg podatkov na voljo tudi osnovne vizualizacije merjenih parametrov. Merjeni podatki so na voljo tudi v vseh najpomembnejših okoljskih podatkovnih servisih Evropske unije, kot sta EMODnet in SeaDataNet.



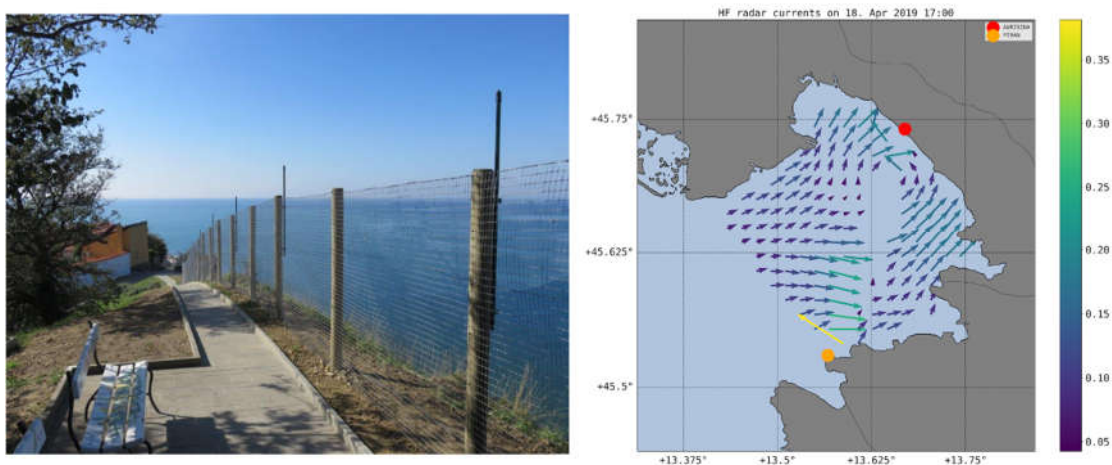
Slika 1. Oceanografska boja Vida. Fotografija: Tihomir Makovec, NIB.

ARSO zagotavlja meritve nivoja gladine v Kopru od leta 1961 dalje. Prvotni mareograf je stal na Ukmarjevem trgu, leta 2005 pa so zaradi zagotavljanja kontinuitete meritev na isto mesto postavili novo mareografsko postajo ter poskrbeli za homogenizacijo meritev ob prehodu med obema senzorjema. Ti podatki so v kontekstu podnebnih sprememb ključni za spremljanje letne in desetletne spremenljivosti morske gladine v Tržaškem zalivu. Te meritve kažejo, da smo v zadnjih tridesetih letih priča pospešenemu dvigu srednje gladine morja, ki znaša približno 5 mm na leto. Enako rast izkazujejo tudi podatki s Tržaške mareografske postaje.

Na ARSO so v januarju 2014 v okviru projekta BOBER zasidrali dve novi oceanografski boji, ter ju krstili za Zoro in Zarjo. Boji na svojih lokacijah merita višino in smer valovanja, površinsko temperaturo morja ter tokove po vodnem stolpcu.

Omenjene meritve, ki jih zagotavljajo boje in mareografska postaja v Kopru, so točkovne meritve. V zadnjih letih pa so postali cenovno relativno dostopni tudi (dvodimenzionalni) radijski merilniki površinskih tokov in valov. Ti merilniki merijo Dopplerske premike radijskih elektromagnetnih valov, ki se sipljejo na morskih površinskih valovih ter na podlagi frekvenčnih premikov zaradi gibanja vodnih mas in Braggovega uklona omogočajo dvodimenzionalno rekonstrukcijo tokovnega polja v celotnem merilnem območju sistema.

Tak sistem sta v Tržaškem zalivu postavila MBP ter italijanski Inštitut za oceanografijo in eksperimentalno geofiziko OGS iz Trsta. S tem merilnim sistemom lahko naenkrat izmerimo celotno površinsko tokovno polje v Tržaškem zalivu. To nam po eni strani omogoča edinstven vpogled v površinsko tokovanje na raznolikih prostorskih in časovnih skalah, po drugi pa odpira možnost kalibracije ter izboljšanja natančnosti numeričnih oceanskih modelov.



Slika 2. Levo: radijske antene merilnika površinskih tokov in valov. Desno: izmerjeno površinsko tokovanje v Tržaškem zalivu.

Poleg naštetih merilnih sistemov ekipa MBP z lastnim raziskovalnim plovilom že desetletja opravlja redne mesečne meritve temperature, slanosti in raztopljenega kisika na merilnih postajah v Slovenskem akvatoriju, opravili pa so tudi meritve drsenja plovcev v površinskih plasteh morja.

Numerični oceanografski modeli

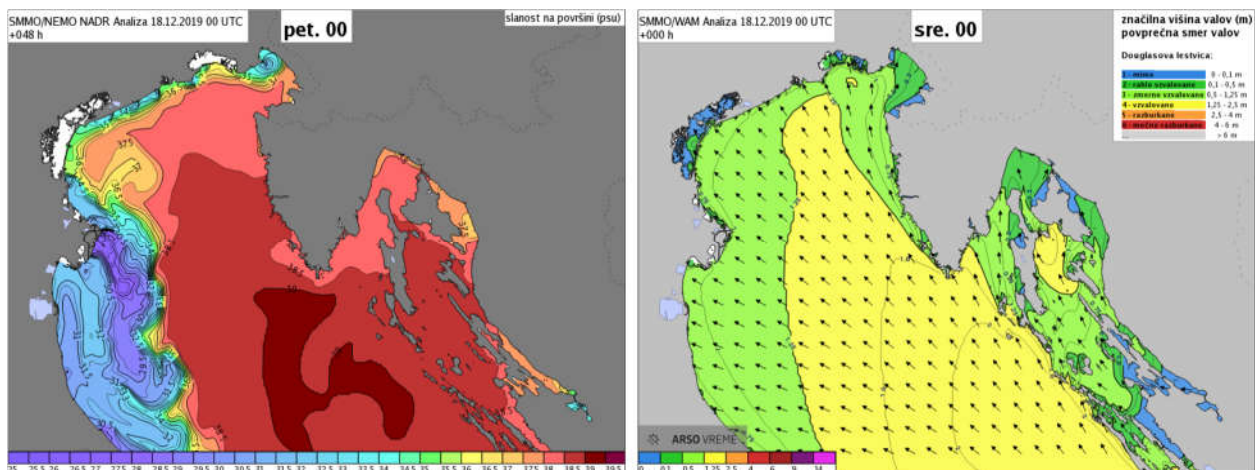
Poenostavljene probleme cirkulacije vodnih mas lahko rešujemo analitično, kompleksnejše, ki zajemajo hkrati več odvisnosti med fizikalnimi opazljivkami, pa rešujemo z računalniškimi simulacijami oziroma numeričnimi modeli. Med analitičnimi pristopi omenimo prof. dr. Draga Bajca, ki je v sedemdesetih letih obravnaval lastna nihanja Jadranskega bazena ter ocenil njegove najnižje lastne periode, ter Braneta Solomuna, ki je v diplomskem delu z modelom končnih elementov reproduciral temeljne lastnosti plimovanja Jadranskega morja. V devetdesetih letih se je z analitičnim vertikalno povprečenim opisom odziva morja na potujoče valove v zračnem pritisku intenzivno ukvarjal prof. dr. Vlado Malacič.

Numerični modeli so v raziskave vodnih mas skozi glavna vrata vstopili šele v poznih osemdesetih letih, ko je računalniška procesorska moč postala široko dostopna. Takrat je prof. dr. Rajar na UL FGG začel razvoj 3D numeričnih modelov za račun cirkulacije, hkrati pa tudi razvoj modelov turbulence. S temi modeli so bili izvršeni prvi računi cirkulacije slovenskega morja in Severnega Jadrana. Tridimenzionalni model PCFLOW3D je bil zasnovan na modelu TEACH-2 in razširjen v tretjo dimenzijo z upoštevanjem hidrostatične aproksimacije in možnostjo upoštevanja spremenljive gostote zaradi vpliva slanosti in temperature. Preizkušene so bile tudi različne numerične sheme in enostavni modeli turbulence.

V zgodnjih devetdesetih letih se je nadaljevala uporaba teh modelov v računih kakovosti morja, vedno s poudarkom na predhodno določeni cirkulaciji. Model PCFLOW3D je dobil dopolnitev v modelu sledenja delcev PTM3D, ki je bil uporabljen tudi kot operativno orodje Ministrstva za obrambo ob potencialnih razlitjih nafte. Nadaljnje dopolnitve modela zajemajo nadgradnjo z BGK modulom za živo srebro, privzdigovanje in transport sedimenta in nanj vezanih onesnažil.

Raziskave cirkulacije in transporta onesnažil z modelom PCFLOW3D so potekale na različnih območjih (Sredozemlje, Tržaški zaliv, Koprski zaliv, Yatsushiro Sea, Minamata Bay, lagune v Mehiki, otočje Fangataufa). V model PCFLOW3D so bili sčasoma dodani novejši modeli turbulence, model za privzdigovanje in transport sedimentov pa je bil dopolnjen z možnostjo obravnave kohezivnih sedimentov. Končna verzija modela omogoča račun privzdigovanja sedimenta zaradi kombiniranega vpliva tokov, valov in plovbe. V nekaterih primerih se je za simulacije valovanja izkazala primerna metoda SPH (smoothed particle hydrodynamics), ki omogoča opis naglih sprememb gladine, obobalnih pojavov (odboj, sipanje, interferenca, rušenje); pri teh je bil uporabljen model Dual SPHysics.

V istem obdobju, tj. v devetdesetih letih, sta Vlado Malačič in Boris Petelin na MBP vzpostavila prve numerične modele plimovanja Jadranskega morja ter severnega Jadrana, ter jih uporabila za študije cirkulacije ter za opis poldnevne plime kot superpozicije Kelvinovih valov. Prve različice modelov, ki so kasneje (december 2009) postale operativne in so se dnevno zaganjale za prognozo cirkulacije, so temeljile na javno dostopni kodi z univerze Princeton (Princeton Ocean Model - POM) in so omogočale dnevno izračunavanje plimovanja, cirkulacije, elevacije proste gladine ter temperaturnih in slanostnih polj v celotnem modelskem bazenu, ki je bil tedaj omejen na področje severnega Jadrana zahodno od Istre ter Tržaški zaliv. Z modelom POM, postavljenim na severnem Jadranu, je bila potrjena topografska kontrola vetrnih tokov, ter razvita podrobnejša slika izmenjave vodne mase Tržaškega zaliva s severnim Jadranom. Jadranska različica modela POM je bila uporabljena za študije interakcij atmosfere in oceana med močno burjo. Raziskovalci z MBP so skupaj s kolegi z ARSO ter s kolegi z Oddelka za fiziko in modeliranje oceanov Univerze v Atenah uspešno izpeljali dvosmerno sklopitev med atmosferskim modelom ALADIN SI ter modelom Jadranskega morja (Adriatic POM ali ADRIPOM). Z dvosmerno sklopljenim sistemom je bilo možno podrobno študirati medsebojne vplive ter turbulentne pretoke prek morske gladine, pa tudi vpliv morja na atmosfero med močnimi lokalnimi padavinskimi dogodki. Sodelovanje med MBP in UL FGG je vodilo v študijo vpliva interakcij med morjem in atmosfero na izhlapevanje živega srebra iz (Jadranskega) morja z globokim mešanim slojem.



Slika 3. Levo: slanostno polje cirkulacijskega modela NEMO. Desno: značilna višina in smer površinskih gravitacijskih valov iz modela WAM. Oba modela se dnevno zaganjata na superračunalniku ARSO.

Po letu 2015 so raziskovalci na MBP in ARSO začeli uporabljati najnovejše in najkompleksnejše numerične modele morja, kot sta ROMS in NEMO. Ti modeli so bili uporabljeni za študije širjenja meduz v Jadranu ob prisotnosti antropogenih struktur (npr. naftne ploščadi) ter za izboljšane operativne ansambelske napovedi obalnih poplav ob izrednih vremenskih dogodkih. Za izračune generacije in propagacije površinskih gravitacijskih valov je trenutno na ARSO v uporabi najnovejša verzija modela WAM, ki ga razvijajo in vzdržujejo na Evropskem centru za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF).

V zadnjem času so postala možna tudi podatkovna rudarjenja po ogromnih količinah merjenih in modelskih podatkov, ki se naslanjajo na nove pristope za učinkovito analizo in interpretacijo. Raziskovalci na MBP so se tako v zadnjih letih ukvarjali z algoritmi teorije grafov za iskanje značilnih struktur v površinski cirkulaciji, ter z njimi študirali sezonsko in medletno spremenljivost, pa tudi dolgoročne prehodne pojave kot je denimo desetletna oscilacija vrtinčnosti v površinski plasti Jonskega morja.

Zaključek in projekcije

Naše razumevanje dogajanja v morju je odvisno od treh dejavnikov: količine javno dostopnih opazovanj, numeričnega modeliranja ter teoretičnega znanja. Število meritev v globalnih morjih močno zaostajajo za denimo meteorologijo, se pa z novimi sateliti ter novimi bojami in obalnimi merilnimi sistemi stanje izboljšuje. Numerični modeli, ki se po eni strani naslanjajo na vedno zmogljivejše superračunalnike, po drugi na nova fizikalna spoznanja, ravno tako napredujejo. Oboje je vsekakor razlog za optimizem. Bolj zaskrbljujoče je, da znanstveniki že dolgo opozarjajo na temeljno vlogo oceanov v klimatski dinamiki našega planeta, pa imajo njihovi napori vseeno močno omejen doseg. Temeljni izzivi oceanografije so po znanstveni plati najbrž dokaj jasni: dobro razumeti ocean v vsej njegovi kompleksnosti in pestrosti, ter na podlagi tega razumevanja oblikovati ustrezne okoljske, energetske in ekonomske politike. Domet osvojenega znanja pa bo dobro izkoriščen le, če bodo odločevalci imeli posluh za znanost.