

# Analiza in prognoza višin morja v Slovenskem morju

Matjaž Ličer\*

## Povzetek

V prispevku predstavimo analitične in prognostične metode za obravnavo višine morja na mareografski postaji Koper, ki so bile na Agenciji za okolje RS implementirane v letu 2009. Predstavimo avtomatizacijo napovedi astronomske plime ter njeno vizualizacijo, nato pa še modeliranje plimnih residualov z umetno nevronske mreže. Zaključimo s predstavitvijo avtomatizacije iskanja dnevnih ekstremov višine morja na mareografski postaji Koper s pomočjo filtracije visokofrekvenčne komponente v merjenem signalu višin morja.

## Uvod

Galileo Galilei v svojem slovitom *Dialogu* o dveh glavnih sistemih sveta plimovanju posveti celotno zadnje poglavje knjige, v katerem skuša razlago plime povezati z gibanjem Zemlje in njenim reliefom. Kepler je za razliko od Galileia plimovanje prvi povezal z gravitacijskim vplivom Lune, a so bili ti napor v času pred Newtonovo formulacijo mehanike obsojeni na neuspeh. Galileieva in Keplerjeva konceptualizacija plimovanja morda nista bili ustrezni, vsekakor pa jima moramo priznati, da sta locirala pomemben problem, s katerim imamo še danes težave, čeravno morda ne toliko na pojmovnem kot na operativnem numeričnem nivoju. Poleg tega so renesančni misleci znali identificirati poldnevne in dnevne plimne periode, Galilei pa na istem mestu tudi navaja posebne dnevne ladijskih prihodov in odhodov v pristaniščih v Aleksandriji in Benetkah, ki kažejo na to, da ima plima že od nekdaj tudi družbene implikacije. Napovedi plime so tudi danes pomembne za celo vrsto morskih in obmorskih aktivnosti od ladjedelništva do turizma in izrabe luških transportnih infrastruktur.

Visoke plime so imele v preteklosti izjemno resne posledice v slovenskih obalnih mestih, še zlasti v decembru 2008, ko je gladina morja dosegla 50-letni nivo in povzročila okrog milijon evrov škode, gl. Sliko 1. Agencija RS za okolje (ARSO) se je tako skupaj s kolegi s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo lotila reanalize orodij, ki jih ARSO uporablja za prognozo in analizo višin morja v Slovenskem morju.

Namen pričujočega prispevka je kratka predstavitev orodij, ki so nastala v letu 2009 v okviru teh prizadevanj. Popolnoma na novo je bila napisana koda, ki omogoča avtomatiziran izračun prognoz astronomske plime skupaj z avtomatizirano vizualizacijo rezultatov prognostičnih izračunov. Za napoved plimnih residualov je bil izdelan model plime z umetno nevronske mreže, ki je bil delno umerjen in uporabljen za zakasnjeno prognozo (ang. *hindcasting*) ekstremnega dogodka visoke vode z začetka decembra 2008. Nadalje je bila na novo napisana koda za analizo višin morja z mareografske postaje Koper, ki zaradi filtriranja visokofrekvenčnih harmonskih komponent v merjenem signalu učinkoviteje locira dnevne ekstreme višine morja in omogoča avtomatiziran izpis urnih višin ter dnevnih ekstremov v format .xls.

---

\* dr., Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, KMTe; in Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana



Slika 1: Ekstremna plima v Piranu decembra 2008. Resonančni efekt visokih astronomskih plim ter vetrovno in tlačno vzbujenih lastnih nihanj Jadranskega morja je v Piranu povzročil plimo s 50-letno povratno dobo. Fotografija: Janez Polajnar.

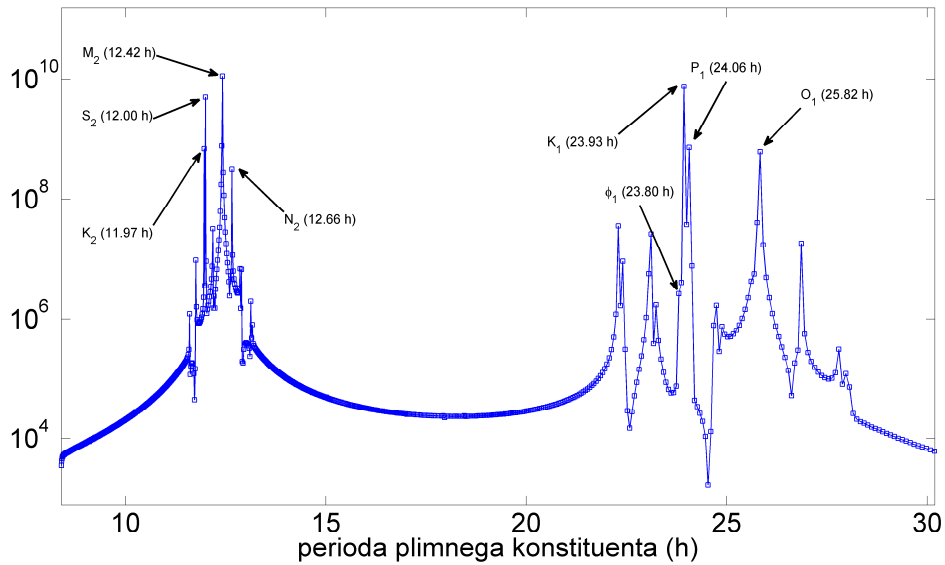
### Prognoza astronomske plime

Danes plimo v nasprotju s popularnim razumevanjem, ki s pojmom plime označuje malone vsakršno nihanje morske gladine, definiramo kot periodično gibanje gladine morja, ki je amplitudno in fazno določena s katerokoli periodično geofizikalno silo [1]. Dominantna siljenja so variacije v gostoti gravitacijske sile na račun regularnih gibanj Zemlje, Sonca in Lune. V splošni reprezentaciji lahko opazovane višine morja razklopimo na tri ločene prispevke (Pugh, 1987):

$$X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t), \quad (1)$$

kjer  $Z_0(t)$  predstavlja srednjo višino morja, ki se rahlo spreminja s časom (v Kopru ta variacija v obdobju 1960 - 2008 znaša  $\partial Z_0(t)/\partial t \approx 1\text{mm/leto}$ , (Jeromel et al., 2010),  $T(t)$  predstavlja *astronomsko plimo*, tj. prispevek k spremembam višin morja zaradi gravitacijskih vplivov Sonca in Lune<sup>2</sup>, člen  $S(t)$  pa predstavlja plimni residual oz. *residualno višino morja*. Residuali so odstopanja merjene višine morja od vrednosti astronomske plime, do njih pa pride v največji meri zaradi meteoroloških vplivov (močan veter, variacije v zračnem pritisku, lastna nihanja morja ipd.)

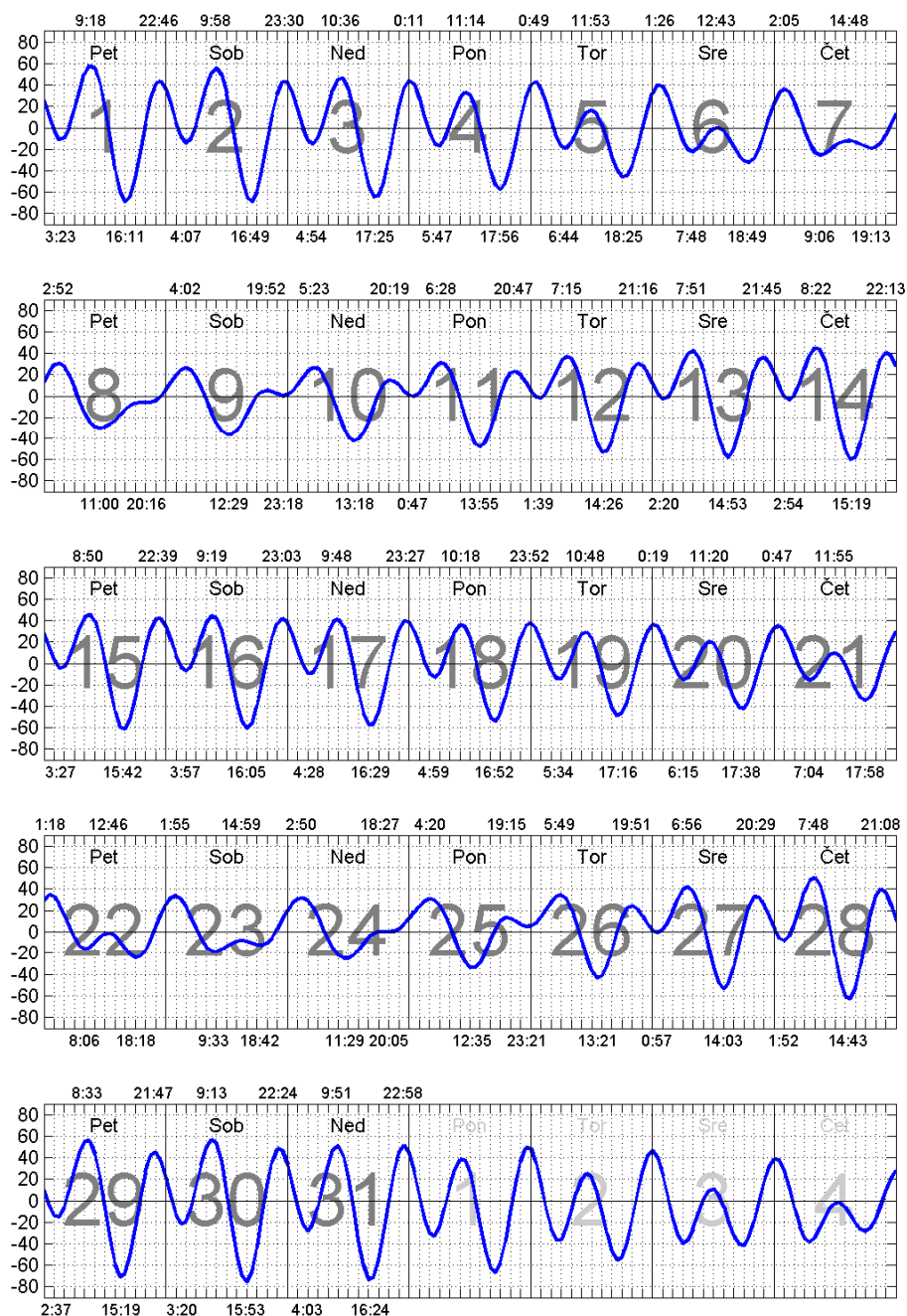
<sup>2</sup>V resnici lahko iz astronomskih parametrov določimo zgolj ravnovesni odziv oceana, tj. odziv oceana v primeru, ko bi bil celoten ocean v ravnovesju z gravitacijskim siljenjem. Realni ocean je seveda daleč od ravnovesja v tem smislu, vendar pa lahko zato, ker je amplituda plimnega odziva majhna v primerjavi z globino oceana, ki se na siljenje odziva, vseeno delamo v približku linearnega odziva in predpostavimo, da odziv oceana vseeno vsebuje le tiste frekvence, ki so prisotne v samem gravitacijskem siljenju (Pawłowicz et al., 2002).



Slika 2: FFT - spekter višin morja na mareografski postaji Koper za leto 2008. Označene so periode osnovnih dnevnih in poldnevni plimnih konstituentov.

Osnovna komponenta napovedi višin morja je torej signal astronomske plime  $T(t)$ . Do letos so na ARSO za izračun astronomskih plim uporabljali paket TASKS for WINDOWS, ki je razmeroma nepregleden hibrid Fortranskih kod in Excelovih tabel. Kot tak je (čeprav so se avtorji potrudili z Excelovim vmesnikom) dokaj neprijazen za uporabo in (prav zaradi navezanosti na Excel) neprimeren za nadaljne numerične analize ter vizualizacije. Pawłowicz in kolegi so leta 2002 razvili odprtokodni brezplačni programski paket  $t\_tide$  za prognozo astronomskih plim, ki deluje v okolju Matlab (Pawłowicz et al., 2002). Paket  $t\_tide$  se je v zadnjih letih v znanstveni skupnosti močno uveljavil kot numerično orodje za prognozo astronomske plime, gl. reference (Drushka et al., 2008, Bacopoulos et al., 2009, Woodson et al., 2007, Blanton et al., 2004, Dupont et al., 2005, Neill et al., 2007), zato smo se tudi na ARSO odločili za njegovo implementacijo. Paket s harmonično analizo identificira osnovne harmonske komponente (gl. Slika 2), z metodo najmanjših kvadratov konstruira trigonometrijsko vrsto plimnih komponent, ki se najbolj prilega merjenemu signalu, ter nato v časovni vrsti merjenih višin morja razklopi tako določeni plimni signal od residualnega.

# Januar



 AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE

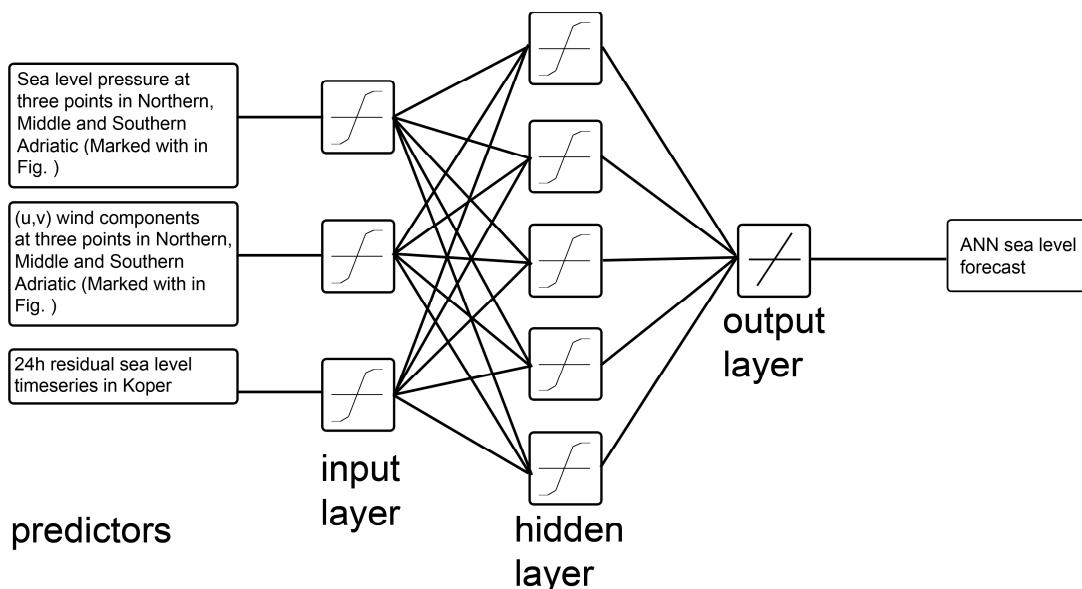
Slika 3: Nova avtomatizirana vizualizacija astronomske plime v mareografski postaji Koper za januar 2010. Navedene višine morja so prikazane v centimetrih in predstavljajo odmik od dolgoletnega srednjega nivoja morja na mareografski postaji v Kopru (Jeromel et al., 2010)

Z implementacijo paketa `t_tide` smo si močno olajšali uvoz podatkov iz podatkovnih baz ARSO ter vse nadaljne korake, ki spadajo k prognozi astronomske plime. V

prognoziranem signalu je potrebno določiti čase dnevnih ekstremov, za kar Matlab nudi bistveno močnejša orodja kot so denimo Excelovi makroji in vgrajene funkcije. Po določitvi časov dnevnih ekstremov je potrebno časovne vrste astronomske plime še ustrezno vizualizirati. Dosedanji postopek je potekal v Excelu in ni bil avtomatiziran, zahteval je precej ročnega popravljanja. Nova rutina, ki smo jo v ta namen napisali v Matlabu, nam omogoča, da z enim samim ukazom v konzolo izračunamo astronomske plime, določimo čase in višine dnevnih ekstremov ter generiramo datoteke .png ali .pdf za celotno leto prognoze. Proces je sedaj popolnoma avtomatiziran, končni produkt za januar 2010 pa prikazujemo na Sliki 3.

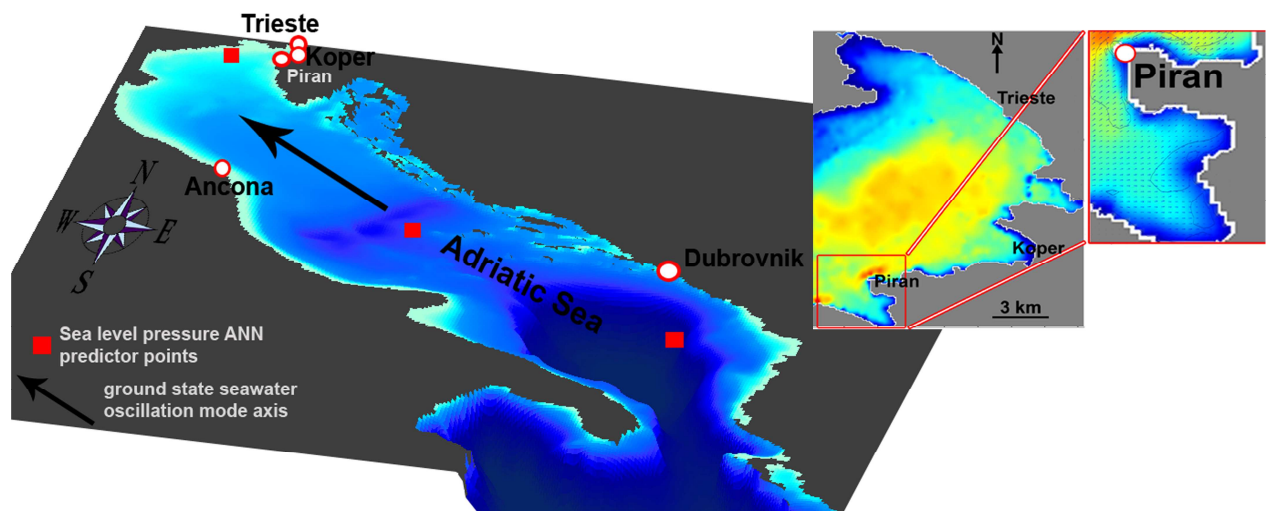
### Prognoza residualne plime

Zgoraj smo predstavili avtomatizacijo izračuna astronomske plime, tj. člena  $T(t)$  iz opazovane višine morja  $X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t)$ . člen  $Z_0(t)$  poznamo (Jeromel et al., 2010), zato je potrebno za kvalitetno napoved višine morja  $X(t)$  v tistih krajih, kjer so residuali plime visoki, poznati še residualni prispevek  $S(t)$ . V zadnjih letih se je v literaturi pojavilo mnogo prispevkov, (gl. vire Lee 2004, Lee et al., 2002a, Lee et al., 2002b, Tirozzi et al., 2006, Tsai et al., 1999, Vaziri 1997, Vijay, Govil, 2006) ki kažejo na to, da lahko z umetno nevronske mrežo (UNN) precej izboljšamo napoved višin morja in da je to primerno orodje za napovedovanje residualnih prispevkov  $S(t)$ . Umetna nevronska mreža je nestandardni statistični matematični model, ki je zgrajen po zgledu bioloških nevronske mreže v možganih sesalcev, ter je primeren za opisovanje močno nelinearnih procesov. UNN je tipično sestavljena iz skupine medsebojno povezanih umetnih nevronov z znanimi prenosnimi funkcijami, ki znane vhodne podatke transformirajo v svoj numerični odziv, gl. Sliko 4.



Slika 4: Arhitektura nevronske mreže: na vhod pripeljemo t. i. prediktorje, tj. količine, za katere menimo, da vplivajo na gladino morja v Kopru. če je mreža že naučena (gl. spodaj), potem lahko njen odziv interpretiramo kot prognozo vrednosti morske gladine.

Napovedovanje residualov z UNN temelji na popolnoma drugačnem pristopu, kot je denimo tisti, s katerim se danes pretežno lotevamo tridimenzionalnega modeliranja morja. Če želimo opisati tokovanje in adveksijsko-difuzijske procese, ki se v morju odvijajo, moramo poznati dovolj fizike, da zapišemo sklopljen sistem diferencialnih enačb, s katerim zajamemo bistvene pojave v sistemu. Sistem enačb nato integriramo v času in tako dobimo prognoziranje vrednosti za količine, ki nas v sistemu zanimajo. Pri napovedovanju procesov z UNN nam sistema ni potrebno poznati tako natančno, kar je konceptualno slabo, a vendar je v obrtniškem smislu svojevrstna prednost. Če skonstruiramo UNN z ustrežno arhitekturo (tj. povezavami in tipi nevronov), če pametno določimo vhodne podatke - prediktorje, na katere se bo mreža odzivala, ter če mrežo pravilno učimo, lahko praktično brez poznavanja dinamičnih enačb pridemo do koristnih napovedi.



Slika 5: Jadransko morje z označenimi točkami (rdeči kvadrati) med katerimi smo računali razlike v pritiskih. črna puščica shematsko kaže smer osnovnega lastnega nihanja v Jadranskem morju ob pojavu juga na večjem področju v Jadranu. Vložen graf na desni strani kaže z modelom PCFLOW izračunano površinsko tokovno polje v okolici Piranskega rta ob pojavu juga na Jadranu.

V grobem poteka proces modeliranja z UNN takole. Gladino morja  $X(t)$  zapišemo kot funkcijo, odvisno od mrežnih prediktorjev  $\phi$ . V našem primeru smo za prediktorje izbrali **i)** residualne gladine morja v Kopru, **ii)** razlike pritiskov med tremi točkami na Jadranu (gl. Sliko 5), **iii)** zračni pritisk v Kopru, ter **iv)** vetrovno napoved za Koper Aladin/SI.

Predvidevali smo, da je višina morja v Kopru odvisna zgolj od naštetih parametrov. Ta predpostavka nam omogoča, da višino morja zapišemo na naslednji način

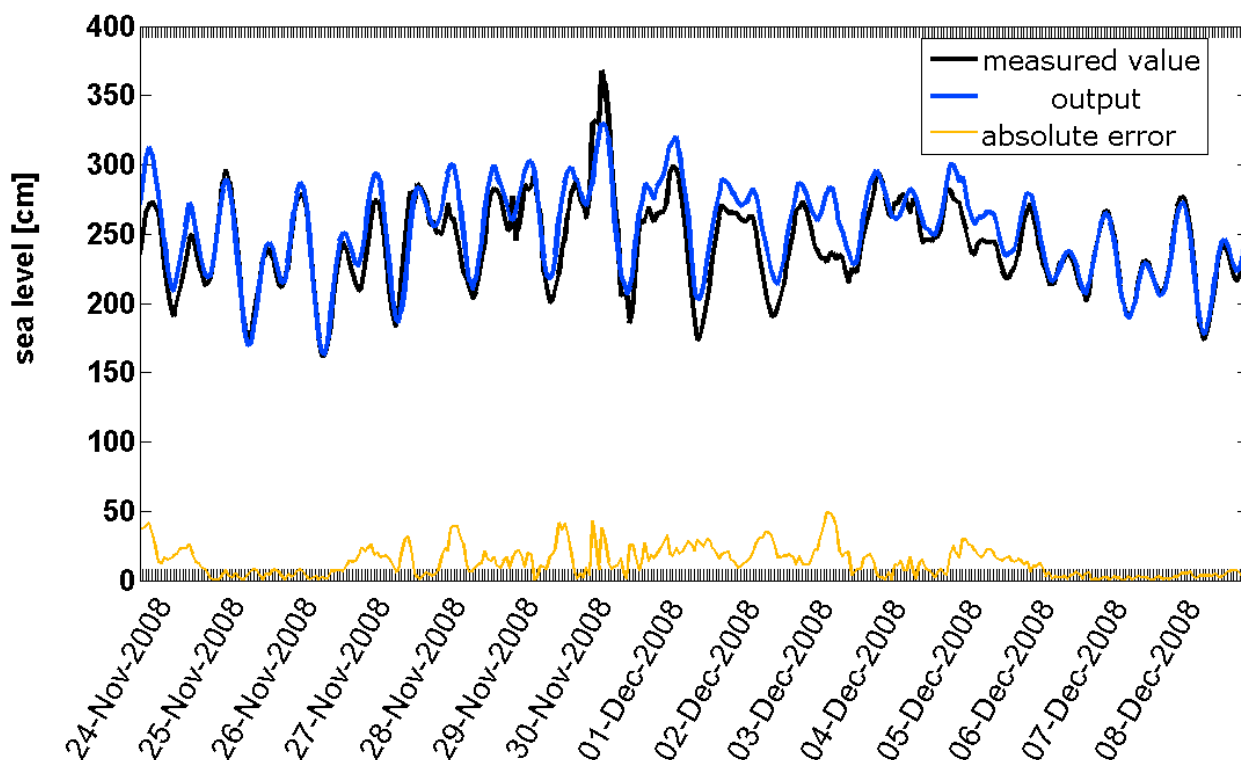
$$X(t) \approx W \cdot \phi, \quad (2)$$

pri čemer je  $\phi$  vektor prediktorjev, matrika  $W$  pa predstavlja nevronska mrežo. Učenje mreže imenujemo proces spreminjanja matričnih elementov matrik  $W$ , dokler ni razlika med merjeno vrednostjo morske gladine ter odzivom UNN na izbrane prediktorje minimalna

$$|X - W \cdot \phi| = \min. \quad (3)$$

Ko so matrični elementi matrike določeni tako, da minimizirajo razliko  $|X - W \cdot \phi|$ , imamo mrežo za naučeno. Potem lahko njen odziv na prognoziranje vrednosti prediktorjev (ki jih dobimo iz modelov Aladin/SI in ECMWF) interpretiramo kot prognozo celotne višine morja, tj. astronomske in residualne višine skupaj, na mareografski postaji Koper.

Našo nevronska mrežo smo učili na podatkih za prediktorje iz let 2007 in 2008, nato pa smo jo uporabili za zakasnjeno prognozo (ang. *hindcasting*) decembrske ekstremne plime v Piranu. Rezultat je prikazan na Sliki 6.



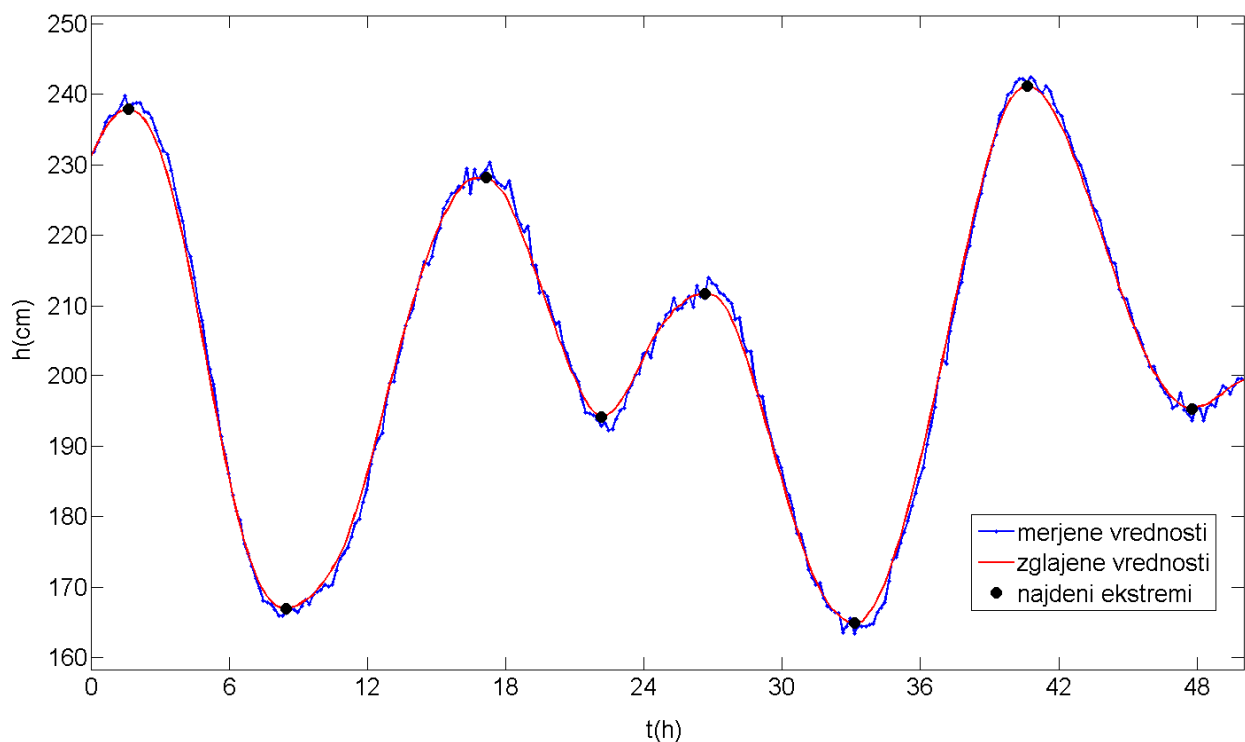
Slika 6: Napoved residualnih višin z umetno nevronska mrežo. S črno krivuljo so označene merjene vrednosti morske gladine na mareografski postaji Koper, z modro pa napoved nevronske mreže. Z oranžno krivuljo je označena razlika med napovedano in merjeno vrednostjo  $|X - W \cdot \phi|$ .

Kot vidimo, nevronska mreža kvalitativno ustrezno zadane variacije višin morja v Kopru. število ekstremov je ustrezno in ob ustreznih časih, višine pa še niso ustrezno napovedane, saj ponekod razlika med napovedano in merjeno vrednostjo znaša tudi 50 cm. Te rezultate bi bilo verjetno možno popraviti s korekcijo nabora prediktorjev, vključitvijo smeri in višine valov pri Puli iz valovnega modela ECMWF in podobno. Napovedovanje celotne višine morja tako ostaja v fokusu naših prizadevanj, ali je nevronska mreža primerna za tovrstne poskuse, pa bo pokazal čas.

### Analiza višin morja na mareografski postaji Koper

Kontrola podatkov in določanje dnevnih ekstremov višin morja z mareografske postaje v Kopru spada med rutinske naloge hidrologov na Sektorju za analizo in prognozo površinskih voda (SAPPV) na ARSO. Kontrola podatkov je potrebna zaradi izpadov meritev na posameznih senzorjih višine morja, sistematičnih in naključnih napak merilne infrastrukture na postaji ipd. Ko so podatki prekontrolirani, je potrebno iz kontroliranih višin morja določiti dnevno povprečno vrednost, urne vrednosti višin, poiskati višine in čase dnevnih ekstremov ter iz teh podatkov sestaviti Excelovo datoteko z ustrezno

napolnjenimi polji. Do sedaj so imeli na SAPPV v te namene na voljo Excelov makro, ki je bil za iskanje dnevnih ekstremov problematičen zato, ker je našel vse ekstremne vrednosti merjenih višin morja. Signal merjenih višin morja je sestavljen iz nizkofrekvenčne komponente, ki sledi dejanskim variacijam višin morja, čez njo pa je naložena visokofrekvenčna komponenta, ki izvira iz različnih virov in zašumlja dejanski signal višine morja. Prejšnja Excelova rutina med tema komponentama ni znala ločevati, zato je ob iskanju ekstremov za ekstreme označila vse točke, v katerih je odvod višine morja spremenil predznak. Teh točk pa je zaradi prisotnosti visokofrekvenčne komponente bistveno preveč in lažne ekstreme je bilo potrebno odstranjevati ročno. Matlab nam s svojimi statističnimi paketi za obdelavo podatkov omogoča konstrukcijo učinkovitih filtrov, ki porežejo visoke frekvence v signalu in ekstreme poiščejo na zglajeni funkciji višin morja, zato smo namesto Excelove rutine napisali novo Matlabovo funkcijo, ki je bolj učinkovita in bolj avtomatizirana. S tem novim orodjem na podatkih iz podatkovne baze z enim ukazom v konzolo izvedemo naslednje operacije: **i)** preuredimo jih v enoten format (v bazi niso tako zapisani), **ii)** poiščemo vrzeli v podatkih, **iii)** izvedemo interpolacijo čez vrzeli, da dobimo kontinuiran niz podatkov, **iv)** iz kontinuiranega niza podatkov izločimo visokofrekvenčno komponento, **v)** na nizkofrekvenčni komponenti poiščemo ekstreme in **vi)** generiramo Excelovo datoteko, ki po mesecih vsebuje urne vrednosti, povprečne vrednosti ter dnevne ekstreme za vsak dan v mesecu. Rezultat izločitve visokofrekvenčne komponente signala prikazujemo na Sliki 7.



Slika 7: Filtriranje visokofrekvenčne komponente signala višin morja: z modro krivuljo so označene 10-minutne merjene vrednosti višin morja na mareografski postaji Koper. Z rdečo črto je prikazan zglajeni signal višin morja po izločitvi visokofrekvenčnih komponent. S črnimi točkami so označeni najdeni ekstremi na prikazanem časovnem intervalu. Stara Excelova rutina je ekstreme iskala na modri krivulji, tj. na 10-minutnih merjenih vrednostih višin morja - to je vodilo do velikega števila lažno identificiranih ekstremov.



Tudi nova rutina tu in tam napačno identificira ekstrem, vendar se to zgodi bistveno redkeje kot prej, hkrati pa metoda izpiše podatke na tak način, da je jasno razvidno, kje leži potencialno lažno identificiran ekstrem. Poleg tega rutina avtomatično generira Excelove datoteke v pravilni obliki iz interpoliranih podatkov in skupaj z ekstremi, brez potrebe po ročni manipulaciji Excelovih delovnih zvezkov, kar je korak k optimizaciji celotnega procesa.

## Zaključek

Zaključimo zelo na kratko. V prispevku smo predstavili aktivnosti, ki smo jih v letu 2009 izvedli na področju napovedovanja in analize višin morja na mareografski postaji Koper. Naše delo ni omejeno zgolj na ukvarjanje s plimo, temveč se tiče tudi tridimenzionalnega numeričnega modeliranja Jadranskega morja, kjer pri uporabi numeričnih modelov POM in ECOMSED sodelujemo z Morsko Biološko Postajo v Piranu, glede modela PCFLOW pa s Katedro za mehaniko tekočin FGG. V letošnjem letu smo uspešno vgradili Aladin/SI vetrovna polja v model PCFLOW, postavili pa smo tudi program PCFLOW - Nafta2, ki je ravno tako nastal na FGG in je namenjen simulacijam razlitja nafte in ostalih ogljikovodikov v Tržaškem zalivu. Z modelom Nafta smo že izvedli nekaj preliminarnih simulacij za nekatere tipične vetrovne situacije v Tržaškem zalivu. Naše bodoče aktivnosti bodo v grobem usmerjene operacionalizacijo omenjenih modelov na področju Tržaškega zaliva ter v vključitev modula metode sledenja delcev v modela POM in ECOMSED, saj bi nam to omogočilo natančnejše simulacije transporta sedimentov in polutantov v modelskih področjih.

## Viri

- Pugh, D. T., *Tides, Surges and Mean-Sea Level*, Wiley, 1987
- Jerome, M., Ličer, M., Vodopivec, M., *Prognoziranje plimovanja morja 2010*, ARSO, Ljubljana 2009
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE*, Computers and Geosciences, 28, 929 - 937, Pergamon 2002
- Drushka, K. et al., Observations of the 2004 to 2006 Indian Ocean tsunamis from a pressure gauge array in Indonesia, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, July 2008
- Bacopoulos, P., Hagen, S. C., Tidal Simulations for the Loxahatchee River Estuary Southeastern Florida: On the Influence of the Atlantic Intracoastal Waterway versus the Surrounding Tidal Flats, *J. Water, Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Vol. 135, No.6, November 2009
- Woodson, C. B., et al., *Local diurnal upwelling driven by sea breezes in northern Monterey Bay*, Continental Shelf Research, Vol. 27, 2289 - 2302, Elsevier 2007
- Blanton B. O., et al., *Barotropic tides in the South Atlantic Bight*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, December 2004
- Picado, A., Dias, J. M., Fortunato, A. B., *Effect of flooding the salt pans in the Ria de Aveiro*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56, 1395 - 1399, 2009
- Dupont, F., Hannah, C. G., Greenberg, D., *Modelling the Sea Level of the Upper Bay of Fundy*, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 43 (1), 33 - 47, 2005
- Neill, S. P., Hashemi, M. R., Elliott, A. J., *An enhanced depth-averaged tidal model for morphological studies in the presence of rotary currents*, *Continental Shelf Research*, Vol. 27, 82 - 102, 2007
- Lee, T. L., *Back-propagation neural network for long-term tidal predictions*, *Ocean Engineering*, Volume 31, Issue 2, February 2004, Pages 225-238

- Lee, T. L., and Jeng, D. S., *Application of artificial neural networks in tide-forecasting*, Ocean Engineering, Volume 29, Issue 9, August 2002, Pages 1003-1022
- Lee, T. L., Tsai, C. P, Jeng, D. S., Shieh, R. J., *Neural network for the prediction and supplement of tidal record in Taichung Harbor*, Taiwan. Advances in Engineering Software 2002, 33/6, pp. 329-338.
- Tirozzi, B. et. al. (Eds.), *Neural Networks and Sea Time Series*, Birkhäuser, 2006
- Tsai, C.-P., Lee, T. L., *Back-Propagation Neural Network in Tidal-Level Forecasting*, J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg. Volume 125, Issue 4, pp. 195-202 (July/August 1999)
- Vaziri, M., *Predicting Caspian Sea surface water level by ANN and ARIMA models*, J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg. 1997, 123/4, pp 158-162.
- Vijay, R., Govil, R., *Tidal Data Analysis using ANN*, Proc. Of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 18, December 2006