

# Pregled modeliranja valova na Jadranu

Lovro Štefan<sup>1</sup>, Damjan Bujak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [lovro.stefan@grad.unizg.hr](mailto:lovro.stefan@grad.unizg.hr)

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [damjan.bujak@grad.unizg.hr](mailto:damjan.bujak@grad.unizg.hr)

## Sažetak

Jadransko more poluzatvoren je bazen složene obalne morfologije i specifičnih vjetrovnih obrazaca koji određuju valnu klimu. Rad daje pregled istraživanja valne klime na Jadranu kroz tri pristupa: in situ i satelitska mjerenja, numeričke spektralne modele te metode strojnog učenja. Naglasak je na tehničkim karakteristikama primijenjenih numeričkih modela, koji su sustavno uspoređeni prema tipu i gustoći mreže, prostornoj razlučivosti i spektralnoj diskretizaciji. Posebno se razmatra uloga kvalitete vjetrovnih podataka, koja je u jadranskim uvjetima ključna za pouzdanost modelskih rezultata.

*Ključne riječi: Jadransko more, valna klima, numeričko modeliranje valova, strojno učenje, vjetrovno forsiranje*

## Overview of wave modeling in the Adriatic

### Abstract

The Adriatic Sea is a semi-enclosed basin with complex coastal morphology and specific wind regimes governing its wave climate. This paper reviews Adriatic wave climate research through three approaches: in situ and satellite measurements, numerical spectral models, and machine learning methods. The focus is on the technical characteristics of applied numerical models, systematically comparing grid type and density, spatial resolution, and spectral discretization. Attention is given to the role of wind data quality, which is critical for reliable modelling in Adriatic conditions.

*Key words: Adriatic Sea, wave climate, numerical wave modelling, machine learning, wind forcing*

## 1 Uvod

Jadransko more je poluzatvoreno rubno more Sredozemnog mora, a proteže se u duljini oko 800 km od Tršćanskog zaljeva na sjeverozapadu do Otrantskih vrata na jugoistoku. Prosječna širina iznosi oko 170 km. Zbog razvedene istočne obale, brojnih otoka i kanala te regionalnih vjetrova, valno polje prostorno je vrlo promjenljivo. Za razvoj valova posebno su važni bura, jak sjeveroistočni orografski kanaliziran vjetar ograničenog privjetrišta, te jugo, jugoistočni vjetar znatno dužeg privjetrišta jer puše uzduž cijelog bazena [1, 2].

Pouzdani valni podaci potrebni su za projektiranje obalnih i morskih građevina, procjenu ekstremnih stanja mora, upravljanje obalnim prostorom, analizu obalnih procesa, procjenu rizika od poplava itd. [3–5].

Valni parametri prate se *in situ* mjerenjima, satelitskom altimetrijom i modelskim bazama podataka. Plutače i platforme daju kvalitetne lokalne vremenske serije, ali je njihova prostorna pokrivenost ograničena. Satelitska mjerenja omogućuju provjeru i kalibraciju hindcast podataka, no primjena je ograničena u uskim i priobalnim područjima (do 20 km od obalne linije) [1, 6].

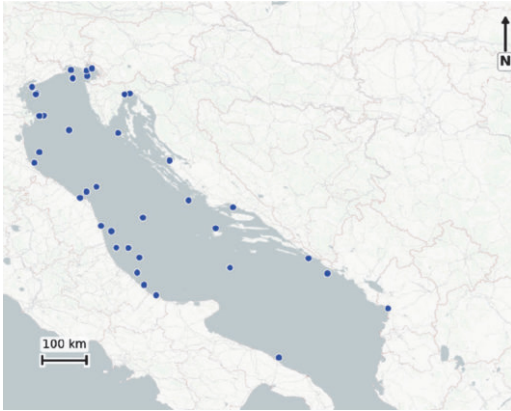
U suvremenim valnim analizama prevladava primjena spektralnih valnih modela treće generacije koji rješavaju jednadžbu ravnoteže valne akcije [7]. U poluzatvorenim i obalnim morima njihova točnost posebno ovisi o batimetriji i opisu obale te kvaliteti vjetrovnog forsiranja [5, 8]. Na Jadranu je vjetrovno forsiranje osobito važno zbog složene orografije i prostornih gradijenata vjetra. Više studija pokazuje da pogreške u vjetrovnim podacima vode do podcjenjivanja značajne valne visine, osobito tijekom ekstremnih događaja i za djelovanja bure i juga [3, 9, 10]. Prilikom modeliranja valne klime posebno je zahtjevnja parametrizacija površinskog loma valova (eng. *whitcapping*) koji u većini modela služi kao glavni parametar podešavanja kojim se kompenziraju pogreške u vjetrovnom forsiranju [5]. Cilj rada je pregled istraživanja valne klime i valnih modela na Jadranu s naglaskom na ulazne podatke, numeričke modele i njihove konfiguracije, a dan je i kratki pregled radova koji primjenjuju metode strojnog učenja. Odabrani su radovi s domenom na Jadranu ili sličnim područjima, relevantni za obalnu i pomorsku inženjersku praksu te modeliranje ekstremnih valnih uvjeta, pretežno objavljeni u posljednjih desetak godina.

## 2 Mjerenja valnih parametara na Jadranu

### 2.1 In situ mjerenja valografom

Mreža valografskih postaja na Jadranu relativno je rijetka (Slika 1). Na talijanskoj strani postoje oceanografska platforma Acqua Alta (45,31° N, 12,51° E) s dugim nizom mjerenja od 1979. godine te plutače talijanske mreže RON. Na hrvatskoj

strani DHMZ je 2024. pokrenuo mjerenja na pet meteorološko-oceanografskih ODAS plutača [11], čime je značajno unaprijeđena pokrivenost hrvatskog dijela Jadrana. Lončar i dr. [9] i Berbić i dr. [12] za stariji period koristili su Datawell MKIII GPS plutače na postajama V1 ( $44^{\circ}44,5'N$ ,  $13^{\circ}10,2'E$ , sjever Jadrana, dubina 36 m) i V2 ( $43^{\circ}29,3'N$ ,  $16^{\circ}27,9'E$ , Brački kanal, dubina 28 m). Isti tip plutače koristili su i Bujak i dr. na lokaciji u Riječkom zaljevu ( $45,33^{\circ}N$ ,  $14,39^{\circ}E$ ) [13]. Ćorak i dr. [14] uspoređuju četiri izvora podataka (Acqua Alta, RON, WorldWaves Atlas, ERA5) i utvrđuju znatne razlike s mjerljivim posljedicama na projektne parametre morskih konstrukcija.



**Slika 1. Položaj valografskih postaja na Jadranu**

## 2.2 Satelitska mjerenja

Satelitska altimetrija jedan je od izvora prostorno raspoređenih mjerenja značajnih valnih visina. Preko Copernicus Marine Servicea dostupan je L3 NRT proizvod [15] s globalnim valnim podacima iz satelitskih altimetara, dobiven obradom podataka misija Sentinel-6A, Jason-3, Sentinel-3A/3B, CryoSat-2, SARAL/AltiKa, CFOSAT i HY-2B. Sve misije homogenizirane su na referentnu misiju i kalibrirane korištenjem valografskih podataka. Proizvod pokriva globalna mora i oceane od 2021. godine s prostornom razlučivošću 1,4 km i u satnom intervalu. Ograničenje ovih podataka je, uz putanjski karakter mjerenja, relativno mala učestalost prolaza satelita nad uskim bazenima poput Jadrana.

### 3 Modeli valova na Jadranu

#### 3.1 Numerički modeli

Spektralni valni modeli trećeg naraštaja čine većinu novijih primjena na Jadranu. U pregledanim radovima koriste se MIKE 21/SW (komercijalni model), WWM-III, WW3 i SWAN (javno dostupni), pri čemu se razlikuju svrha modela, domena, mreža, vjetrovno forsiranje i validacija. Tehničke karakteristike pojedinih konfiguracija prikazane su u tablici 1, dok se u nastavku tekstualno sažimaju svrha i glavni zaključci pojedinih radova.

Lončar i dr. [9] usporedili su rezultate modela MIKE 21/SW s mjerenjima na dvjema valografskim postajama. Rad pokazuje da je podudaranje snažno uvjetovano kvalitetom ALADIN-ova vjetrovnog polja. Lončar i dr. [16] su sličan model primijenili na prijelaz smjera vjetra iz juga u lebić ispred Riječkog zaljeva, a naglašena je osjetljivost valnog polja na promjene smjera vjetra u ograničenom bazenu. Dutour Sikirić i dr. [3] prikazali su sustav za prognozu valova na Jadranu temeljen na modelu WWM-III. Vrijednost rada je u primjeni detaljne mreže koja razrješava složenu geometriju. Validacija pokazuje uporabljivost sustava, ali uz podcjenjivanje vršnih valova, što se povezuje s podcijenjenim vjetrovnim forsiranjem. Barbariol i dr. [10] razvili su PELMO, kratkoročni prognostički sustav. Rad pokazuje da se u nedostatku posebno razvijenog regionalnog atmosferskog modela dio pogreške može smanjiti korekcijom (u radu kvantilno podudaranje) ulaznog vjetra. Benetazzo i dr. [17] primijenili su lanac COSMO-CLM-SWAN za usporedbu sadašnje i buduće valne klime Jadrana te zaključili da se očekuje opće smanjenje jakosti valova uz izraženu prostornu varijabilnost. Bonaldo i dr. [2] najprije su koristili vjetrovni energetski indeks kao zamjenu za ekstremna valna stanja, a zatim su Bonaldo i dr. [18] SWAN simulacijom analizirali promjene valnog režima u scenariju snažnih klimatskih promjena, s naglaskom na moguće učinke uz obale. Novije studije proširuju taj pristup složenijim modelnim lancima i višom razlučivošću. Ruol i dr. [4] analiziraju reprezentativne valove duž talijanske obale, Moulin i dr. [19] u okviru AdriaClim sustava koriste WW3 za razdoblje do 2050., a Denamiel i dr. [20] ispituju ekstremne olujne epizode metodom pseudo-globalnog zagrijavanja. Zajedničko im je da promjene valne klime nisu prostorno jednolike i da su obalna područja posebno osjetljiva na lokalne uvjete.

Iz tablice 1 vidljivo je da se jadranske primjene razlikuju prije svega po tipu mreže i namjeni: nestrukturirane mreže koriste se za detaljan opis otoka i kanala, dok strukturirane, računalno manje zahtjevne, prevladavaju u dugoročnim simulacijama. Kako pregledani radovi ne uspoređuju modele na istoj domeni i s istim vjetrovnim forsiranjem, njihova se točnost ne može izravno usporediti. Kao glavni izvor nesigurnosti ističe se kvaliteta vjetrovnog forsiranja, a parametrizacija whitemcappinga, glavni kalibracijski mehanizam modeliranih valnih visina [5], u dijelu radova nije eksplicitno navedena, što dodatno otežava usporedbu.

Tablica 1. Tehničke karakteristike numeričkih valnih modela primijenjenih na Jadranu

| Rad                      | Model         | Tip mreže                          | Horizontalna razlučivost | Frekvencije – razredi                  | White-capping       | Smjerovi | $\Delta t$       | Vjetar                         | Domena i vremenski raspon                    |
|--------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|---------------------|----------|------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
| Lončar i dr. [9]         | MIKE 21/SW    | Nestrukturirana (2 domene)         | 50–500 m / 750–4800 m    | 26; 0,08–0,95 Hz                       | prema Komenu        | –        | –                | ALADIN 8 km, 3 h               | Jadran; Brački kanal; 4.–6. 2008.            |
| Lončar i dr. [16]        | MIKE 21/SW    | Nestrukturirana                    | 200 m – 7500 m           | 28; 0,08–0,95 Hz                       | nije navedeno       | –        | –                | ALADIN-HR 4 km, 3 h            | Jadran (fokus Rijeka); 1998.–2001.           |
| Dutour Sikirić i dr. [3] | WWM-III       | Nestrukturirana 840bts.            | 10 m – 4 km              | 24; 0,06–1,69 Hz                       | prema Arduinu       | 36       | 300 s            | ALADIN/HR 8 → 2 km             | Jadran + 5 Jonsko; 2016. (operativno)        |
| Barbariol i dr. [10]     | WW3           | Strukturirana pravokutna           | 0,025° (~2 km)           | 32; 0,07–1,34 Hz                       | prema Arduinu (ST4) | 36       | –                | IFS-ECMWF 0,1° + Q-Q korekcija | Jadran + 5 Jonsko; 2018.–2019. (proгноza)    |
| Benetazzo i dr. [17]     | SWAN          | Strukturirana                      | ~1/13° (~8 km)           | $24; f_{n+1}/f_n = 1,1; f_n = 0,05$ Hz | nije navedeno       | 36       | –                | COSMO-CLM ~14 km, 6 h          | Jadran; 1965–1994 / 2070–2099 (A1B)          |
| Bonaldo i dr. [2]        | SWAN          | Strukturirana                      | ~2–7 km                  | – f; 0,05–0,5 Hz                       | nije navedeno       | 36       | 360 s            | COSMO-CLM 8 km                 | Jadran; 1971–2000 / 2071–2100 (RCP 8,5)      |
| Bonaldo i dr. [18]       | SWAN          | Strukturirana kurvilinearne 75×180 | ~2 km (S) – ~10 km (J)   | 25; 0,05–0,5 Hz                        | nije navedeno       | 36       | 360 s            | COSMO-CLM 8 km, 6 h            | Jadran; 1971–2000 / 2071–2100 (RCP 8,5)      |
| Ruol i dr. [4]           | WW3           | Strukturirana pravokutna 361×280   | 0,025° (~2 km)           | 32; 0,07–1,34 Hz                       | nije navedeno       | 36       | 600/150/300/10 s | ERA5 + Q-Q (COSMO-CLM 8 km)    | Jadran; 1981–2010 / 2021–2050 (RCP 4,5; 8,5) |
| Moulin i dr. [19]        | WW3           | Strukturirana (~2 km)              | ~2 km                    | 30; 0,05–0,79 Hz                       | prema Janssensu     | 36       | 180 s            | WRF 6 km                       | Jadran; 1992–2050 (RCP 8,5)                  |
| Denamiel i dr. [20]      | SWAN (AdriSC) | Nestrukturirana (do 10 m)          | 10 m – 3 km              | –                                      | prema Komenu        | –        | –                | WRF 1,5/3/15 km                | Jadran; 36 trodnevni epizoda 1979–2019       |

### 3.2 Modeli strojnog učenja

Metode strojnog učenja u modeliranju valova primjenjuju se kao brzi podatkovni modeli za kratkoročno prognoziranje valnih parametara, kao dopuna numeričkim modelima te kao surogatni modeli koji značajno smanjuju trajanje simulacija. Prednost im je učenje nelinearnih veza između vjetera, prethodnog stanja mora i valnih parametara, no pouzdanost ovisi o kvaliteti ulaznih podataka i validaciji. Mudronja i dr. [21] primijenili su višeslojne perceptronske mreže za prognoziranje Hs u točki središnjeg Jadrana. Optimalni model, s ulazima brzine vjetera i prethodne vrijednosti Hs, pokazao je dobro slaganje s mjerenjima. Berbić i dr. [12] usporedili su ANN i SVM za kratkoročno prognoziranje Hs: oba ML modela nadmašila su referentni numerički model MIKE 21/SW. Bujak i dr. [13] primijenili su interpretabilne modele temeljene na stablima odlučivanja za hindcast ekstremnih valnih visina u Riječkom zaljevu, postižući znatno bolju točnost od regionalnih reanaliza. Portillo Juan i dr. [22] upozoravaju da se u primjenama ANN modela u oceanskom inženjerstvu najčešće razmatra ulazna nesigurnost, dok su nesigurnosti strukture i parametara modela rjeđe obrađene. Preporučuju vrednovanje nesigurnosti. Mlakar i dr. [23] razvili su DELWAVE 1.0, deep-learning surogat za SWAN u klimatskim skalama na Jadranu. Model je treniran na COSMO-CLM i SWAN izlazima, postiže točnost od nekoliko centimetara za Hs i smanjuje računalnu cijenu, ali ostaje ograničen na točkaste izlaze duž obale.

## 4 Zaključak

Pregled istraživanja pokazuje da je modeliranje valova na Jadranu i dalje zahtjevno zbog poluzatvorenog oblika bazena, složene obalne morfologije, brojnih otoka i prostornih razlika u vjetrovnom polju. Numerički spektralni modeli trećeg naraštaja osnovni su alat za prognozu i analizu valne klime, ali njihova točnost uvelike ovisi o kvaliteti vjetrovnog forsiranja. To je posebno važno kod bure i juga, gdje nedovoljna razlučivost atmosferskih modela može dovesti do podcjenjivanja valnih visina i slabijeg opisa ekstremnih događaja. Ekstremni valni uvjeti ostaju važno pitanje za primjene u obalnom inženjerstvu. Problem je posebno izražen u međuotočnom i kanalskom prostoru hrvatske obale, gdje na valno polje snažno utječu ograničeno privjetrište, zaklanjanje otocima, lokalna batimetrija i nagle promjene smjera vjetera. Zbog toga su potrebna dodatna mjerenja valnih parametara, bolja validacija modela i povećanje prostorne razlučivosti u priobalju. Metode strojnog učenja pokazuju potencijal kao dopuna numeričkim modelima, ponajprije za brzu točkastu prognozu i korekciju sustavnih pogrešaka, dok se ne očekuje da u skoroj budućnosti zamijene numeričke modele u prostornom modeliranju valnog polja. Vjerojatan smjer daljnjeg razvoja je hibridno korištenje mjerenja, numeričkih modela i podatkovnih metoda.

## Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektima (HR-ZZ-DOK-2025-02-3371) i (IP-2022-10-7598).

## Literatura

- [1] Katalinić, M., Parunov, J.: Wave statistics in the Adriatic Sea based on 24 years of satellite measurements, *Ocean Engineering* 158 (2018), pp. 378–388.
- [2] Bonaldo, D., Bucchignani, E., Ricchi, A., Carniel, S.: Wind storminess in the Adriatic Sea in a climate change scenario, *Acta Adriatica* 58 (2017) 2, pp. 195–208.
- [3] Dutour Sikirić, M., Ivanković, D., Roland, A., Ivatek-Šahdan, S., Tudor, M.: Operational wave modelling in the Adriatic Sea with the Wind Wave Model, *Pure and Applied Geophysics* 175 (2018) 11, pp. 3801–3815.
- [4] Ruol, P., Martinelli, L., Favaretto, C., Barbariol, F., Benetazzo, A.: Representative and morphological waves along the Adriatic Italian coast in a changing climate, *Water* 14 (2022) 17, 2678.
- [5] Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., et al.: Wave modelling in coastal and inner seas, *Progress in Oceanography* 167 (2018), pp. 164–233.
- [6] Barbariol, F., Davison, S., Falcieri, F.M., Ferretti, R., Ricchi, A., Sclavo, M., Benetazzo, A.: Wind waves in the Mediterranean Sea: an ERA5 reanalysis wind-based climatology, *Frontiers in Marine Science* 8 (2021), 760614.
- [7] World Meteorological Organization: Guide to Wave Analysis and Forecasting. WMO-No. 702. Geneva, 2018.
- [8] Cavaleri, L., Barbariol, F., Benetazzo, A.: Wind–wave modeling: where we are, where to go, *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (2020) 4, 260.
- [9] Lončar, G., Ocvirk, E., Androžec, V.: Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrovih valova, *Građevinar* 62 (2010) 3, pp. 197–206.
- [10] Barbariol, F., Pezzutto, P., Davison, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Carniel, S., Sclavo, M.: Wind-wave forecasting in enclosed basins using statistically downscaled global wind forcing, *Frontiers in Marine Science* 9 (2022), 1002786.
- [11] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ): Državna mreža meteorološko-oceanografskih plutača, [https://meteo.hr/podaci.php?section=podaci\\_vrijeme&param=mop](https://meteo.hr/podaci.php?section=podaci_vrijeme&param=mop) [pristupljeno: svibanj 2026.].
- [12] Berbić, J., Ocvirk, E., Carević, D., Lončar, G.: Application of neural networks and support vector machine for significant wave height prediction, *Oceanologia* 59 (2017) 3, pp. 331–349.

- [13] Bujak, D., Miličević, H., Lončar, G., Carević, D.: Hindcasting extreme significant wave heights under fetch-limited conditions with tree-based models, *Journal of Marine Science and Engineering* 13 (2025) 7, 1355.
- [14] Ćorak, M., Mikulić, A., Katalinić, M., Parunov, J.: Uncertainties of wave data collected from different sources in the Adriatic Sea and consequences on the design of marine structures, *Ocean Engineering* 266 (2022), 112738.
- [15] Copernicus Marine Service: Global Ocean L3 Significant Wave Height From NRT Satellite Measurements.
- [16] Lončar, G., Šreng, Ž., Miličević, H., Ostojić, S.: Increase of wave height due to transition in wind direction – example: Rijeka Bay, *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek* 18 (2019), pp. 57–70.
- [17] Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E., Sclavo, M.: Wave climate of the Adriatic Sea: a future scenario simulation, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12 (2012) 6, pp. 2065–2076.
- [18] Bonaldo, D., Bucchignani, E., Pomaro, A., Ricchi, A., Sclavo, M., Carniel, S.: Wind waves in the Adriatic Sea under a severe climate change scenario and implications for the coasts, *International Journal of Climatology* 40 (2020) 12, pp. 5389–5406.
- [19] Moulin, A., Mentaschi, L., Clementi, E., Verri, G., Mercogliano, P.: Projections of the Adriatic wave conditions under climate changes, *Frontiers in Climate* 6 (2024), 1409237.
- [20] Denamiel, C., Pranić, P., Quentin, F., Mihanović, H., Vilibić, I.: Pseudo-global warming projections of extreme wave storms in complex coastal regions: the case of the Adriatic Sea, *Climate Dynamics* 55 (2020) 9–10, pp. 2483–2509.
- [21] Mudronja, L., Matić, P., Katalinić, M.: Data-based modelling of significant wave height in the Adriatic Sea, *Transactions on Maritime Science* 6 (2017) 1, pp. 5–13.
- [22] Portillo Juan, N., Matutano, C., Negro Valdecantos, V.: Uncertainties in the application of artificial neural networks in ocean engineering, *Ocean Engineering* 284 (2023), 115193.
- [23] Mlakar, P., Ricchi, A., Carniel, S., Bonaldo, D., Ličer, M.: DELWAVE 1.0: deep learning surrogate model of surface wave climate in the Adriatic Basin, *Geoscientific Model Development* 17 (2024) 12, pp. 4705–4725.