

UDK 551.466.081(262.3)(497.5):551.461.2:523.34-423.3:528.225

Izvorni znanstveni članak

# Promjene razine mora i varijacije Mjesečevih deklinacija u nutacijskom razdoblju na četiri mareografa u Hrvatskoj

Milan REZO, Drago ŠPOLJARIĆ, Marko ŠLJIVARIĆ – Zagreb<sup>1</sup>

*SAŽETAK.* U radu su objašnjeni uzroci nastanka plime i oseke (morskih mijena), te opisani sila uzročnica plimnih valova i nutacijsko razdoblje. Opisani su i geometrijski položaji Mjeseca i Sunca u odnosu na Zemlju, koji definiraju maksimalnu ili minimalnu visinu plimnog vala. Dan je kratki pregled mjerenja razine mora duž istočne obale Jadranskog mora s trenutačnim stanjem izgrađenih stalnih i privremenih mjernih postaja. Povezanost promjena Mjesečevih deklinacija s promjenama razine mora objašnjena je analizom izračunatih srednjih razina mora u nutacijskom razdoblju od 18,61 godine za mareografe: Dubrovnik, Split, Bakar i Rovinj. Izračunate su srednje razine mora za 34 epohe (6794 dana) s ukupno 230 996 dnevnih srednjih vrijednosti razina mora.

*Ključne riječi:* morske mijene, mareografska mjerenja, Mjesečeva deklinacija, nutacijsko razdoblje, srednja razina mora.

## 1. Uvod

Srednjom razinom mora određenom iz mareografskih mjerenja u razdoblju od 18,61 godine definira se za odabranu epohu nulta ploha nazvana geoidom, od koje se određuju visine u različitim visinskim sustavima. Dakle, tom je plohom definirano ishodište visinskog datuma. Analizom mareografskih mjerenja u Hrvatskoj od 1953. do 2006. godine ustanovit će se u kakvoj su matematičkoj relaciji srednje razine mora u odnosu na prihvaćenu epohu za koju je de-

<sup>1</sup> dr. sc. Milan Rezo, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: mrezo@geof.hr,

Prof. dr. sc. Drago Špoljarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: drago.spoljaric@geof.hr,

dr. sc. Marko Šljivarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: msljivar@geof.hr.

finiran visinski datum Republike Hrvatske. Ujedno, utvrdit će se smjer i iznos promjena srednjih razina mora i njihova povezanost s periodičnim promjenama nutacije.

## 2. Gibanja mora i oceana – morske mijene

Razine mora i oceana stalno se mijenjaju. Promjene morske razine su globalne ili lokalne, a nastaju zbog promjene mase vode u oceanima i morima ili zbog promjene volumena oceanskog i morskog prostora. Mikroklimatske promjene iskazane meteorološkim parametrima tlaka zraka i vjetra, oborine i različite količine dotoka vode iz riječnih slijevova kao i geološko-tektonski procesi uzrokuju lokalne i brze promjene morske razine. Globalni klimatski procesi, primjerice globalno zatopljenje (povećanje volumena vode) i otapanje ledenjaka (povećanje mase vode), imaju za posljedicu globalni porast razine mora i oceana u duljem vremenskom razdoblju (Pugh 2004). Privlačne sile Mjeseca i Sunca također djeluju na promjenu morske razine, vidljivu u poludnevnom, dnevnom, polumjesečnim, mjesečnim, godišnjim i višegodišnjim promjenama (isto). Znanstvene studije i analize temeljene na pouzdanim višedesetljetnim mjerenjima povezuju nastale promjene uz vremensko razdoblje od 18,61 godine u kojem minimalna/maksimalna Mjesečeva deklinacija varira između  $18^{\circ}5'$  i  $28^{\circ}5'$  s obzirom na srednji položaj ravnine ekliptike od  $23,5^{\circ}$  i priklona Mjesečeve orbite na ekliptiku od  $5^{\circ}$  do  $-5^{\circ}$  (isto). Geologija tla na područjima mjerenja razine mora podložna je stalnim geodinamičkim procesima (potresima, pomicanjima tektonskih ploča) koji mijenjaju razinu mora kao i okolno kopno (Lambeck i dr. 2004). Nastale vidljive promjene Zemljine površine u vertikalnom smislu, uzdizanja ili slijeganja, obvezuju geoznanstvenike na temeljitu geološku analizu pri odabiru lokacija za postavljanje mareografskih postaja, kao i interpretaciju mjerenih podataka s ciljem predviđanja mogućih katastrofalnih pojava.

Prva su znanstvena objašnjenja veze između morskih mijena i Mjeseca dali znanstvenici u XVI. i XVII. stoljeću (Pugh 2004). Među prvima je Johannes Kepler (1596.–1650.), istražujući putanje gibanja planeta oko Sunca, opisao utjecaj Mjesečeva gravitacijskog privlačenja, koje se na Zemlji uočava kao izdizanje (plima) i spuštanje (oseka) morskih razina. Tu je ideju u potpunosti razradio Isaac Newton (1642.–1727.) objavljivanjem Zakona gravitacije 1687. godine, pri čemu su objašnjene pojave ponovljivih poludnevnih plima i utjecaj relativnih promjena položaja Mjeseca i Sunca na veličinu plimnog vala. Na Newtonov je poticaj njegov suvremenik Edmond Halley (1656.–1742.) izveo prva sustavna mjerenja i izradio prvu kartu plimnih valova u Engleskom kanalu (La Manche) (URL 1). Osnovna saznanja o privlačenju dvaju tijela bila su temelj daljnjih znanstvenih istraživanja dvojice znanstvenika, Daniella Bernoullija (1700.–1782.) (URL 2) i Pierre-Simona de Laplacea (1749.–1827.) (URL 3), koji objašnjavaju promjene i veličinu plime s obzirom na međusobna privlačna djelovanja u sustavu Zemlja-Mjesec. Nadalje, pojavu poznatu kao obrnuti barometrijski efekt, odnosno povezanost visokog (niskog) atmosferskog tlaka i niže (više) razine mora (oseka), objasnio je James Clark Ross (1800.–1862.) (URL 4). Prva značajna predviđanja (predikcije) pojave i veličine plime dao je lord Kelvin (1824.–1907.) (URL 5) jednadžbom rasprostiranja plimnih valova povezanih sa

Zemljinom rotacijom. Prva mareografska postaja za automatiziranu registraciju razine mora izgrađena je 1831. godine na ušću rijeke Temze, a ubrzo je britanska vlada objavila prve tablice s godišnjim promjenama plime, namijenjene pomorcima (Pugh 2004).

Suvremena praćenja i podaci razine mora i morskih mijena nužni su za različite djelatnosti vezane uz more, primjerice: sigurnost plovidbe, hidrografska i druga istraživanja na moru i u podmorju, utjecaj na obalnu infrastrukturu, znanstveno-stručne analize kolebanja razine mora na vremenskim skalama, praćenje trenda globalnog porasta razine mora, definiranje morske obale, pomorskog dobra te teritorijalnog mora i drugo.

### 3. Sila uzročnica morskih mijena i nutacijsko razdoblje

Zemljino gibanje oko Sunca, a posebice dinamika sustava Zemlja-Mjesec, uzrokuje svakodnevnu promjenu razina mora i oceana, odnosno nastanak plime i oseke. Newton je prvi ispravno protumačio nastajanje te pojave. Prema Newtonovu zakonu gravitacije dva tijela privlače jedno drugo silom koja je proporcionalna umnošku njihovih masa i obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti među njima (Bašić 2009, Čolić 1996, Heiskanen i Moritz 1996, Klak 1974, Moritz 1990, Pugh 2004, Torge 2001, Roy 1988):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

gdje je  $G$  konstanta gravitacije  $(6,67428 \pm 0,00067) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  (URL 7),  $r$  međusobna udaljenost tijela,  $m_1$  masa prvog, a  $m_2$  masa drugog tijela. Newtonova teorija pretpostavlja privlačenje između dvaju tijela točkastih masa, zanemarivih veličina. Zakon gravitacije dobra je aproksimacija za dva tijela kojima je veličina zanemariva u odnosu prema njihovim udaljenostima.

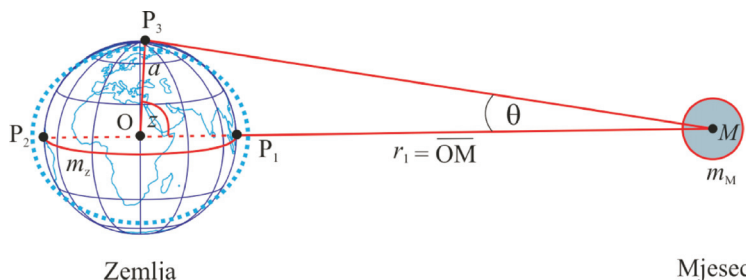
Razmotrimo plimnu silu uzimajući u obzir djelovanje Mjeseca. Ako primijenimo izraz (1) na točku  $P_1$  mase  $m$  koja se nalazi na Zemljinoj površini, te označimo s  $r_1$  udaljenost Zemlja-Mjesec ( $\overline{OM}$ ), polumjer Zemlje s  $a$  i masu Mjeseca s  $m_M$  (slika 1), tada je sila privlačenja Mjeseca u točki  $P_1$  (Pugh 2004):

$$G \frac{m m_M}{(r_1 - a)^2}, \quad (2)$$

a Mjesečeva privlačna sila u točki  $O$  smještenoj u Zemljinu središtu je:

$$G \frac{m m_M}{r_1^2}, \quad (3)$$

ujedno je ta sila u promatranoj točki jednaka centrifugalnoj sili revolucije.



Slika 1. Prikaz privlačnog djelovanja sustava Zemlja-Mjesec (prema Pugh 2004).

Iz razlike izraza (2) i (3) možemo izračunati silu uzročnicu plimnih valova u točki  $P_1$ :

$$Gmm_M \left[ \frac{1}{(r_1 - a)^2} - \frac{1}{r_1^2} \right] = \frac{Gmm_M}{r_1^2} \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{r_1}\right)^2} - 1 \right]. \quad (4)$$

Prvi dio izraza u uglatoj zagradi, supstitucijom  $\beta = a/r_1 \cong 1/60$  i aproksimacijom, možemo napisati:

$$[1/(1 - \beta)^2] \cong 1 + 2\beta'' \quad (5)$$

za male vrijednosti  $\beta''$ .

I na kraju, sila uzročnica plimnih valova u točki  $P_1$  koja nastoji udaljiti čestice vode od Zemljina središta (slika 2), određena je izrazom (isto):

$$\text{Sila uzročnica u } P_1 = \frac{2Gmm_M a}{r_1^2}. \quad (6)$$

Analogno prethodnom za točku  $P_2$  gravitacijsko djelovanje ima suprotni predznak, tj. čestice vode udaljavaju se od Zemljina središta:

$$\text{Sila uzročnica u } P_2 = -\frac{2Gmm_M a}{r_1^3}. \quad (7)$$

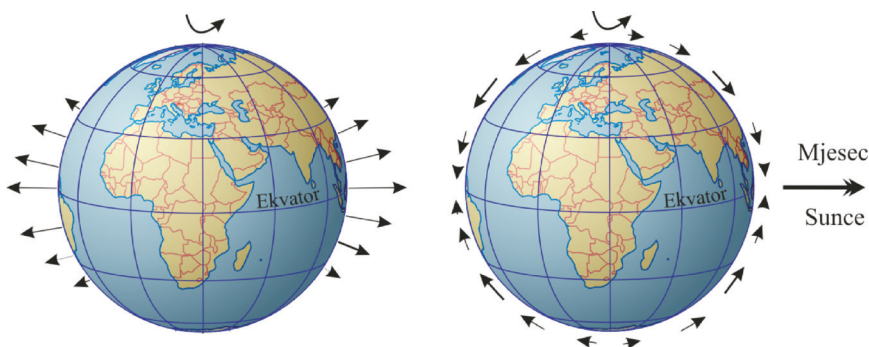
Za točku  $P_3$  gravitacijsko djelovanje možemo iskazati izrazom:

$$\text{Sila uzročnica u } P_3 = \frac{Gmm_M}{r_1^2} \sin \theta. \quad (8)$$

Ako se zbog udaljenosti Mjeseca i Zemlje u izrazu (8) uzme da je  $\sin \theta \cong 1/60$ , onda je ukupna privlačna sila u točki  $P_3$  usmjerena prema Zemljinu središtu, odnosno čestice vode približavaju se Zemljinu središtu:

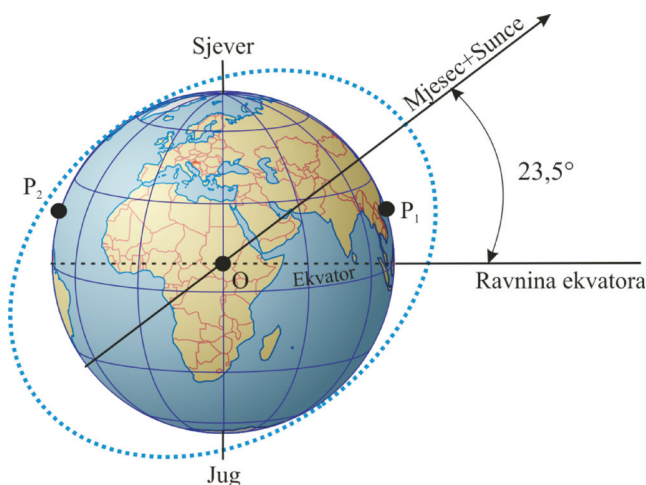
$$\text{Sila uzročnica u } P_3 = \frac{Gmm_M a}{r_1^3}. \quad (9)$$

Raspored djelovanja plimnih sila oko Zemlje vidimo na slici 2. Vertikalne komponente plimne sile najveće su oko ekvatora, a njihovo djelovanje jednako je nuli na širini od  $35^\circ$ . Horizontalne komponente plimne sile imaju maksimalno djelovanje na širinama od  $45^\circ$ .



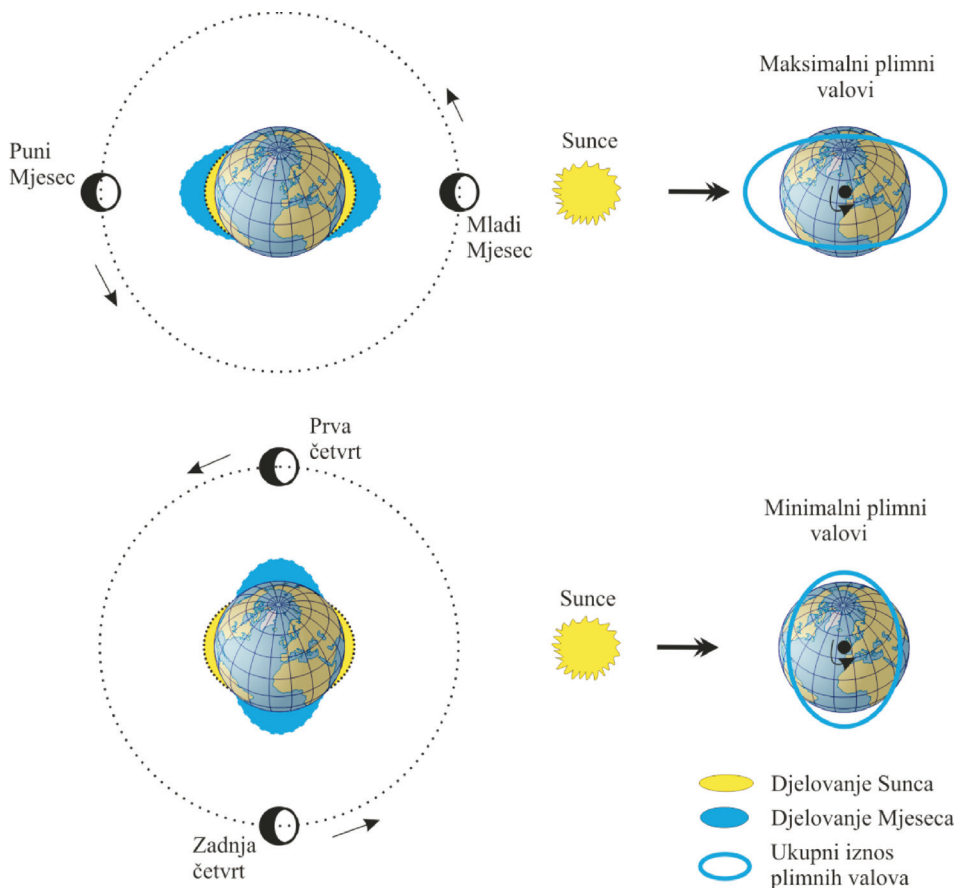
Slika 2. Raspored i smjer djelovanja vertikalnih i horizontalnih privlačnih sila u odnosu na Zemljino središte.

Zbog Zemljine rotacije (rotacijska os je okomita na spojnicu Zemlja-Mjesec) u istom se danu pojavljuju dvije visoke i dvije niske vode. Taj se ciklus plime i oseke naziva poludnevni. Veličina plimnog vala u istom danu bit će jednaka samo onda kada se točke  $P_1$  i  $P_2$  nalaze na ekvatoru uz zanemarivanje ostalih utjecaja (URL 8). Ako su točke u položajima kao na slici 3, onda će veličina plimnog vala u točki  $P_1$  biti veća nego za pola dana kasnije u točki  $P_2$ .



Slika 3. Plimni val na ekvatoru i u točkama  $P_1$  i  $P_2$ .

Maksimalni ili minimalni iznos plimnog vala ovisi o položaju Mjeseca i Sunca u odnosu na Zemlju. Kada se Zemlja, Mjesec i Sunce nalaze na približno istom pravcu, tj. u vrijeme mladog ili punog Mjeseca (sizigije), plimni valovi su naglašeniji zbog sumarnoga gravitacijskog djelovanja Mjeseca i Sunca (isto). Za vrijeme kvadrature, Mjesec u prvoj ili posljednjoj četvrti, sila uzročnica plimnih valova je slabija jer se Mjesečevo djelovanje umanjuje za 46% Sunčeva djelovanja (slika 4).



Slika 4. Maksimalni i minimalni plimni valovi.

Poludnevne i dnevne promjene plimnih valova uzrokovane promjenom položaja Mjeseca i Sunca važne su primjerice geofizičarima i oceanografima. Za potrebe geodezije i definiranja nulte plohe mora nužno je mjeriti, računati i interpretirati rezultate u vremenskom razdoblju od 18,61 godine, tzv. nutacijskom razdoblju.

### 3.1. Nutacija

Složeno gravitacijsko djelovanje Mjeseca i Sunca na spljoštenu Zemlju uzrokuje stalnu promjenu položaja Zemljine rotacijske osi (odnosno svjetske osi) u prostoru. Pritom Zemljina rotacijska os zadržava stalnu (ako zanemarimo nutacijsko gibanje) nagnutost na ekliptičku ravninu opisujući plašt stošca oko ekliptičke osi s vrhom u Zemljinu središtu, odnosno nebeski polovi opisuju u razdoblju od 25 776 godina kružnicu oko ekliptičkih polova. Ta se pojava naziva precesijom. Precesija spada u dugoperiodično gibanje, te zbog iznimno dugog ciklusa nije predmetom analize njezina utjecaja na određivanje srednje razine mora. Kratkoperiodično osciliranje prave svjetske osi oko njezina srednjeg položaja definiranog luni-solarnom precesijom naziva se nutacijom. Nutacija je posljedica promjenjivih gravitacijskih djelovanja Mjeseca (najvećim dijelom) i Sunca na Zemlju, zbog stalne promjene međusobnih položaja Mjeseca, Sunca i Zemlje. Nutacijskim gibanjem pravi nebeski polovi opisuju elipsu s osima 18.4" i 13.7" u razdoblju od 18,61 godine (Moritz i Mueller 1987, Seidelmann 1992, Dickey 1995). Nutacijsko gibanje može se prikazati kao suma dvaju kružnih gibanja (progresivno + retrogradno) s jednakim periodom, ali različite amplitude i smjera. Zbog nutacije svjetska os ne opisuje pravilne precesijske kružnice, već su na kružnicama izraženi tzv. nutacijski nabori u obliku sinusoida. Nutacijsko se gibanje može iskazati kutnim promjenama u duljini i nagibu (priklonu), tj. pomakom pravog nebeskog pola u odnosu na srednji pol s pomoću dviju veličina:  $\Delta\Psi$ , koja označava kutnu promjenu nutacije po longitudi, i  $\Delta\varepsilon$ , koja označava kutnu promjenu nutacije po priklonu ekvatora prema ekliptici. Konačni izrazi za nutaciju po longitudi i po priklonu glase (Astronomical Almanac 2010):

$$\Delta\Psi = -(17,199'' + 0,01742'' T) \sin \Omega + (0,2062'' + 0,00002'' T) \sin 2\Omega - \dots \quad (10)$$

$$\Delta\varepsilon = -(0,2274'' + 0,00002'' T) \sin 2\theta + (0,0712'' + 0,00001'' T) \sin l - \dots \quad (11)$$

$$\Omega = 450160,280'' - (6480000'' + 482890,539'')T + 7,455'' T^2 + 0,008'' T^3, \quad (12)$$

gdje je  $\Delta\Psi$  dugoperiodični član u duljini,  $\Delta\varepsilon$  kratkoperiodični član u duljini,  $T$  dio Julijanskog stoljeća epohe J2000,0,  $\Omega$  srednja duljina uzlaznog čvora Mjesečeve putanje,  $\theta$  srednja duljina Mjeseca i  $l$  srednja anomalija Mjeseca.

S obzirom na orbitalna kretanja Mjeseca oko Zemlje i sustava Zemlja-Mjesec (i planeta) oko Sunca uočljiva su poludnevna, 13,7 dnevna, polugodišnja i godišnja, te 9,3 i 18,6 godišnja nutacijska razdoblja. Osamnaestogodišnje nutacijsko razdoblje odgovara preporučenom (potrebno) vremenskom razdoblju kontinuiranih mareografskih mjerenja iz kojih se računa srednja razina mora.

Ukupni učinak precesijsko-nutacijskoga gibanja značajan je ne samo za razumijevanje osamnaestogodišnjeg ciklusa promjena razina mora i oceana već i za prostornu orijentaciju koordinatnih osi (Zemljini orijentacijski parametri).

#### 4. Mjerenja razine mora u Hrvatskoj i službeni visinski datum

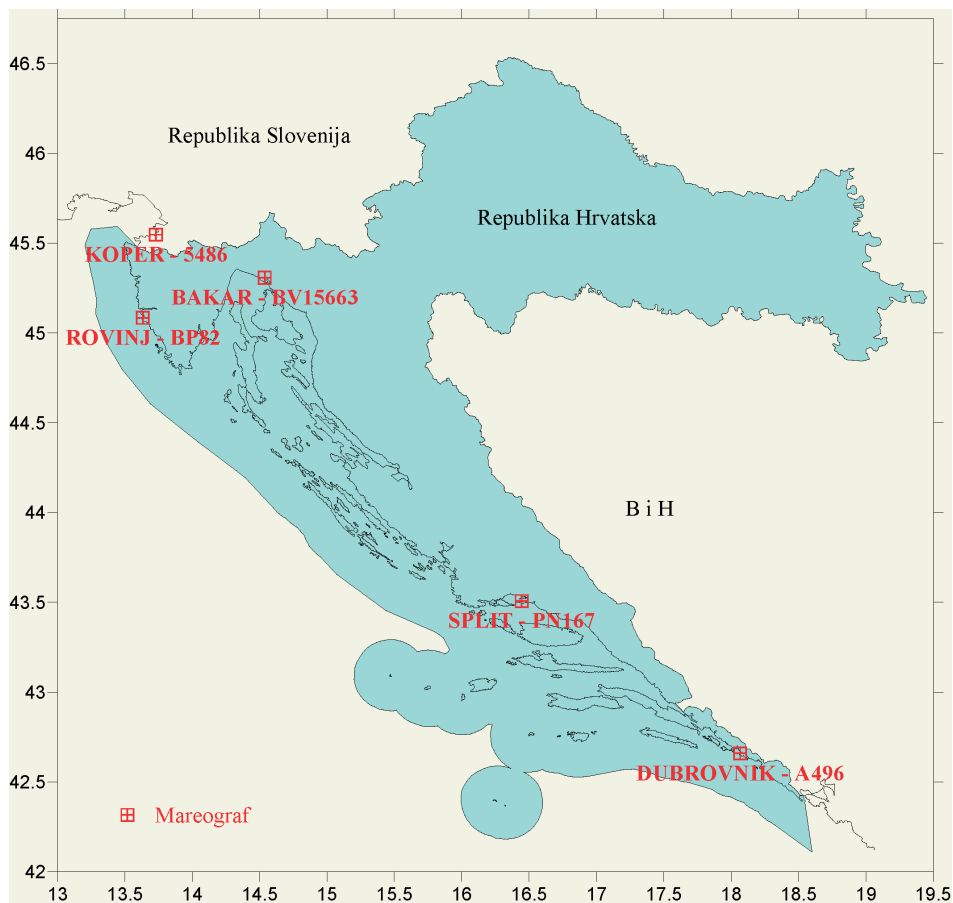
Uspostavom mareografskih postaja u Bakru, a zatim i u Splitu (u luci) 1929. godine (Hrvatski hidrografski institut 2007) počinju praćenja promjena razine mora na istočnoj obali Jadranskog mora. Mareograf u Bakru nalazi se u zgradi ispostave Lučke kapetanije i danas je u sustavu Geofizičkog zavoda "Andrija Mohorovičić" Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Mjerenja razine mora na mareografu, uz tri kraća prekida, trajala su do 1939. godine. Nakon II. svjetskog rata, od 1949. godine, nastavljena su kontinuirana mjerenja sve do 1959. godine, kada nastaje prekid zbog popravka mjernog uređaja. Mareograf u Splitu smješten je na molu sv. Nikole ispred Lučke kapetanije i danas je u sustavu mareografa Hrvatskoga hidrografskog instituta u Splitu. Mareograf je u funkciji od 1947. godine, s prethodnim radom od 1929. do 1941. godine. Registracije razine mora na mareografu u splitskoj luci prekinute su ratnim događanjima te nastavljene 1947. godine, s jednogodišnjim prekidom registracije. Prva mareografska mjerenja nisu imala osobito značenje za geodeziju zbog učestalih duljih prekida, odnosno nekontinuirane dnevne registracije mareografskih podataka u duljem razdoblju. Takva se mjerenja nisu mogla upotrijebiti za računanje srednje razine Jadranskog mora, odnosno definiranje nulte referentne plohe potrebne za visinsku izmjeru. Uz spomenute postaje nastavljena je gradnja mareografske postaje u Splitu na rtu Marjan, na kojoj su mjerenja započela u svibnju 1952. godine. U južnom dijelu istočne obale Jadranskog mora sagrađena je mareografska postaja u Dubrovniku, u uvali Sumartin na poluotoku Lapadu, a prva mareografska mjerenja počinju u ožujku 1954. godine. Posljednji u nizu izgrađen je mareograf u Rovinju, smješten zapadno od crkve sv. Eufemije, a prva je mjerenja započeo u ožujku 1955. godine. Nalazi se u sustavu mareografa Hrvatskoga hidrografskog instituta. Detaljni pregled mareografskih postaja i opis morskih mijena u Jadranskom moru s novim pristupom motrenja promjena razina mora u Hrvatskoj vidi u Vilibić i dr. (2005).

Potreba praćenja razine mora uvjetovala je gradnju fiksnih i prijenosnih mareografa. Prema podacima službe Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) danas u Republici Hrvatskoj postoji 17 stalnih i prijenosnih postaja: Bakar, Broče, Dubrovnik, Gaženica, Mali Ston, Rijeka, Rovinj, Split-Luka, Split Rt Marjan, Sućuraj, Vis, Vis-Češka vila, Zadar, Zlarin, Žirje, Ušće Neretve i Ubli na Lastovu (URL 6).

Republika Hrvatska je nakon osamostaljenja naslijedila geodetske referentne sustave koje je primjenjivala bivša država. Tako se, primjerice, još i danas za određivanje visine upotrebljava stari austrijski visinski datum za epohu 1875,0 (AVD1875), izračunan iz jednogodišnjih mjerenja razine mora na mareografu u Trstu.

Početak šezdesetih godina prošlog stoljeća nametnula se potreba definiranja i određivanja novoga visinskog datuma iz mareografskih mjerenja razine mora u preporučenom vremenskom razdoblju od 18,61 godine. Za izračun novoga visinskog datuma upotrijebljena su mareografska mjerenja od 16. 3. 1962. do 20. 10. 1980. na 5 mareografskih postaja – Dubrovnik, Split, Bakar, Rovinj i Kopar (slika 5). Na temelju tih mjerenja određena je srednja razina mora, koja na mareografskim postajama realizira položaj plohe geoida kao ishodišne plohe za određivanje





Slika 5. Prikaz analiziranih mareografa na istočnoj strani Jadranskog mora.

visina (Feil i dr. 2004). Odlukom Vlade RH od 4. kolovoza 2004. godine (NN 2004) taj je visinski datum i službeno prihvaćen kao Hrvatski visinski datum za epohu 1971,5 (HVD71).

## 5. Analiza mareografskih mjerenja s osvrtom na nutacijsko razdoblje

Izdizanje i spužtanje razine oceana i mora, nastanak plime i oseke, složeni je proces. Osim revolucije sustava Zemlja-Mjesec razlog tome je i Zemljina rotacija, promjena udaljenosti Zemlja-Mjesec te varijacije Mjesečeve deklinacije. Naime, Mjesec je glavni “pokretač” morskih mijena, a minimalni ili maksimalni iznos plimnog vala ponajprije ovisi o položaju Mjeseca, kojega minimalne/maksimalne deklinacije variraju između  $18^{\circ}18'$  i  $28^{\circ}36'$  s obzirom na srednji položaj ravnine

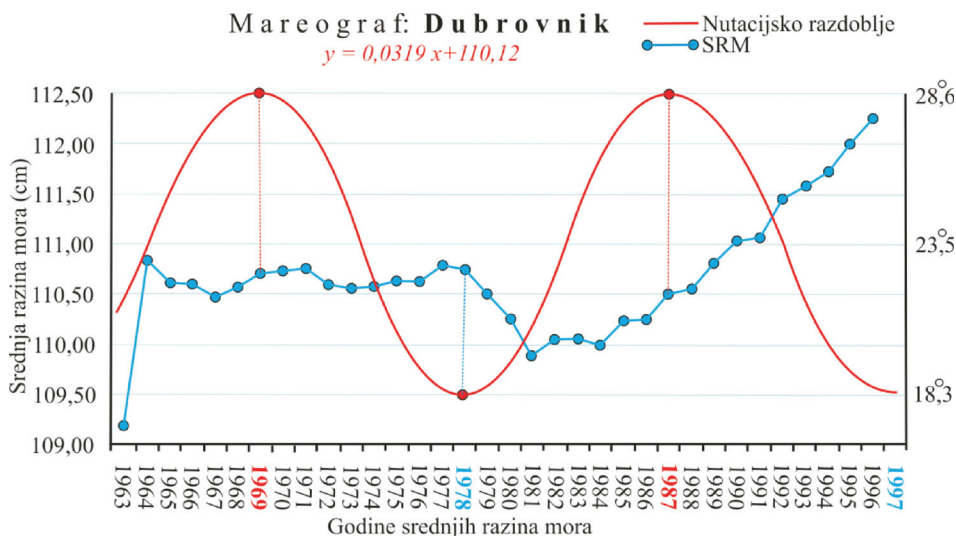
ekliptike. Maksimalne vrijednosti Mjesečevih deklinacija predviđene su za godine 1951., 1969., 1987., 2006. i 2025., a minimalne vrijednosti za 1950., 1978., 1997., 2015. i 2034. godinu (Pugh 2004).

Ciklične promjene morskih mijena povezuju se u znanstvenim i stručnim razmatranjima uz vremensko razdoblje od 18,61 godine, koje je u neposrednoj korelaciji s nutacijskim razdobljem odnosno razdobljem između maksimalnih ili minimalnih Mjesečevih deklinacija.

Za određivanje smjera i iznosa promjena srednje razine mora u odnosu na odabranu epohu 1971,5 za koju je definiran visinski datum RH, analizirana su mareografska mjerenja od 1953. do 2006. godine na svim mareografima. Utvrđivanje povezanosti s nutacijskim razdobljem i varijacijama Mjesečevih deklinacija (18,61 godina s preklomom od 9,3 godine prije i poslije) analizirana su mareografska mjerenja za epohe 1963,5 do 1996,5 (34 epohe) s ukupno 230 996 dnevnih srednjih vrijednosti. Naime, broj epoha računanja srednje razine mora (34) uvjetovan je činjenicom da je Rovinj, posljednji od 4 izgrađena mareografa na teritoriju RH, počeo kontinuirana mjerenja 1955. godine. Zbog toga je za mareograf u Rovinju jedna epoha manje.

## 5.1. Mareograf u Dubrovniku

Mareograf u Dubrovniku opremljen je sustavom za očitavanje srednje razine A. Ott, Kempten s odnosom registracije zapisa 1:5. Za maksimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1987. godini minimalna je srednja razina mora na mareografu u Dubrovniku 110,50 cm, a za minimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1978. godini maksimalna je srednja razina mora 110,74 cm (slika 6).



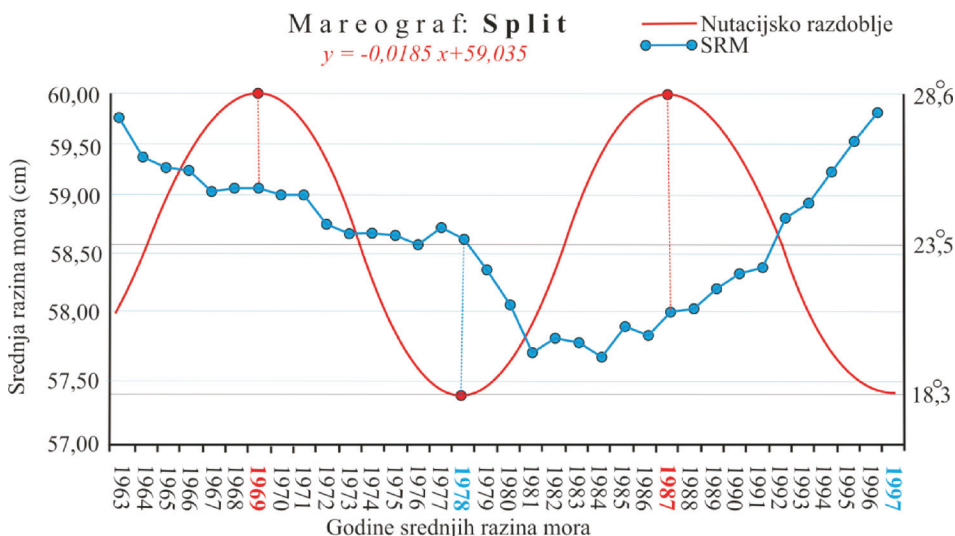
Slika 6. Promjene srednje razine mora od 1963. do 1996. godine i krivulja nutacijskog razdoblja.

Prema teorijskim pretpostavkama promjene razine mora su, ponajprije, ovisne o morskim mijenama odnosno o amplitudi plimotvorne sile koja je u korelaciji s minimalnom i maksimalnom Mjesečevom deklinacijom (Pugh 2004).

Sukladno teorijskim pretpostavkama na tom se mareografu tek od 1978. godine uočava prepoznatljiva korelacija promjena razina mora i Mjesečevih deklinacija (slika 6) s obzirom na to da je standardno odstupanje srednje razine mora unutar 1 cm (Rezo 2010).

## 5.2. Mareograf u Splitu (luka)

Mareograf u Splitu opremljen je sustavom za očitavanje srednje razine A. Ott, Kempton s odnosom registracije zapisa 1:5. Za maksimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1987. godini minimalna je srednja razina mora na mareografu u Splitu 58,12 cm, a za minimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1978. godini maksimalna je srednja razina mora 58,71 cm (slika 7).



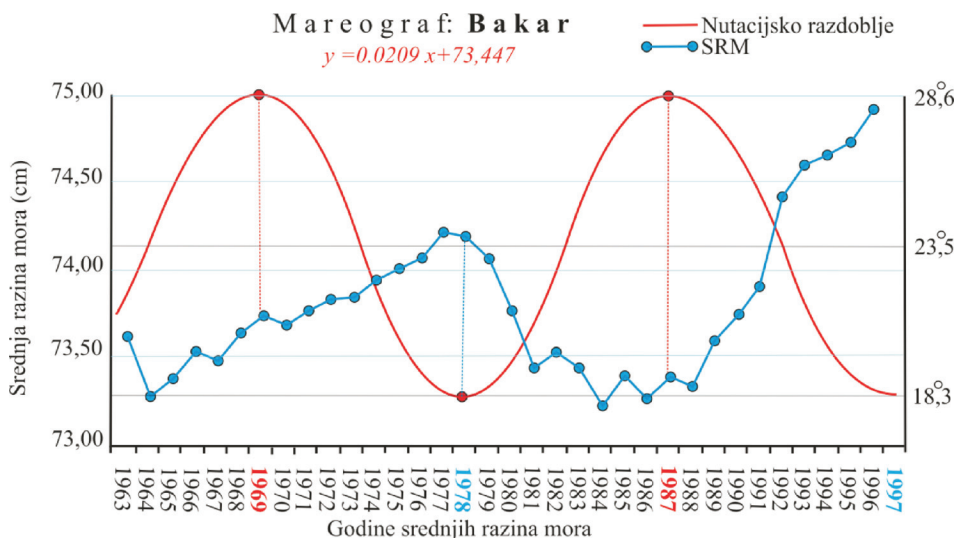
Slika 7. Promjene srednje razine mora od 1963. do 1996. godine i krivulja nutacijskog razdoblja.

Srednja razina mora u Splitu do 1977./1978. godine u stalnom je padu, što je suprotno teorijskim očekivanjima (slika 7). Taj je trend opisan jednadžbom pravca s negativnim predznakom ( $y = -0,0185x + 59,035$ ) koji objašnjavamo lokalnim geodinamičkim procesima, fizikom mareografske postaje i nestabilnošću indeksa mareografskog uređaja.

I na tom se mareografu tek od 1978. godine uočava prepoznatljiva korelacija promjena razina mora i Mjesečevih deklinacija (slika 7) s obzirom na to da je standardno odstupanje srednje razine mora bolje od 1 cm (isto).

### 5.3. Mareograf u Bakru

Mareograf u Bakru do 1979. godine opremljen je sustavom za očitavanje srednje razine O. A. Ganser, a sustavom A. Ott, Kempten od 1979. godine s odnosom registracije zapisa 1:5. Za maksimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1987. godini minimalna je srednja razina mora na mareografu u Bakru 73,38 cm, a za minimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1978. godini maksimalna je srednja razina mora 74,19 cm (slika 8).



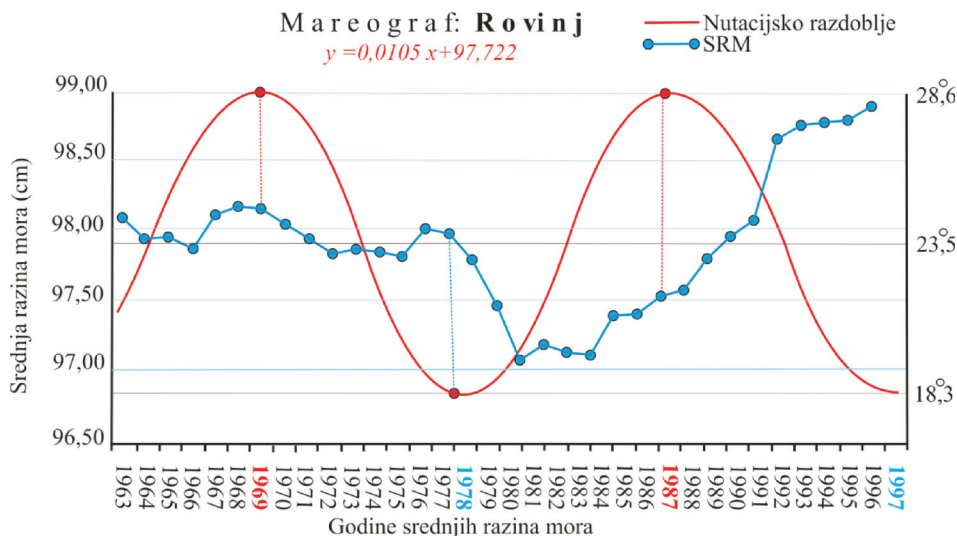
Slika 8. Promjene srednje razine mora od 1963. do 1996. godine i krivulja nutacijskog razdoblja.

Na ovom mareografu, kroz dulje mjerno razdoblje (praktično od 1969.), promjene srednje razine mora imaju prepoznatljivu korelaciju s teorijskim postavkama: za minimalne Mjesečeve deklinacije u 1978. i 1997. (1996.) godini maksimalne su srednje razine mora, dok su za godine 1969. i 1987. minimalne srednje razine mora (slika 8).

### 5.4. Mareograf u Rovinju

Mareograf u Rovinju također je opremljen sustavom za očitavanje srednje razine A. Ott, Kempten s odnosom registracije zapisa 1:5. Za maksimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1987. godini minimalna je srednja razina mora na mareografu u Rovinju 97,52 cm, a za minimalnu vrijednost Mjesečeve deklinacije u 1978. godini maksimalna je srednja razina mora 97,97 cm (slika 9).

Na rovinjskom mareografu, sukladno teorijskim pretpostavkama, tek od 1978. godine uočava se prepoznatljiva korelacija promjena razina mora i Mjesečevih deklinacija (slika 9).



Slika 9. Promjene srednje razine mora od 1963. do 1996. godine i krivulja nutacijskog razdoblja.

## 6. Zaključak

Prema teorijskim pretpostavkama promjene razine mora su, ponajprije, ovisne o morskim mijenama odnosno o amplitudi plimotvorne sile koja je u korelaciji s minimalnom i maksimalnom Mjesečevom deklinacijom.

Usporedbom promjena srednjih razina mora i promjena minimalnih i maksimalnih Mjesečevih deklinacija u nutacijskom razdoblju uočeno je neslaganje na sva četiri mareografa: Dubrovnik do 1978,5, Split do 1978,5, Bakar do 1969,5 i Rovinj do 1978,5. Tu nekoreliranost objašnjavamo različitim izvorima pogrešaka pri mjerenju dnevnih razina mora ali i činjenicom da je prema geotehničkim analizama 30 godina približno razdoblje stabilizacije objekta u smislu njegova vertikalnoga gibanja, odnosno utjecaja lokalne geotektonike. Za potpunije razumijevanje i analizu lokalnih geotektonskih procesa u područjima mareografa bilo bi korisno provesti usporedbu rezultata nekog novog nivelmana visoke točnosti između mareografskih repera, kao što je primjerice to pokazano u radu Bilajbegović i dr. (1984) za II. nivelman visoke točnosti za epohu 1971,5. Nadalje, “nepostojanje” korelacije u tom razdoblju možemo uočiti i kroz ocjenu točnosti iskazanu standardnim odstupanjem nepoznanica (srednjih razina mora) koje iznose oko 1 cm (Rezo 2010). S obzirom na to da je riječ o mareografskim postajama u zatvorenome moru, minimalna i maksimalna amplituda na analiziranim mareografima varira unutar 2 do 3 cm. Te minimalne i maksimalne iznose uočavamo tek u drugoj polovici analiziranog razdoblja, dok su u prvom dijelu te varijacije unutar 1 cm, što se poklapa s ocjenom točnosti.

U posljednjih dvadesetak epoha (otprilike od epohe 1978,5), trend promjena srednje razine mora ima prepoznatljivu korelaciju s varijacijama Mjesečevih deklinacija, tj. pri maksimalnim Mjesečevim deklinacijama minimalne su srednje razine mora i obrnuto, što je vidljivo na svim slikama promjene smjera i iznosa srednjih razina mora.

## Literatura

- Astronomical Almanac (2010): U.S. Naval Observatory, UK Hydrographic Office, Washington, London, 2008.
- Bašić, T. (2004): Two Computer Programs for Official Datum Transformation and Geoid Interpolation in Croatia, Proceedings of the Symposium of the IAG Section I (Positioning), Commission X (Global and Regional Geodetic Networks), Subcommission for Europe (EUREF), Publication No. 13, Toledo, Spain, June 4–7, 2003, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 33, 378–385, Frankfurt am Main.
- Bašić, T. (2009): Fizikalna geodezija, skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Bilajbegović, A., Feil, L., Klak, S., Sređić, S. (1984): Uspoređivanje nivelmana visinske točnosti koji povezuje mareografe na našoj obali Jadrana i normalni reper u Maglaju, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zbornik radova, Niz D, Sv. 5.
- Calais, E. (2006): Elements of Geodesy – Lectures, Purdue University – Department of Earth and Atmospheric Sciences.
- Čolić, K. (1996): Matematičko-fizikalna geodezija, interna skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Dickey, J. O. (1995): Earth rotation, In *ahrens*, 356–358.
- Feil, L., Rožić, N., Pavičić, S., Gucek, M., Bosiljevac, M. (2004): Izrada dokumentacije neophodne za usvajanje službenog visinskog datuma Republike Hrvatske, Elaborat za Državnu geodetsku upravu Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1–65.
- Heiskanen, W. A., Moritz, H. (1996): Physical Geodesy, reprint, Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz, Graz.
- Hrvatski hidrografski institut (2006): Izvješća o mareografskim mjerenjima na istočnoj obali Jadrana, Split.
- Hrvatski hidrografski institut (2007): Izvješća o mareografskim mjerenjima na istočnoj obali Jadrana, Split.
- Klak, S. (1974): Gravimetrija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Lambeck, K., Antonioli, F., Purcel, A., Silenzi, S. (2004): Sea-level change along the Italian coast for the past 10.000yr, Quaternary Science Reviews Vol. 23, 1567–1598.
- Moritz, H. (1990): Advanced physical geodesy, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.

- Moritz, H., Mueller, I. I. (1987): Earth rotation, Ungar Publ, New York.
- Pugh, D. (2004): Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rezo, M. (2010): Značenje i primjena fizikalnih parametara u modernom pristupu geodetskim radovima državne izmjere, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Roy, A. E. (1988): Orbital Motion, Adam Hilger, Bristol.
- Seidelmann, K. P. (1992): Explanatory supplement to the astronomical almanac, Univ. Science Books, Mill Valley, Cal., U.S.A.
- Torge, W. (2001): Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Vilibić, I., Orlić, M., Čupić, S., Domijan, N., Leder, N., Mihanović, H., Pasarić, M., Pasarić, Z., Srdelić, M., Strinić, G. (2005): A new approach to sea level observations in Croatia, Geofizika, Vol. 22, 21–57.
- URL 1: Edmond Halley,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Edmond\\_Halley](http://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Halley), (5. 7. 2009.).
- URL 2: Daniel Bernoulli,  
[http://bs.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Bernoulli](http://bs.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli), (9. 7. 2009.).
- URL 3: Pierre-Simon Laplace,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre-Simon\\_Laplace](http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre-Simon_Laplace), (16. 7. 2010.).
- URL 4: James Clark Ross,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Clark\\_Ross](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clark_Ross), (22. 8. 2009.).
- URL 5: Lord William Thomson Kelvin,  
<http://scienceworld.wolfram.com/biography/Kelvin.html>, (25. 8. 2009.).
- URL 6: Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL),  
<http://www.pol.ac.uk/psmsl/>, (16. 7. 2009.).
- URL 7: Physical Reference Data,  
<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>, (22. 10. 2009.).
- URL 8: Navy Operational, Ocean Circulation and Tide Models,  
<http://www.oc.nps.edu/nom/day1/partc.html>, (3. 9. 2009.).

# The Changes of Sea Level and Variations of Moon Declinations in Nutation Period at Four Tide Gauges in Croatia

*ABSTRACT.* The paper explains the causes of high and low tide (tides) and describes the forces causing tide waves and nutation period. There are also the geometric positions of the Moon and the Sun described in relation to the Earth that define maximum or minimum tide wave height. A short overview of sea level measurements along the eastern coast of the Adriatic Sea is also presented with the present situation referring to already built permanent and temporary measuring stations. The connection of the changes of Moon declinations with the changes of sea level is explained by means of analysing the computed mean sea levels in the nutation period of 18.61 years for the following tide gauges: Dubrovnik, Split, Bakar and Rovinj. The mean sea levels for 34 epochs (6794 days) have been computed with altogether 230 996 daily values of mean sea levels.

*Keywords:* tides, tide gauge measurements, Moon declination, nutation period, mean sea level.

*Prihvaćeno:* 2010-11-10