
Mirko ORLIĆ, Miroslava PASARIĆ i Marijan HERAK

GIBANJE U MORU
POVEZANO S MAKAR-
SKIM POTRESOM
OD 11. SIJEČNJA 1962.
GODINE

Dobro je poznato da su podmorski potresi, ako su im hipocentri na malim dubinama i ako imaju velike magnitude, često povezani s pojavom valova u moru, tzv. *tsunamija* (Bernard i Robinson, 2009.). Naime, brzi pomaci tektonskih ploča koji dovode do pojave potresa mogu biti praćeni i naglim pomacima morskog dna te – posljedično – i površine mora. Slično kamenu bačenom u more, to rezultira valovima koji se iz epicentralnih područja šire morem na sve strane. Takvi se valovi najčešće pojavljuju u Tihom oceanu, ali ih ima i u drugim oceanima, kao i u okrajnim morima – pa tako i u Sredozemlju i Jadranu. Nedavna studija brojnih povijesnih izvora (Pasarić i sur., 2012.) pokazala je da je u Jadranu od 16. stoljeća do naših dana opaženo dvadesetak tsunamija. Njihove su jačine iznosile od dva do pet stupnjeva na Sieberg-Ambraseysovoj ljestvici koja broji šest stupnjeva.

S druge strane, u nas je gotovo nepoznato da su podmorski potresi u epicentralnom području često praćeni i jednim sasvim drugačijim gibanjem mora, koje se u anglo-američkoj literaturi naziva *seaquake* (Levin i Nosov, 2009.), pa bi mu odgovarajući hrvatski naziv bio *morski udar*. Riječ je o tome da longitudinalni valovi nastali prilikom potresa mogu iz unutrašnjosti Zemlje prijeći u more te pod određenim okolnostima ojačati zbog višestruke refleksije na površini i na dnu mora. Oni koji su imali prilike doživjeti takvo gibanje mora govore da je „more uskuhalo“ te da se činilo „kao da se brod nasukao“. Već spomenutom studijom povijesnih izvora za jadransko područje (Pasarić i sur., 2012.) pronađeno je pet potresa koji su uzrokovali morske udare, a nisu bili praćeni pojavom tsunamija.

Slučaj makarskog potresa od 11. siječnja 1962. godine posebno je zanimljiv stoga što je bio povezan s objema vrstama gibanja u moru. U drugom poglavlju izložit ćemo opažanja i mjerenja koja dokumentiraju i morski udar i tsunami. U trećem poglavlju bit će riječi o hidrodinamič-

kom numeričkom modeliranju kojim je reproduciran tsunami. U posljednjem, četvrtom poglavlju ukazat ćemo na važnost tih empirijskih i teorijskih nalaza za šire jadransko područje.

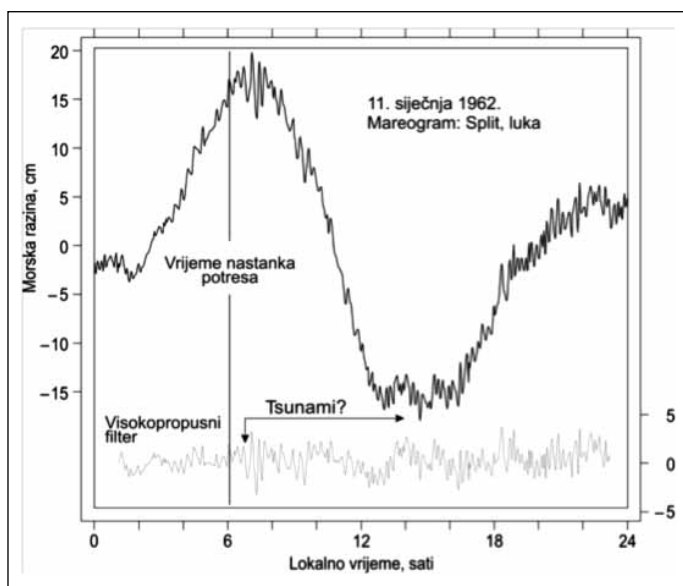
PODACI

Gibanje u moru povezano s velikim makarskim potresom proučavali smo na osnovi dvaju izvora. Prvi su izvor bili članci objavljeni u dnevnim novinama. Pregledan je sav dostupan tisak kako bi se prikupilo što više podataka o pojavama u blizini epicentra. U mnoštvu članaka o katastrofalnom razaranju na kopnu i stradanjima ljudi, tek tri teksta donose kratke informacije o moru (Pasarić i sur., 2012.). Tako se u *Vjesniku* od 12. siječnja 1962. (br. 5348, 1, 5), u članku naslovljenom „Evakuirana Makarska“, mogu naći ovi redci: „*U sedam i 15 sati uplovio je u makarsku luku brod ‘Vladimir Nazor’ s redovne pruge Ploča – Split koji je potres zatekao nešto više od jedne milje od obale u pravcu Igrana. Svi članovi posade izjavili su da su osjetili udarac kao da su se u punoj brzini nasukali na podvodni greben. Sve koji su tog trenutka spavali u kabinama ili u salonu probudila je jačina udara. Pola sata kasnije stigao je u luku parobrod ‘Budva’ iz Ploča koji je dovezao i prve izbjeglice i postradale iz najviše stradalih sela podbiokovskog kraja, iz Igrana i Podgore. Prema izjavi upravitelja stroja Josipa Bergama u trenutku potresa brod je upravo uplovljavao u luku Igrane. Nalazili su se oko 100 metara od pristaništa. Osjetili su jak udar koji je bio dvostruko jači od onog što su ga osjetili na moru u nedjelju. Bio sam u strojarnici – rekao nam je Josip Bergam, i prvo što sam pomislio bilo je da smo svom snagom udarili na hridine i da se brod penje uz obalu.*“

U *Slobodnoj Dalmaciji* od 12. siječnja 1962. (br. 5256, 5) nalazimo članak naslovljen „Potres se osjetio i na moru“: „*Udar potresa osjetio se i na moru, tako su iz postelje izbačeni zapovjednik mlj ‘Gusar’ kap. Juraj Borić, šofer Josip Vela i mornari na pramcu dok je brod bio vezan uz gat u Podgori. Na brodu ‘Takovo’ koji se zatekao u vožnji iz Sumartina prema Splitu 150 putnika je osjetilo jak udar i more se uznemirilo. Isto tako putnici koji su se našli jučer ujutro na brodu ‘Vuk Karadžić’ kad je brod bio u Splitskim vratima osjetili su udar potresa.*“

Naposljedku, u *Slobodnoj Dalmaciji* od 14. siječnja 1962. (br. 5258, 6) nalazimo i bilješku pod naslovom „I more se treslo kao voda u loncu“: „*Pomorci s ‘Takova’ koji se za jučerašnjeg ranijutarnjeg potresa našao u luci Sumartin*

**Gibanje u moru povezano
s makarskim potresom od
11. siječnja 1962. godine**



Slika 1.

Zapis s Mareografske postaje u Splitu na dan 11. siječnja 1962. godine (gornja krivulja). Isti zapis nakon primjene visokopropusnog filtra, koji prigušuje oscilacije kojih je period veći od 3 sata (donja krivulja).

Na slici je naznačeno vrijeme nastanka potresa kao i vjerojatni nastup tsunamija (prema Herak i sur., 2001.).

na Braču kažu da se i na moru osjeća potres – oni to zovu ‘maremoto’... ‘More se trese kao i voda u loncu’, kažu“.

Svi ovi opisi jasno ukazuju na pojavu morskog udara, a kako se vidi iz posljednjeg teksta, neki su naši pomorci pojavu nazvali *maremoto*. Valja napomenuti da taj termin nije pogodan kao sinonim za morski udar, budući da se u nekim romanskim jezicima pod nazivom *maremoto* podrazumijeva tsunami. Zanimljivo je da se u citiranim tekstovima spominju zapravo tri slučaja morskog udara: udar povezan s glavnim potresom od 11. siječnja 1962. (prvi i drugi tekst), zatim morski udar koji je koincidirao s prethodnim potresom u nedjelju 7. siječnja 1962. (prvi tekst) te naposljetku morski udar izazvan naknadnim potresom u subotu 13. siječnja 1962. (treći tekst). Kako izgleda, gibanje mora se u barem dva od ta tri slučaja osjetilo u širem epicentralnom području. Pojava morskog udara nije za sada teorijski istražena ni u kojem od triju slučajeva, pa se stoga ništa ne može reći o razlozima njezine učestalosti u siječnju 1962. godine.

Drugi izvor podataka o gibanju u moru povezanom s velikim makarskim potresom jest zapis morske razine s Mareografske postaje u Splitu (gornja krivulja na slici 1). Na vremenskom nizu dominira oscilacija čiji je period, tj. vrijeme između dvaju uzastopnih maksimuma, 12 sati, a raspon, tj. vertikalna udaljenost između maksimuma i minimuma, oko 35 cm. To je plimna oscilacija. Na nju su superponirane kratkoperiodične oscilacije, koje su se pojačale oko 40 minuta nakon potresa te su potrajale više sati (Herak i sur., 2001.). Pojavu je bilo moguće de-

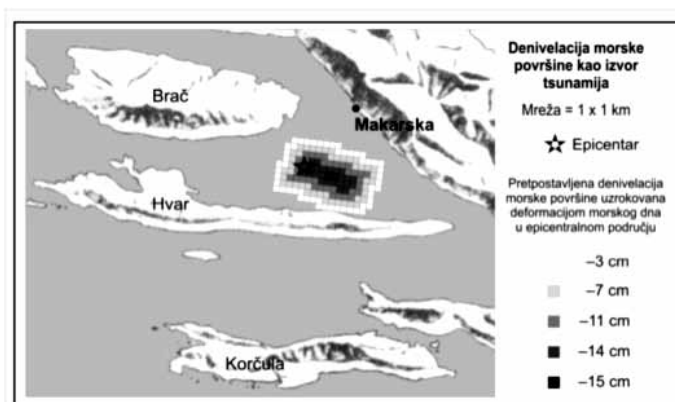
taljnije istražiti nakon što je plimna oscilacija uklonjena primjenom visokopropusnog filtra (donja krivulja na slici 1). Lijepo se vidi da je period kratkoperiodičnih oscilacija u početku bio otprilike 20 minuta te da je njihov najveći raspon iznosio oko 7 cm. Premda su te oscilacije bile relativno slabo izražene, one su se pojačale nakon potresa, što sugerira da je u pitanju bio mali tsunami. Da bi se detaljnije istražilo podrijetlo tih oscilacija, primijenjen je na srednjodalmatinsko područje jedan hidrodinamički numerički model.

MODEL

Prilikom modeliranja tsunamija najprije treba odrediti kakav je bio početni pomak morskoga dna, pa time i morske površine. Odgovor na to pitanje dala su detaljna seizmološka istraživanja tijekom kojih je precizno locirano 46 potresa koji su se u širem epicentralnom području dogodili u razdoblju od 7. siječnja do 6. svibnja 1962. (Herak i sur., 1996.; Herak i sur., 2001.). Pokazalo se da su svi veći potresi, pa tako i glavni od 11. siječnja, imali žarište ispod mora, u Hvarskom kanalu. Time je ispunjen osnovni uvjet za generiranje tsunamija. Kako bi se mogli izračunati detalji rasprostiranja tsunamija iz epicentralnog područja, valja pretpostaviti mehanizam njegova generiranja, tj. iznos i oblik deformacije morskog dna u trenutku potresa. Nasreću, potres su kvalitetno zabilježile brojne seizmološke postaje diljem Europe i svijeta, što nam je omogućilo da analizom njihovih podataka zaključimo o svojstvima rasjeda na kojem se potres dogodio (Herak i sur., 1995.). Pokazalo se kako opažene podatke dobro objašnjava pretpostavka da se radi o rasjedu pružanja ZSZ–ISI, čija ploha strmo pada prema obali. U trenutku potresa dva su se rasjedna krila pomaknula jedno prema drugome uglavnom vodoravno, s tek malom vertikalnom komponentom, koja je ipak bila dovoljna da uzrokuje zamjetnu vertikalnu deformaciju morskog dna. Preostalo je još odrediti dimenzije deformacije dna, što je napravljeno na temelju poznavanja magnitude potresa te dimenzija područja u kojemu su se događali naknadni potresi (Wells i Coppersmith, 1994.). Tako je procijenjeno da se morsko dno u trenutku potresa u epicentru naglo uleknulo oko 15 cm te da je dimenzija zahvaćenog područja u horizontalnim smjerovima reda 10–15 km. Ta se deformacija gotovo trenutačno prenijela i na površinu, čime je definiran početni poremećaj morske površine prikazan slikom 2.

Kad raspoložemo početnim uvjetima, postavlja se pitanje kako se giba tsunami iz izvorišnog područja i kako

**Gibanje u moru povezano
s makarskim potresom od
11. siječnja 1962. godine**



Slika 2.

Spuštanje morske površine koje je uzeto u obzir kao početni uvjet prilikom hidrodinamičkog numeričkog modeliranja tsunamija (prema Herak i sur., 2001.).

se modificira u obalnom području. Valja reći da u bazenima kao što je jadranski, ti procesi ne slijede jednostavna pravila. Zbog promjenjive topografije dna i razvedenosti obale, val je podvrgnut lomu, refleksiji i raspršenju. No postoji način da se i u tako kompleksnim uvjetima dođe do informacije o ponašanju tsunamija, a osnova mu je hidrodinamički numerički model.

Takav se model temelji na numeričkom rješavanju diferencijalnih jednadžba gibanja i kontinuiteta. Osnovna ideja numeričkog rješavanja jest da se promatrani bazen prikaže mrežom točaka te da se i vremenski tijek zbivanja promatra u točkama konačne udaljenosti. Diferencijalne jednadžbe u tim se točkama zamijene približnim jednadžbama, tj. skupinom algebarskih jednadžba koje se uzastopno rješavaju velik broj puta. Kao rezultat dobivamo vrijednosti zavisnih varijabla (u našem slučaju denivelaciju morske površine i dvije komponente strujanja u moru) za niz točaka u prostoru i vremenu. Cijeli se račun zbog svoje opsežnosti može izvesti samo uz upotrebu elektroničkog računala.

Ovakav pristup omogućuje nam da u numerički definiranom bazenu, koji približno predstavlja realni bazen, uspostavimo početni poremećaj morske razine te da potom odredimo gibanje vala i njegovu transformaciju u obalnom području, uzimajući u obzir uvjete na granicama bazena – kako zatvorenima tako i otvorenima. Dakle, raspoložemo matematičkim – numeričkim – modelom, koji omogućuje da se teorijski istraži razvoj procesa u moru. Ako su rezultati takvog modela u suglasju s opažanjima i mjerenjima, može se štošta zaključiti o prirodnom procesu, a može se istražiti i kako bi se proces razvijao pod drugačijim okolnostima – primjerice, kako bi izgledao tsunami uz drugačiji početni poremećaj morske površine.

Hidrodinamički numerički model koji reproducira pojavu tsunamija u Jadranskom moru izvorno je razvijen

Mirko ORLIĆ
Miroslava PASARIĆ
Marijan HERAK

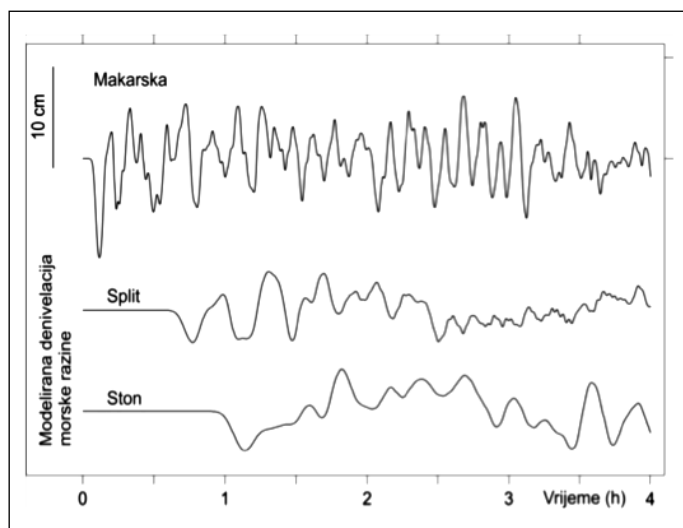
**Gibanje u moru povezano
s makarskim potresom od
11. siječnja 1962. godine**

radi istraživanja vala koji je u moru bio uzrokovan crnogorskim potresom od 15. travnja 1979. godine (Orlić, 1984.). Budući da se model pokazao dobrim, primijenjen je kasnije i na slučaj makarskog potresa od 11. siječnja 1962. godine (Herak i sur., 2001.). Pogledajmo neke rezultate tog modeliranja za ranije opisani početni poremećaj morske razine u prostoru između Brača, Hvara i dalmatinske obale.

Slika 3 prikazuje denivelacije morske razine modelirane za tri luke: Makarsku, Split i Ston. U Makarskoj, koja je najbliže epicentru, prevladavaju periodi od oko 10 minuta, dok u Splitu i Stonu, koji su na većim udaljenostima, dominiraju periodi veći od 20 minuta. Takva se razlika perioda ne može objasniti ogibom valova pri prolasku kroz Brački, Hvarski i Neretvanski kanal, budući da bi ogib pogodio prolasku kratkih valova (Mei, 1989.). Također, razlika se ne može pripisati numeričkoj disperziji, budući da se za upotrijebljeni model može procijeniti da brzina simuliranih valova odstupa od brzine stvarnih valova manje

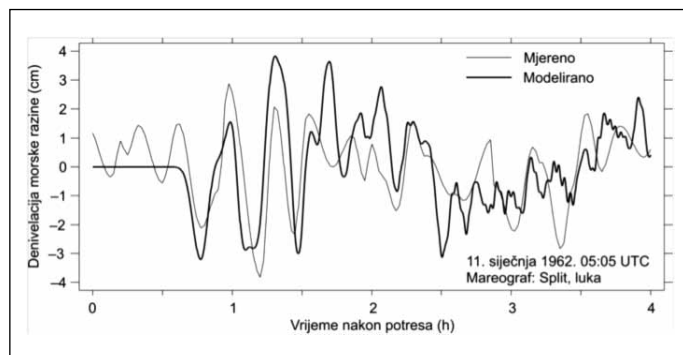
Slika 3.

Vremenski nizovi morske razine dobiveni hidrodinamičkim numeričkim modelom za tri luke – Makarsku, Split i Ston (prema Herak i sur., 2001.).



Slika 4.

Usporedni prikaz izmjerenog (tanka crta) i modeliranog (debele crta) vremenskog niza morske razine za splitsku postaju (prema Herak i sur., 2001.).



od 1%, čak i za 10-minutne valove (Marčuk i sur., 1983.). Stoga smo skloni ograničenju kratkih valova na epicentralno područje pripisati raspršenju do kojeg dolazi zbog nepravilnosti obale. To, dakako, implicira da kvaliteta naših numeričkih simulacija silno ovisi o razlučivanju modela.

Kad jednom raspolažemo rezultatima modela, zanimljivo je razmotriti jesu li izračunane vrijednosti u skladu s podacima. Jedan se ohrabrujući rezultat može uočiti usporedi li se slika 3 sa slikom 1: model pokazuje da je tsunamiju trebalo oko 40 minuta da iz epicentralnog područja dospije do Splita, upravo kako je opaženo na Mareografskoj postaji u Splitu. To implicira brzinu tsunamija od oko 80 km/h, a to je upravo brzina koja se dobije uzme li se u obzir teorijski izraz za brzinu vala u moru $(gh)^{1/2}$ (gdje je g ubrzanje sile teže, a h dubina mora) te prosječna dubina hrvatskog obalnog mora, koja u tom području iznosi oko 50 m.

Usporedba mjerenih i modeliranih denivelacija morske razine za Split još je dojmljivija prikažu li se oba vremenska niza na istoj slici (slika 4). Unatoč šumu koji je očigledan u mjerenjima, lijepo se vidi povećavanje oscilacija točno u vrijeme predviđeno modelom, kao i sličnost ne samo kraćih oscilacija (perioda oko 20 minuta), koje su prevladavale odmah nakon nastupa tsunamija, nego i dužih oscilacija (perioda oko 90 minuta), koje su se očitovale kasnije. To govori u prilog tezi da je poremećaj registriran na Mareografskoj postaji u Splitu ujutro 11. siječnja 1962. bio povezan s makarskim potresom koji mu je prethodio te da naš model uglavnom dobro reproducira razvoj tsunamija u srednjodalmatinskom obalnom području. Treba reći da se opažaju i neke razlike između mjerenih i modeliranih vrijednosti, napose u vrlo kratkim oscilacijama koje se kasnije javljaju u modeliranom vremenskom nizu, ali ne i u izmjenenom vremenskom nizu. Ta bi odstupanja mogla ukazivati na nesavršenost modela, primjerice na podcjenjivanje obalnog raspršenja kratkih valova poradi relativno grubog razlučivanja te na smjer kojim bi trebalo dorađivati model. Kao i obično kad je u pitanju modeliranje, najbolji se rezultati postižu ne jednim već nizom modela koji sve bolje opisuju prirodni proces.

ZAKLJUČAK

Istraživanje gibanja u moru povezanog s makarskim potresom od 11. siječnja 1962. godine dovelo je do nekoliko zanimljivih nalaza. Ponajprije, pokazalo se da je taj potres bio praćen pojavom morskog udara te da je ista pojava opažena i za jednog prethodnog potresa (od 7. si-

ječnja 1962.) te za jednog naknadnog potresa (od 13. siječnja 1962.). Pojava morskog udara za sada u Jadranu nije detaljnije istražena. Zna se da je opažena u još barem pet navrata (Pasarić i sur., 2012.), ali nije bilo nikakvih teorijskih istraživanja koja bi objasnila uvjete koji joj pogoduju, pa tako ni razloge zbog kojih je učestala upravo u vrijeme velikog makarskog potresa. Dakle, taj potres ukazuje na područje budućeg rada koje bi se moglo pokazati relevantnim za šire jadransko područje.

Zanimljivi su i nalazi povezani s pojavom tsunamija. Kako smo vidjeli, tsunami vezan uz veliki makarski potres bio je slab – u najnovijem katalogu jadranskih tsunamija pripisana mu je jačina od dva stupnja na Sieberg-Ambra-seysovoj ljestvici (Pasarić i sur., 2012.). Međutim, istraživanje i tako malog tsunamija dovelo je do dvaju važnih rezultata. Prije svega, pokazalo se kako je za uspješno modeliranje tsunamija potrebno pretpostaviti da je prilikom potresa došlo do spuštanja podine reverznog rasjeda, pa je tako istraživanje tsunamija pridonijelo boljem razumijevanju mehanizma nastanka makarskog potresa. Osim toga, istaknut je utjecaj obale na raspršenje tsunamija. Može se pretpostaviti da je taj utjecaj važan za sve jadranske tsunamije, dakle ne samo za one koji – kao ovaj makarski – nastaju unutar jadranskog arhipelaga nego i za one koji se formiraju na otvorenom Jadranu i nakon toga prodiru među otoke. Činjenica da je takav proces na djelu, implicira da se pri modeliranju tsunamija u Jadranskom moru posebna pozornost mora posvetiti reprezentaciji obalne linije.

Zahvala

Ovo je istraživanje potpomognuto sredstvima koja je osiguralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta (projekti 119-1193086-3085 i 119-1193086-1315).

LITERATURA

- Bernard, E. N. i Robinson, A. R. (2009.), *Tsunamis (The Sea, Volume 15)*, Cambridge, Harvard University Press.
- Herak, M., Herak, D. i Markušić, S. (1995.), Fault-plane solutions for earthquakes (1956–1995) in Croatia and neighboring regions, *Geofizika*, 12: 43-56.
- Herak, M., Herak, D. i Markušić, S. (1996.), Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992., *Terra Nova*, 8 (1): 86-94.

- Herak, M., Orlić, M. i Kunovec-Varga, M. (2001.), Did the Makarska earthquake of 1962 generate a tsunami in the central Adriatic archipelago?, *Journal of Geodynamics*, 31 (1): 71-86.
- Levin, B. i Nosov, M. (2009.), *Physics of Tsunamis*, Dordrecht, Springer.
- Marčuk, A. G., Čubarov, L. B. i Šokin, J. I. (1983.), Čislennoe modelirovanie voln cunami, Novosibirsk, Nauka.
- Mei, C. C. (1989.), *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, Singapore, World Scientific.
- Orlić, M. (1984.), Ima li "tsunamija" u Jadranskom moru?, *Priroda*, 72: 310-311.
- Pasarić, M., Brizuela, B., Graziani, L., Maramai, A. i Orlić, M. (2012.), Historical tsunamis in the Adriatic Sea, *Natural Hazards*, 61 (2): 281-316.
- Wells, D. i Coppersmith, K. J. (1994.), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4): 974-1002.

Mirko ORLIĆ
Miroslava PASARIĆ
Marijan HERAK

**Gibanje u moru povezano
s makarskim potresom od
11. siječnja 1962. godine**