

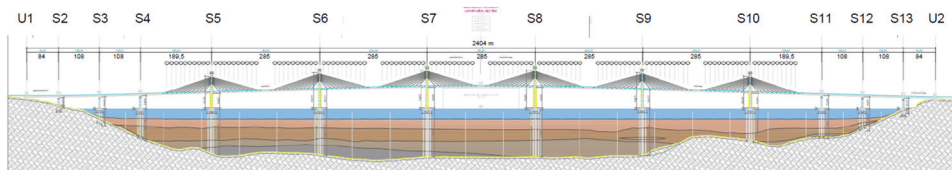
PROBNO ISPITIVANJE PELJEŠKOGA MOSTA

Pelješki most (slika 1) smješten je na južnom kraju Hrvatske te povezuje kopno s poluotokom Pelješac preko Malostonskog zaljeva u Jadranskom moru. Most je važna pristupna točka Dubrovačko-neretvanskoj županiji. Polazna točka projekta je K1 + 300, a zadnja je K5 + 240, ukupne duljine 3,94 km, uključujući Pelješki most i pristupne ceste na oba kraja. Od njih, Pelješki most dugačak je 2404 metara; kontinentalna pristupna cesta duga je 820 metara, a pristupna cesta na poluotoku duga je 680 metara.



Slika 1. Pelješki most.

Most povezuje kopno s poluotokom Pelješcem i nalazi se pokraj mjesta Komarna na kopnenoj strani. Ukupna duljina mosta je 2404 m, s rasponskim dijelovima od 84 m + 2 x 108 m + 189,5 m + 5 x 285 m + 189,5 m + 2 x 108 m + 84 m s 12 stupišta (slika 2). Upornjaci i stupišta U1, S2 te U14 i S13 smješteni su na suprotnim obalama dok je ostalih 10 stupišta i pilona (od S3 do S12) smješteno u moru. Most kopno – Pelješac je ekstrados most s kosim zategama tzv. više rasponskog zavješengog tipa s ortotropnom čeličnom pločom.



Slika 2. Uzdužni presjek mosta.

Početak rasponske konstrukcije do stupova S5-S10 (s obje strane mosta) je 12,2 m betonska greda (slika 2), dok se ostatak rasponske konstrukcije izvodi kao čelični sandučasti nosač s ortotropnom pločom, tri komore u jednom sanduku (slika 2). Širina vrha čeličnog

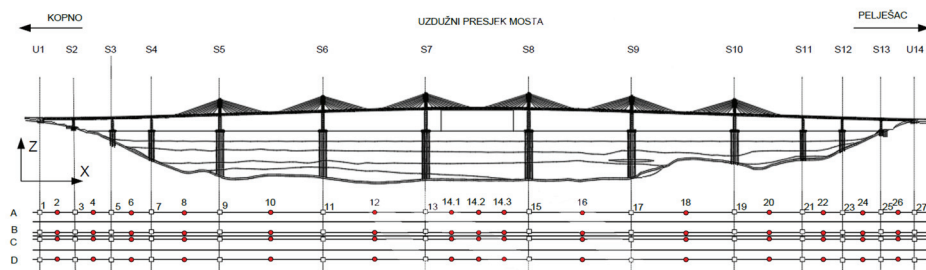
sandučastog nosača iznosi 22,5 m, širina dna 8,1 m, a visina 4,5 m. Svaki pylon ima 10 parova kosih zatega. Centralno postavljene vertikalni piloni su betonski, visine 40 m i punog presjeka. Dimenzije pilona na vrhu iznose 2,20 x 5,0 m, odnosno na nivou rasonske konstrukcije 2,20 x 7,00 m. Stupovi S2-S4 i S11-S13 s ležajevima nalaze se na pristupnom djelu mosta. Stup S2 nalazi se na kopnu, stup S13 na granici između kopna i mora, a svi ostali stupovi locirani su u moru. Razmjerno niski stupovi S2-S4 i S11-S13, koji su visine 19,40–31,99 m, su sandučastog poprečnog presjeka, konstantnih vanjskih izmjera u uzdužnom pravcu, a u poprečnom pravcu se šire od dna prema vrhu. Stupovi su četverokutnog oblika sa zaobljenim rubovima i izmjerama od 4,25 m uzduž mosta i promjenljivom širinom 8–10 m poprečno na most. Debljina stjenki poprečnog presjeka je konstantna i iznosi 0,60 m u uzdužnom i poprečnom pravcu.

Temelj stupova S5-S10 čine naglavnice pilota pravokutnog oblika tlocrtnih dimenzija 29 m x 23 m promjenjive visine od 4 m do 5 m. Naglavnice pilota S3-S4 i S11-S12 kvadratnog su oblika dimenzija 17 m x 17 m, promjenjive debljine od 3,5 m do 4,5 m. Naglavnice su upete u čelične pilote promjera od 1800 i 2000 mm. Duljina pilota kreće se od 36 do 124 m. Piloti na S3, S4, S10, S11 i S12 ulaze u čvrstu stijenu i ispunjeni su i spregnuti s armiranim betonom. Stupišta S5-S9 temelje se na čeličnim pilotima koji ulaze u čvrstu stijenu i koji su ispunjeni armiranim betonom 40 m od vrha. Most ima ukupno 148 čeličnih pilota, a debljina njihove stjenke iznosi 40 mm. Stope pilota na svom su dnu, u visini od 2 m, debljine stjenke od 60 mm. Najduži pilot ima 130,6 metara.

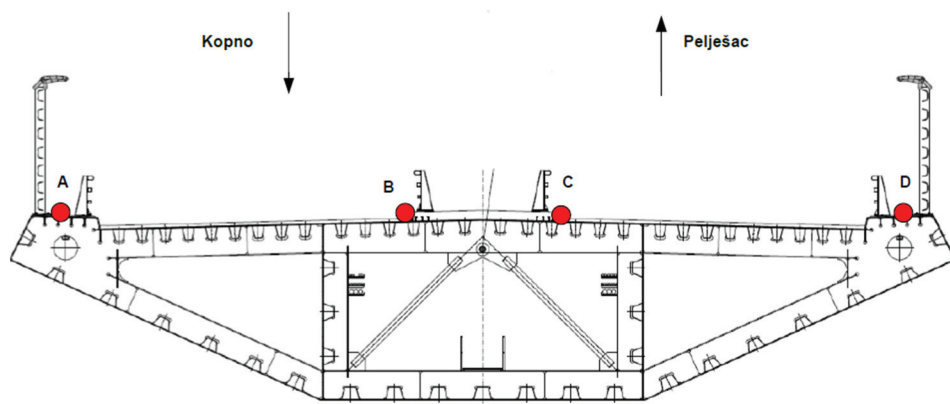
Kako se bližio završetak svih radova na mostu, za potrebe dobivanje uporabne dozvole, a prije tehničkoga pregleda mosta bilo je potrebno provesti probno opterećenje mosta. U skladu s važećom regulativom HRN U.M1.046:1984 (Ispitivanje mostova probnim opterećenjima) provedeno je probno ispitivanje Pelješčkoga mosta statičkim i dinamičkim opterećenjem. Učinak probnog opterećenja mora odgovarati približno učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu objekta. Probim opterećenjem se provjerava ponašanje objekta pri statičkom i dinamičkom prometnom opterećenju zbog utvrđivanja i potvrđivanja:

- usklađenosti s projektom,
- usklađenosti kvalitete radova sa zahtjevom u projektu,
- podobnosti preuzimanja projektiranog opterećenja.

Programom ispitivanja je definirana metodologija ispitivanja s opisom opterećenja i mjernih mjesta na objektu.



Slika 3. Skica mjernih mjesta za mjerenje pomaka u uzdužnom presjeku za rasonske konstrukcije.



Slika 4. Skica mjernih mjesta u poprečnom presjeku za četiri linije mjerenja.

Statičko probno ispitivanje Pelješakoga mosta proveli su članovi Katedre za inženjersku geodeziju Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, na temelju ugovora između partnera i u suradnji s njima, Sveučilišta u Zagrebu Građevinski fakultet i Pipenbaher inženirji d.o.o. iz Slovenije.

Geodetski radovi na Pelješkom mostu obuhvaćali su određivanje vertikalnih pomaka na značajnim mjestima rasponskih konstrukcija u mjernim točkama na kojima su bili ugrađeni reperi (slike 3 i 4), pri različitim shemama opterećenja rasponskih konstrukcija. Uz vertikalne pomake na značajnim mjestima rasponskih konstrukcija određivani su i vertikalni pomaci vrhova pilona te nagib pilona na stupištu S7. Vertikalni pomaci pri statičkom opterećenju određivani su kombinacijom modificirane metode geometrijskog nivelmana, trigonometrijskog nivelmana, GNSS statičkom metodom te GNSS RTK metodom u kombinaciji s inercijalnim mjernim sustavom.

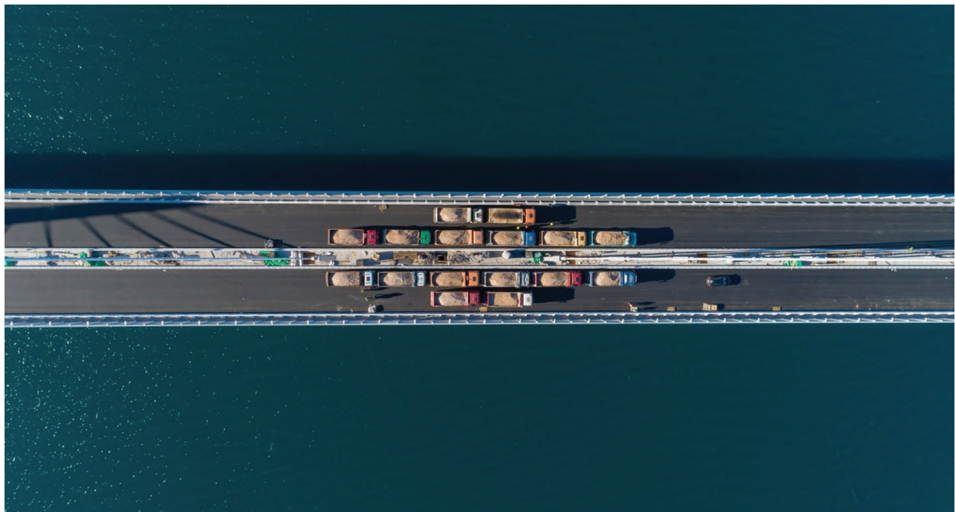
U pripremnim radovima na karakterističnim mjestima konstrukcije mosta obilježena su, duž četiri linije (A, B, C i D), mjerna mjesta (poprečni profili 1-27) na kojima su određivani vertikalni pomaci (slika 3 – uzdužna dispozicija mosta s prikazom ugrađenih repera i slika 4 – poprečna dispozicija mosta s prikazom mjernih linija). Na mjerna mjesta postavljala se nivelmanska letva i očitavala se visinska razlika razmatrane točke od ravnine horizonta vizure za potrebe izmjere modificiranom metodom geometrijskog nivelmana primjenom nivelira. Modificiranom metodom geometrijskog nivelmana određivani su vertikalni pomaci konstrukcije mosta u rasponima R1, R2, R12 i R13.

Vertikalni pomaci u rasponima R3 i R11 su određivani kombinacijom modificirane metode geometrijskog i trigonometrijskog nivelmana. Trigonometrijski nivelman je proveden primjenom robotizirane mjerne stanice te je prilikom određivanja vertikalnih pomaka služio za potrebe određivanja korekcije stajališta nivelira koji su se nalazili u rasponskom polju koje je bilo predmet ispitivanja u tome trenutku.

Za potrebe ispitivanja raspona R4-R10 primijenjena je GNSS RTK metoda u kombinaciji s inercijalnim mjernim sustavom. Sve točke su mjerene s minimalno 15 (sredine raspona) do maksimalno 60 ponavljanja (stupišta) s frekvencijom mjerenja od 1 Hz u svrhu dobivanja preciznih i pouzdanih podataka mjerenja. Za potrebe određivanja položaja točaka s GNSS RTK metodom izmjere, korištena je postavljena GNSS bazna stanica te se time ostvarila i osigurala visoka točnost pozicioniranja GNSS rovera. Bazna stanica je postavljena na jednu od dvije točke geodetske osnove uspostavljene za potrebe gradnje mosta, jedna na kopnu (oTM05), a druga na poluotoku Pelješac (oTM07-1) (slika 5).



Slika 5. Geodetska osnova za potrebe gradnje mosta (lijevo), referentni uređaj postavljen na oTM05 (sredina) i referentni uređaj postavljen na TM07-1.



Slika 6. Ispitivanje središnjeg raspona R7, 16 kamiona ukupne mase 640 t.

Slike 6 i 7 prikazuju ispitivanje središnjeg raspona duljine 285 m za vrijeme statičkog probnog ispitivanja s 16 kamiona ukupne mase 640 t, gdje je maksimalni očekivani pomak iznosio 42,8 cm, a izmjereni je bio 38,2 cm, što potvrđuje projektiranu nosivost mosta.



Slika 7. Ispitivanje središnjeg raspona R7, 16 kamiona ukupne mase 640 t.

Za određivanje vertikalnih pomaka upotrebljavani su precizni digitalni niveliri Leica DNA03 s pripadajućim priborom (stativ, nivelmanska letva, nivelmanske papuče, podupirači za nivelmanske letve), robotska totalna stanica Leica TPS1201 za potrebe određivanja vertikalnih pomaka i nagiba-inklinacija pilona na stupištu S7 s pripadajućim priborom (stativ, štap za prizmu, prizma, mjerne reflektirajuće mjerne markice i pribori za prisilno centriranje) te inercijalni mjerni sustav Trimble R12i za potrebe određivanja vertikalnih pomaka primjenom GNSS RTK metode izmjere u kojoj je taj instrument korišten kao pokretni-rover instrument s kojim su se određivale visine ugrađenih repa. Uz navedene instrumente i pribor korišteni su za potrebe GNSS RTK metode izmjere i dva instrumenta Trimble R10 i Trimble NetR5 koji su se koristili kao referentni-bazni uređaji za potrebe GNSS RTK metode izmjere smješteni na kopnu ili poluotoku Pelješac na točkama uspostavljene geodetske osnove za potrebe izgradnje mosta, a kako bi se izbjeglo spajanje pokretnog-rover instrumenta na sustav permanentnih stanica CROPOS, a sve u svrhu povećanja točnosti ostvarenih rezultata.

Vertikalni pomaci vrhova stupova S5-S10 određeni su na temelju podataka GNSS statičke metode izmjere. Podaci su prikupljeni frekvencijom od 1 Hz pomoću Trimble R10 antena koje su fiksno postavljene na svim vrhovima pilona za potrebe monitoring sustava mosta Pelješac. Prikupljeni podaci su potom obrađeni tako da se odnose na pojedine faze opterećenja mosta, s ciljem računanja vektora između poznatih točaka oTM05 i oTM07-1 i nepoznatih točaka pilona S5-S10 za svaku fazu probnog opterećenja mosta. Za potrebe što točnijeg određivanja koordinate nepoznatih točaka korištene su precizne efemeride. Nakon što su određene sve koordinate vrhova pilona, iz razlike njihovih visina prije, za vrijeme i nakon opterećenja raspona dobio se vertikalni pomak vrha pilona.

Iz razlike očitavanja neopterećenog i opterećenog mosta dobivaju se vrijednosti vertikalnih pomaka uslijed opterećenja, a iz razlike prije i poslije opterećenja, vrijednosti zaostalih pomaka. Kao opterećenje korišteno je od dva do dvadeset kamiona s poznatim osovinskim i ukupnim opterećenjima, svaki ukupne mase 40 t.

Probno ispitivanje su u periodu od 12. do 18. siječnja 2022. proveli izv. prof. dr. sc. Ante Marendić, dipl. ing. geod., izv. prof. dr. sc. Rinaldo Paar, dipl. ing. geod., Ivan Jakopec, mag. ing. geod. et. geoinf., i Petra Krnjak, mag. ing. geod. et. geoinf., i student Petar Jelić svi s Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Katedre za inženjersku geodeziju (slike 8 i 9).



Slika 8. Članovi Katedre za inženjersku geodeziju.



Slika 9. Članovi Katedre za inženjersku geodeziju.

Treba naglasiti da uvjeti za mjerenja nisu bili povoljni po pitanju atmosferskih uvjeta (kiša, vjetar, na momente udari vjetra), po pitanju uvjeta rada na samome mostu (na mostu su se i dalje odvijali završni radovi gradnje – postavljanje ograda, radovi na upornjacima, promet na mostu) te da se radilo i po noći (slike 10 i 11).



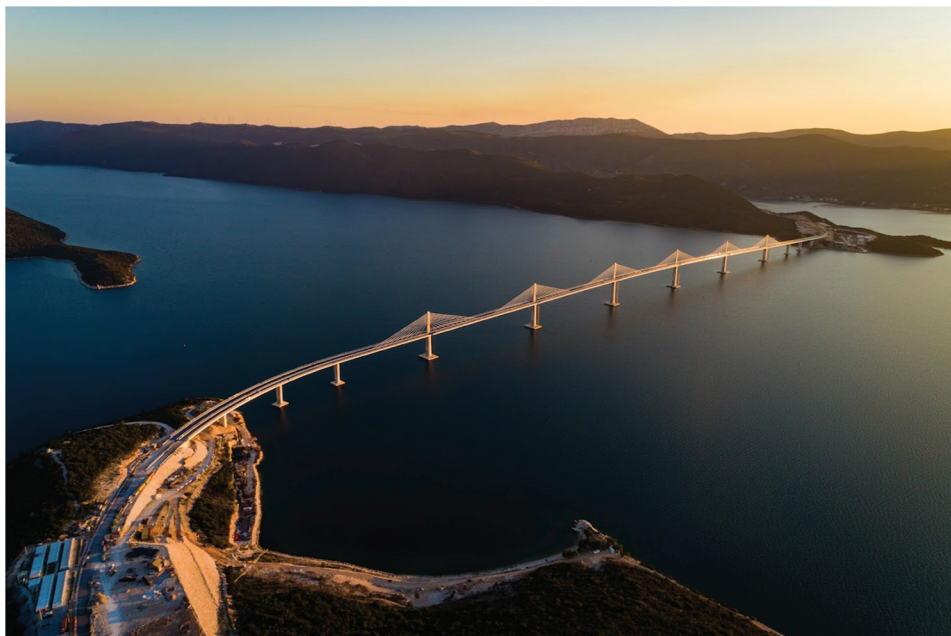
Slika 10. Učvršćivanje stativa nivelira zbog zaštite od udara vjetra.



Slika 11. Izmjera u noćnim satima.

Kako je neposredno nakon probnog ispitivanja proveden i tehnički pregled mosta nakon kojega je most dobio uporabnu dozvolu, može se zaključiti da su sve pretpostavke iz važeće regulative, norme HRN U.M1.046:1984, potvrđene. Most je usklađen s projektom, kvaliteta izvedenih radova je u skladu sa zahtjevima iz projekta te je most u stanju preuzimati na sebe projektirano opterećenje.

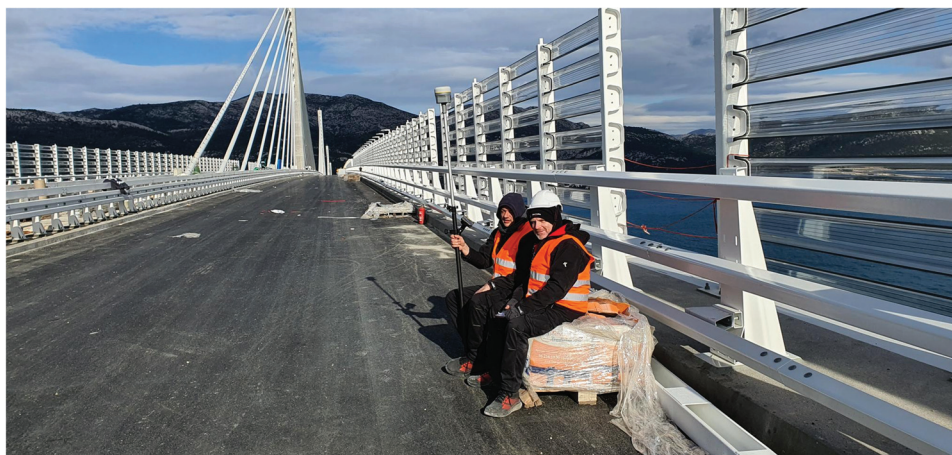
U nastavku prikazujemo još nekoliko fotografija za vrijeme probnog ispitivanja mosta.



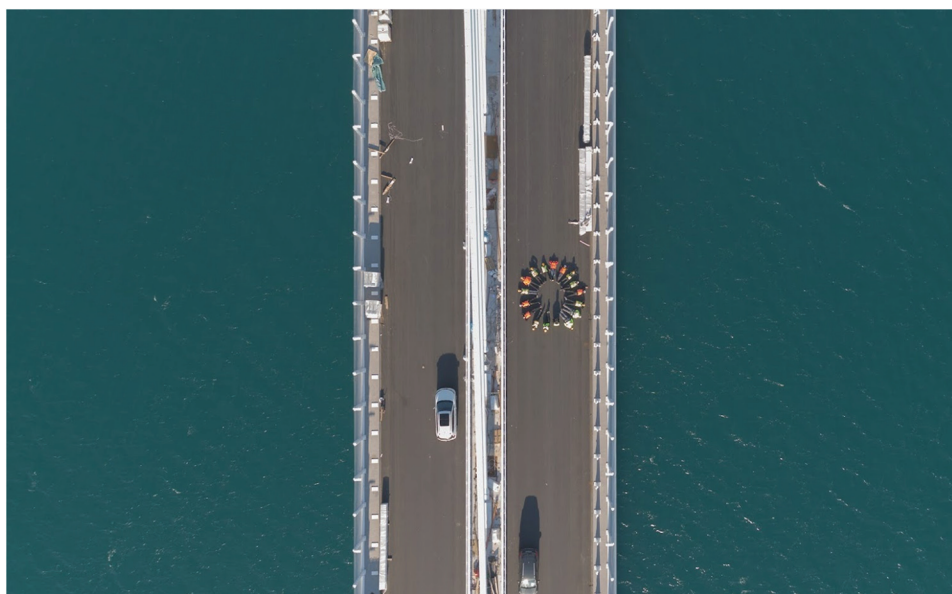
Slika 12. *Panorama mosta.*



Slika 13. *Panorama mosta.*



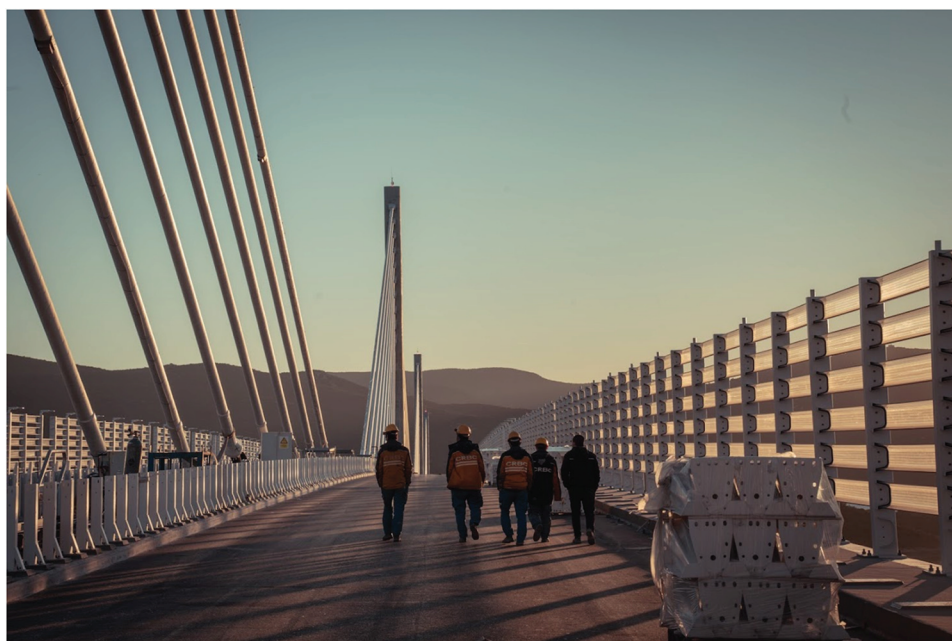
Slika 14. Kolege Marendić i Paar – zasluženi odmor.



Slika 15. Milenijska fotografija svih suradnika na probnom ispitivanju.



Slika 16. Zadnja faza ispitivanja.



Slika 17. Odlazak s mosta.

*Tekst: Rinaldo Paar i Ante Marendić
Foto: Rinaldo Paar i Marin Bodulušić*