



PROJEKTIRANJE I ANALIZA MOSTA PELJEŠAC

*Stručni rad/Professional paper
Primljen/Received: 15. 10. 2018.
Prihvaćen/Accepted: 14. 11. 2018.*

Marjan PIPENABHER

Ponting – Pipenbaher Consllting Engineers, Direktor i vodeći projektant

Sažetak: Pelješki most, duljine 2404 m, svrstava se, ne samo po kompleksnosti gradnje nego i po složenosti projekta, među najzahtjevnije mostove na svijetu. Nalazi se u području iznimno visoke seizmičke aktivnosti, s projektnim ubrzanjem tla na razini čvrste stijene $PGA=0,34$ g i zahtijevanim proračunskim ubrzanjem 0,54 g. Kompaktna stijena nalazi se na dubini do 80 m ispod morskog dna, što rezultira iznimno zahtjevnim temeljenjem na pilotima duljine do 124 m. Na lokaciji mosta pušu jaki vjetrovi, s referentnom brzinom koja prelazi 34 m/s. Posebna je pozornost posvećena osiguravanju stabilnosti mosta u slučaju udara vjetrova na mah i potrebi da je most otvoren u svim vremenskim uvjetima. Ispunjavanje ključnih kriterija kvalitetnog konstruiranja, kao što su stabilnost, trajnost, ekonomičnost i mirno uključanje u krajolik, rezultiralo je inventivnom koncepcijom ekstradosa mosta i integralnom hibridnom strukturom, s pet središnjih raspona duljine po 285m. Tako koncipirana konstrukcija osigurava potrebnu seizmičku stabilnost mosta bez ugradbe velikih ležajeva i dodatnih seizmičkih prigušivača, što potvrđuju i brojne složene nelinearne proračunske analize, koje su detaljno predstavljene u izlaganju. U svim nelinearnim analizama uzima se u obzir interakcija temeljnog tla i konstrukcije mosta. Most Pelješac će se nakon izgradnje svrstati među 5 najvećih i najatraktivnijih mostova u Europi, izgrađenih u početku 21. stoljeća.

Ključne riječi: ekstrados most, kose zatege, duboko temeljenje, piloti, potres, vjetar, monitoring

DESIGN AND ANALYSIS OF PELJEŠAC BRIDGE

Abstract: The 2,404 m long bridge Pelješac ranks among the most demanding bridges in the world, not only in terms of complexity of construction, but also in terms of complexity of design. It is located in the area of high seismic activity, with the peak design acceleration of soil at the bedrock level $PGA=0.34g$, and the required design acceleration of 0.54 g. The compact bedrock is located at a depth of up to 80 m below the sea bed, which requires extremely deep foundations on driven steel piles, up to 124 m long. The bridge is located in the area of strong and gusty winds with the reference wind speed exceeding 34 m/s. Particular attention was paid to ensuring that the bridge remains stable under strong wind gusts and open for traffic in all weather conditions. In order to meet the main criteria of quality design, such as stability, durability, economy and integration into the environment, the inventive design proposed the construction of an extradosed bridge with an integrated hybrid structure comprising 5 central spans, each 285 m long, and 6 low pylons. Thus, the designed structure ensures the necessary seismic stability of the bridge without installation of large bearings and additional seismic dampers, which is confirmed by numerous complex non-linear computational analyses, presented in detail in the lecture. The soil-structure interaction was considered in all non-linear analyses. After completion the Pelješac Bridge will be ranked among the 5 largest and most attractive European bridges, constructed at the beginning of 21. Century.

Key words: extradosed bridge, stay-cable, deep foundation, piles, earthquake, wind, monitoring

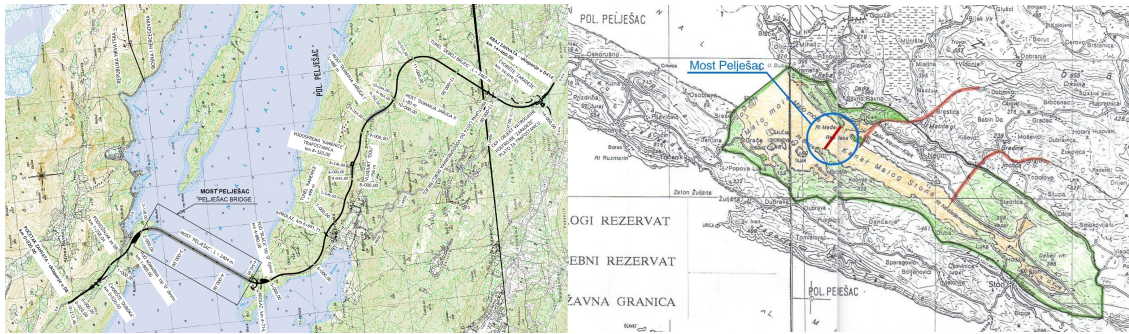


1. UVOD

Izgradnjom mosta kopno-Pelješac uspostaviti će se čvrsta cestovna veza između svih dijelova hrvatskog teritorija. Dubrovačko-neretvanska županija povezat će se s hrvatskim teritorijem, što će bitno doprinijeti razvitku Dubrovnika, poluotoka Pelješca i cijele najjužnije hrvatske županije. Most kopno-Pelješac prelazi preko morskog tjesnaca. Širina prepreke na razini mora iznosi približno 2.140 m. Duljina mosta od osi do osi upornjaka iznosi 2.404 m, dok ukupna duljina mosta s upornjacima iznosi 2.440 m. Na najvećem dijelu prijelaza dubina mora je približno stalna i iznosi oko 27,0 m.

1.1 Značajke lokacijemosta

Most se nalazi u vrlo osjetljivom ekološkom području Malostonskog zaljeva. Minimalni zahtijevani plovidbeni profil ispod mosta Pelješac, usuglašen s Bosnom i Hercegovinom, iznosi 200 x 55 m.

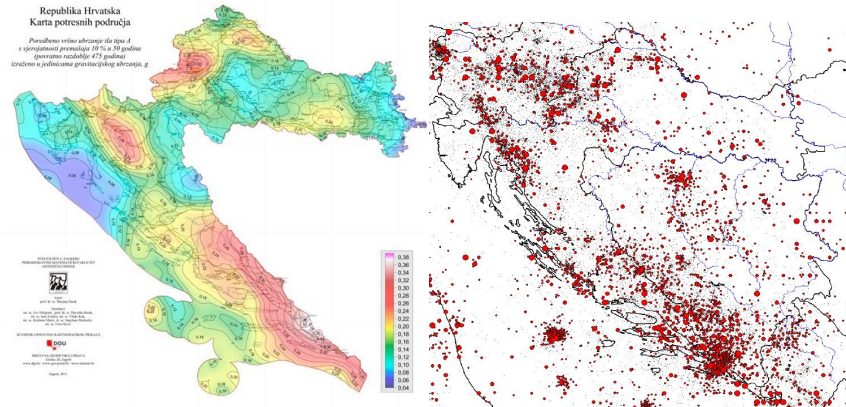


Slike1,2,3. Situacijski prikaz lokacije mosta i strogo zaštićenog područja prirodnog rezervata

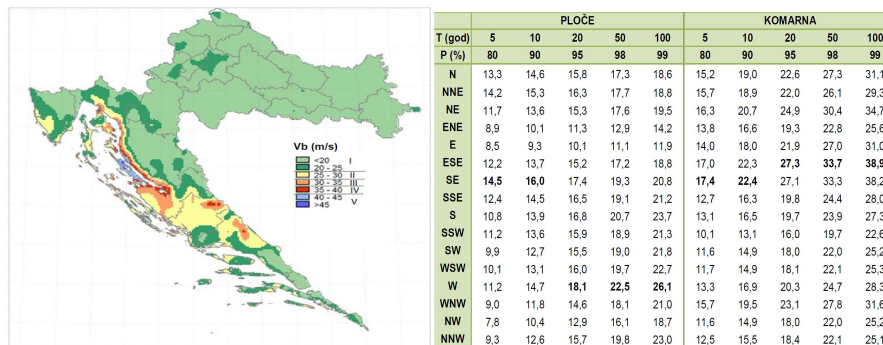
Duljina zaljeva iznosi 21 km i ima maksimalnu širinu 2.2 km. Dubina zaljeva iznosi između 7 i 28 metara. Zbog veoma čistog mora 1983. godine proglašen je rezervatom prirode u moru. Cjelokupno područje je također zaštićeno Naturom 2000 - ekološka mreža sastavljena od područja važnih za očuvanje ugroženih vrsta i stanišnih tipova Europske unije. Čisto more s odgovarajućim osobinama bio je temelj razvitku marikulture u Malostonskom zaljevu: uzgoj školjaka i ribarstva.



Most je smješten u zoni visoke seizmičke aktivnosti, s projektnim ubrzanjem tla na razini čvrste stijene $PGA = 0,34g$, i zahtijevanim proračunskim ubrzanjem $0,54 g$. Lokacija mosta podložna je i jakim vjetrovima, s referentnom brzinom vjetra koja prelazi 34 m/s .



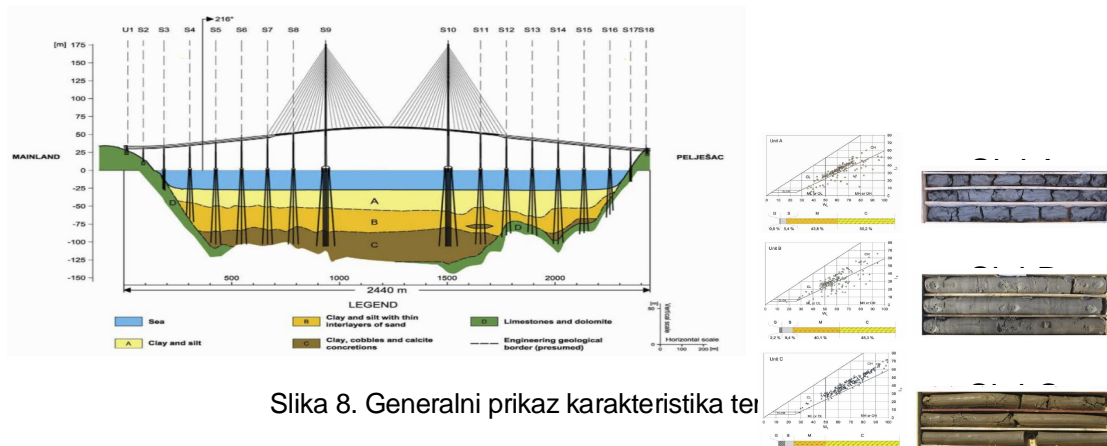
Slike 4.5. Karta potresnih područja i Epicentra potresa iz Hrvatskog kataloga potresa, 2011



Slike 6.7. Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra i očekivane 10-minutne brzine vjetra, te pripadne vjerojatnosti (P%) za povratna razdoblja od T godina dobivene iz podataka mjerenja na meteorološkim postajama Ploče i Komarna, u razdoblju od 2005 - 2014

Geološko – geotehnička struktura temeljnog tla u području mosta određena je na osnovu geoloških i geotehničkih istraživanja u godinama 2004 do 2011. Ukupno je bilo izvedeno 60 istražnih bušotina duljine do 130 m ispod dna mora. U godini 2018 izvoditelj je na osnovu zahtjeva iz tenderske dokumentacije izveo još dodatnih 17 istražnih bušotina.

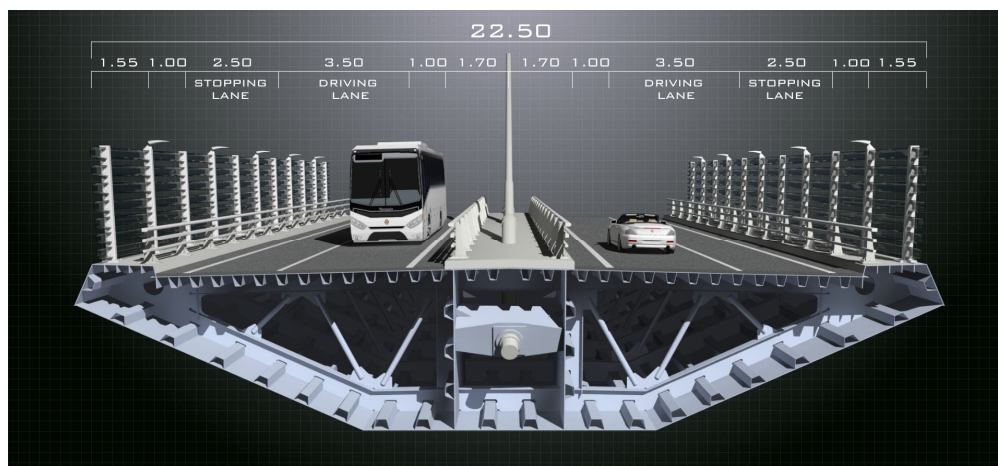
Debljina naslaga tla iznad vapnenačke stijene varira uzduž mosta u rasponu od 40 - 100 m i čine ih pretežno prašnaste gline, s mjestimično većim udjelom pjeskovitih ili šljunkovitih frakcija. Slojevi glina do dubine oko 60 m od morskog dna pripadaju grupi „mekih glina“, lakognječive do teškognječive konzistencije, sive do sivo maslinaste boje. Slojevi glina ispod 60 m starijeg su podrijetla, sivo smeđe do žuto smeđe boje, polučvrstoga do čvrstoga konzistentnog stanja, mjestimično cementirane ili s vapnenačkim konkrecijama, poroznosti manje od 50 %, te blago prekonsolidirane. Nedrenirane čvrstoće imaju osjetno veće vrijednosti od gornjih slojeva. U ovim se slojevima češće pojavljuju krupnozrne frakcije. Vapnenačka stijena u podlozi dosegnuta je u većini bušotina. Na zapadnoj strani, otprilike 700 m od poluotoka Pelješca, površinska, rastrošena stijenska zona nalazi se na dubini od oko 38 m od dna mora (podvodni greben), dok je na ostalim bušotinama prema kopnu stijena pronađena na dubinama od približno 75 - 102 m.



Slika 8. Generalni prikaz karakteristika terena

1.2 Geometrija ceste i prometne plohe na mostu

Prometnu plohu na mostu čine dva kolnika. Svaki kolnik obuhvaća voznu traku širine 3.5 m i zaustavnu traku širine 2.5 m i dvije rubne trake po 0.50 m. Između kolnika je predviđen razdjelni pojas sa sigurnosnom ogradom, koja osigurava sigurnost prometa u uvjetima jakog vjetrova. Na mostu je predviđena i zaštita od vjetrova koja omogućava korištenje mosta u praktično svim vremenskim uvjetima i smanjuje mogućnost prekida prometa i u slučaju jakih vjetrova.



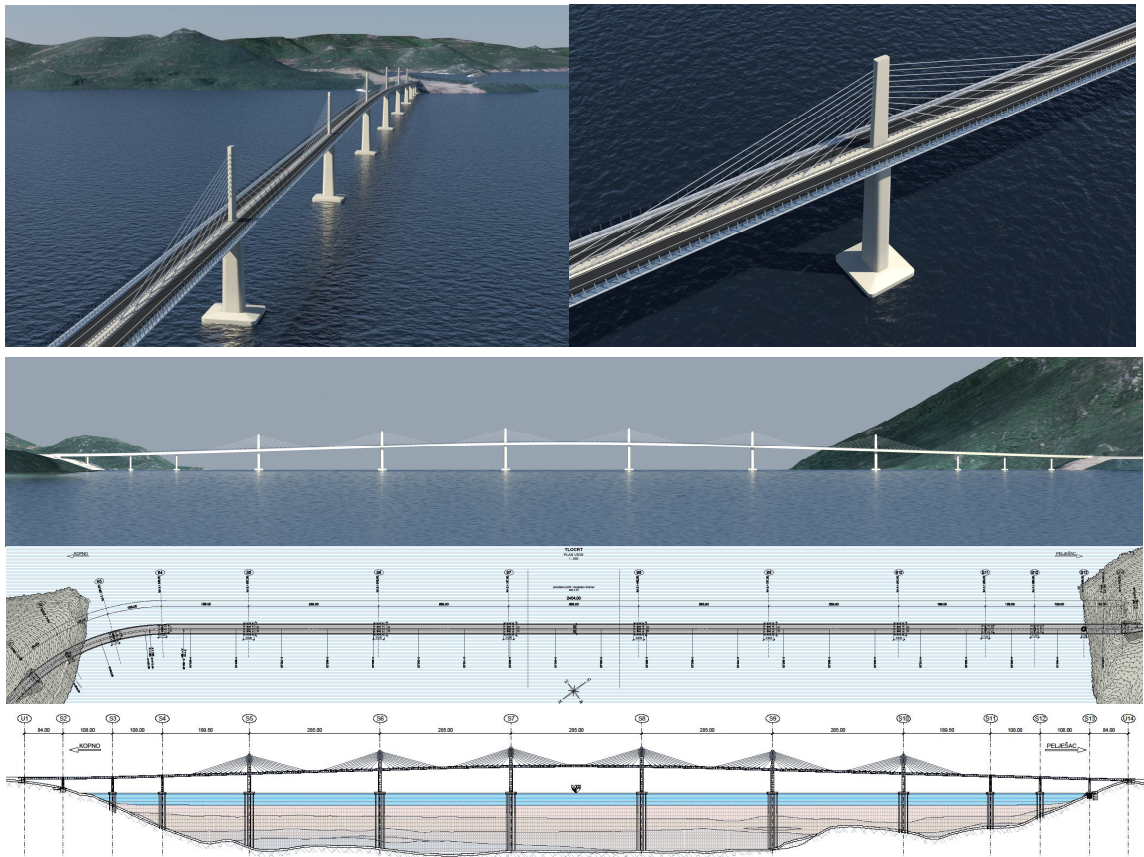
Slika 9. Konstrukcija rasponskog sklopa s prometnim ploham

Početak mosta je u stacionaži 2+138,00, u krivini radijusa $R=450$ m, a od stacionaže 2+410,45 do 2+485,45 most je u prijelaznoj krivini ($A=184$). Od stacionaže 2+485,45 do stacionaže 4+500,46 most je u pravcu, dok je sam kraj mosta, od stacionaže 4+500,46 do 4+542,00, u prijelaznoj krivini ($A=184$, $R=450$ m). Na dijelu mosta u pravcu usvojen je dvostrešan poprečni nagib kolnika od 2,5 %, a na dijelu mosta u krivini presjek se vitoperi po pravilima vođenja ceste, tako da na upornjaku U1 dva kolnika ostvaruju najveći poprečni jednostrešni pad od 5,8 %. Na mostu je predviđena vanjska čelična zaštitna ograda koja odgovara klasi zaštite H3W3 i unutrašnja čelična zaštitna ograda klase zaštite H2W1. Izvan rubnih zaštitnih ograda predviđene su revizijske staze širine 0.75 m i zaštitna ograda od vjetrova. Ukupna širina gornje plohe mosta sa revizijskim stazama i zaštitnom ogradom od vjetrova iznosi 22.50 m. Na mostu je predviđena ambijentalna i cestovna rasvjeta.



2. ARHITEKTURNI I KONSTRUKCIJSKI KONCEPT MOSTA

U traženju konstrukcijske i arhitektonske koncepcije mosta upotrijebljena je metoda cjelovite optimizacije. Potporna konstrukcija (temelji, stupovi upornjaci) predstavlja oko 40% ukupne vrijednosti investicije, što je relativno velik postotak u usporedbi sa drugim mostovima. Stoga je bilo potrebno pronaći optimalni odnos između broja potpora, raspona rasponske konstrukcije i izbora građevinskih materijala. Osiguravanje ispunjenja ključnih kriterija kvalitetnog konstruiranja, kao što su stabilnost, trajnost, ekonomičnost i mimo uključenje u krajolik, rezultiralo je u inventivnom konceptu mosta s kosim zategama i integralnom hibridnom strukturom. Most je koncipiran konstrukcijski inventivno kao polu-integralna ovješena hibridna konstrukcija sa 6 niskih pilona i 5 centralnih raspona duljine po 285 m. Tako je postignuta potpuna simetrija mosta u prostoru. Polu-integralno koncipirana konstrukcija osigurava seizmičku stabilnost mosta bez ugradnje velikih ležajeva i seizmičkih prigušivača. Ležajevi su predviđeni samo na krajnjim stupovima i na upornjacima.



Slika 10. Pogledi na most, tlocrt i uzdužni presjek

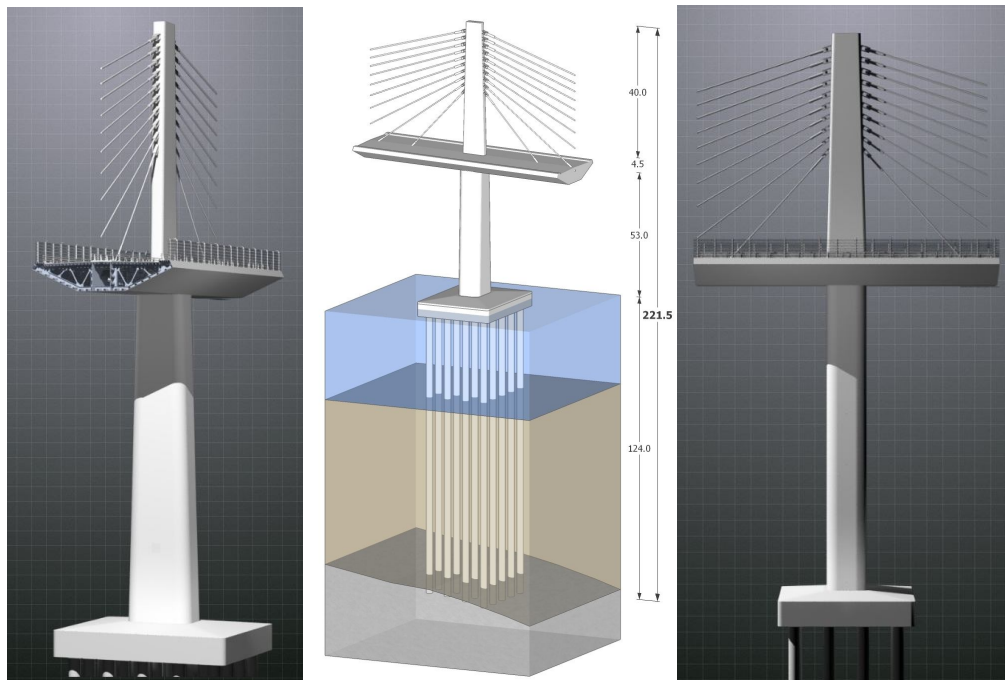
Rasponski sklop je kontinuirana čelična sandučasta konstrukcija visine 4,5 m i širine 22,5 m, s rasponima $84 + 2 \times 108 + 189.5 + 5 \times 285 + 189.5 + 2 \times 108 + 80 = 2404$ m, koja je u središnjem dijelu ovješena preko kosih zatega na 6 centralno postavljenih armiranobetonskih pilona. Visina pilona iznad rasponske konstrukcije iznosi 40,0 m, tako da omjer visine pilona prema rasponu iznosi $40,0/285,0 = 0,14$, što most svrstava na granicu između ovješениh i



polu-ovješnih mostova. Na stupnim mjestima S5 – S10 rasponska konstrukcija je upeta u pilone.

Stupovi S2 - S4 i S11 - S13 su sandučastog poprečnog presjeka, s izmjerama od 4.25 m uzduž mosta i promjenljivom širinom 8 - 10 m poprečno na most. Debljina stjenki je konstantna i iznosi 0.60 m u uzdužnom i poprečnom pravcu. Stupovi na vrhu završavaju ležajnim kvadrima koji omogućavaju ugradnju ležajeva i uzdužnih vodilica. Predviđen je prostor za postavljenje preša za zamjenu ležajeva i otvor za ulaz u stupove (pregled i održavanje ležajeva). Stupovi S5 – S10 su sandučastog presjeka, s dimenzijom u uzdužnom smjeru mosta 7.0 m i promjenljivom širinom poprečno na most 11.00 – 8.10 m. Stjenke su u poprečnom smjeru mosta debljine 0.80 m, dok su stjenke u uzdužnom smjeru mosta debljine 0.70 m. Debljina stjenki stupova S7 i S8 je zbog zaštite od udara broda u donjem djelu do visine 12 m povećana na 1.20 m. Armirano betonski piloni S5 - S10 su elastično upeti u betonski dio rasponske konstrukcije, odnosno direktno u stupove potpora u moru. Centralno postavljeni vertikalni piloni su betonski, visine 40 m i punog presjeka. Izmjere pilona na vrhu iznose 2.20 x 5.0 m, odnosno na nivou rasponske konstrukcije 2.20 x 7.00 m. Beton stupova je kompaktni, nepropusni razreda čvrstoće C50/60, a beton pilona je čvrstoće C70/85. Kose zatege se u pilonima sidre preko posebnih sidrišta tako da otpada izvedba skupog sustava (kućišta) za sidrenje kosih zatega. Na svakom pilonu je predviđeno po 10 sedala, koja se ugrađuju prije betoniranja.

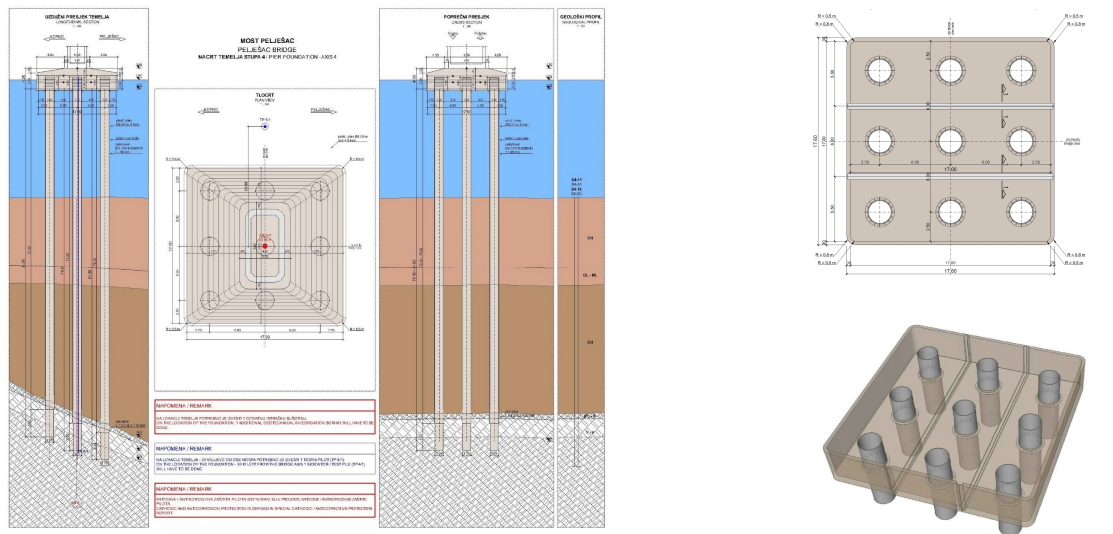
Kose zatege, koje su osnovni konstruktivni i nosivi element ovješnog mosta, će se izvesti od 55 - 109 paralelnih strukova nazivne površine $A=1,50 \text{ cm}^2$ (Parallel Strand System). Čelične žice su od materijala Y 1860 S7-16.0-A, u svemu prema normi HRN EN 10138-3, garantirane čvrstoće od 1860 MPa, zaštićene polietilenskim cijevima visoke gustoće (HDPE). Zaštitne polietilenske cijevi moraju biti na vanjskoj površini profilirane sa spiralnim rebri za smanjenje vibracija od djelovanja vjetera i kiše. Duljina kosih zatega iznosi od 32.5 m do 137 m.



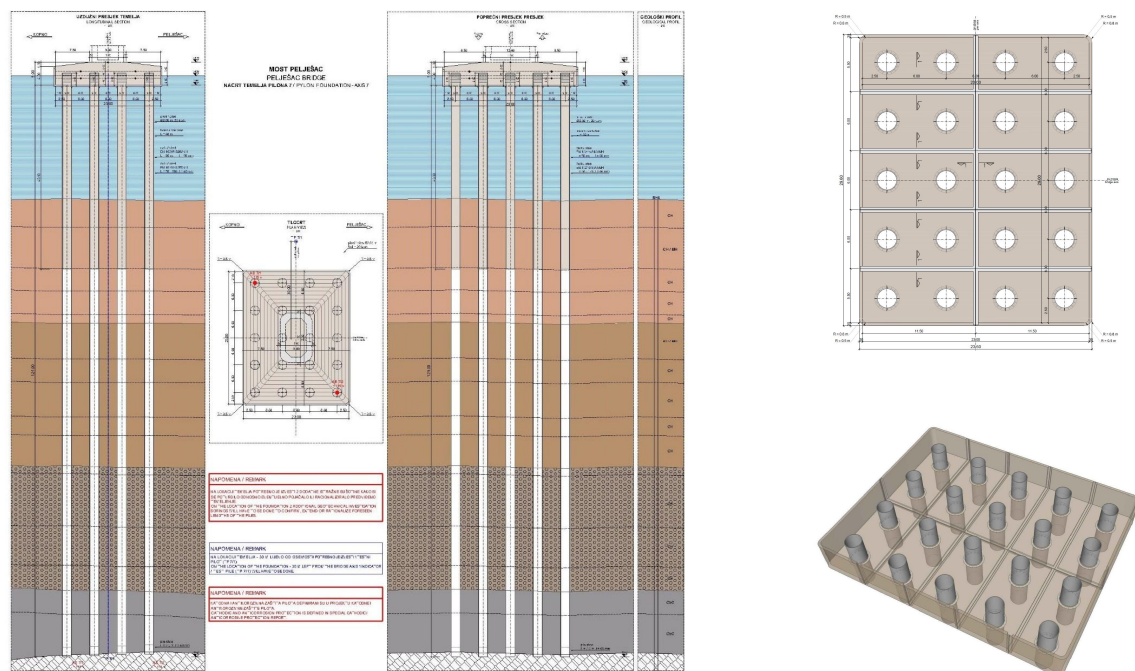
Slika 11. Koncept stupova - pilona S5 – S10



Stupovi S3 - S12 koji su u moru, duboko su temeljeni na zabijenim čeličnim pilotima promjera 1800 i 2000 mm, duljine 36 - 124 m. Debljina stjenki čeličnih pilota iznosi 40 – 60 mm. Piloti stupnih mjesta S3, S4, S10, S11 i S12 izvedeni su u kao spregnuti s betonskom stopom u kompaktnom krečnjaku, a piloti stupnih mjesta S5 – S9 zapunjeni su betonom samo do dubine 40 m (spregnuti) ispod betonskih naglavnica. Piloti su elastično upeti u masivne betonske naglavnice dimenzija 17 x 17 x 4.5 m (stupišta S3, S4, S11, S12), a dimenzija naglavnica pilota ispod stupova pilona iznose 23 x 29 x 5m. Stupišta S3 i S12 su temeljena na 9 pilota promjera 1800 mm, stupišta S4, S11 na 9 pilota promjera 2000 mm, stupišta S5, S6, S9, S10 na 18 pilota promjera 2000 mm, a stupišta S7 i S8 na 20 pilota promjera 2000 mm (udar broda).



Slika 12. Temeljenje stupova S3,S4,S11,S12



Slika 13. Temeljenje stupova S7 i S8



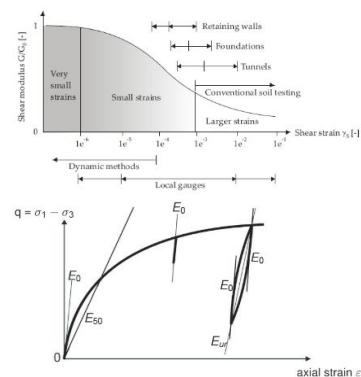
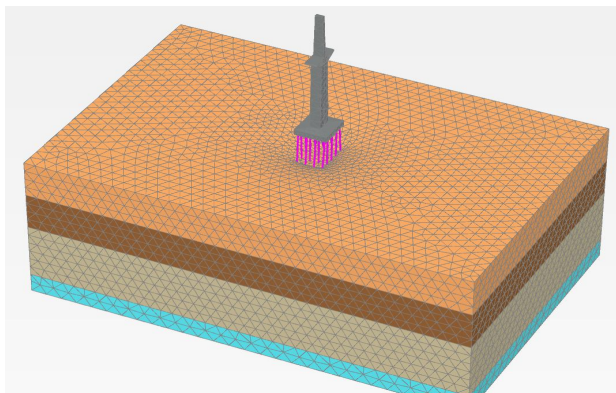
3. STATIČKI I DINAMIČKI PRORAČUN MOSTA

Pelješki most svrstava se, ne samo po kompleksnosti gradnje nego i po složenosti projekta, među najzahtjevnije mostove na svijetu. Nalazi se u području iznimno visoke seizmičke aktivnosti s projektnim ubrzanjem tla na razini čvrste stijene $PGA=0,34$ g i zahtijevanim proračunskim ubrzanjem 0,54 g. Kompaktna stijena nalazi se na dubini do 80 m ispod morskog dna, što rezultira iznimno zahtjevnim temeljenjem na pilotima duljine preko 120 m. Posebna je pozornost posvećena osiguravanju stabilnosti mosta u slučaju udara vjetrova na mah i potrebi da je most otvoren u svim vremenskim uvjetima. Ispunjavanje ključnih kriterija kvalitetnog konstruiranja, kao što su stabilnost, trajnost, ekonomičnost i mirno uključanje u krajolik, rezultiralo je inventivnom koncepcijom ekstradosa mosta i integralnom hibridnom strukturom. Tako koncipirana konstrukcija osigurava potrebnu seizmičku stabilnost mosta bez ugradbe velikih ležajeva i dodatnih seizmičkih prigušivača, što potvrđuju složene nelinearne proračunske analize u kojima je uzeta u obzir i interakcija temeljnog tla i konstrukcije mosta. Statičke i dinamičke analize mosta bile su podijeljene u dvije faze. Preliminarne analize su bile provedene u fazi traženja optimalnog konstrukcijskog rješenja mosta. Glavna opterećenja koja su bitno utjecala na koncept mosta su bila potres i vjetar. Nakon završetka preliminarnih analiza i faze optimizacije pristupilo se detaljnim analizama. Analizirana su opterećenja, definirana u skladu sa HRN EN 1991 i nacionalnim aneksima, kako za fazu uporabe, tako i za fazu izgradnje mosta:

- Stalna i prometna opterećenja
- Diferencijalni pomaci temelja
- Puzanje i skupljanje betona
- Temperature promjene
- Potres, vjetar, udar broda (mjerodavno za stabilnost mosta)
- Promjena i lom kosih kabela
- Zamor

3.1 Preliminarne analize

U fazi traženja optimalnog koncepta mosta i načina temeljenja bile su analizirane i brojne varijante s različitim brojem pilota, i s kosim pilotima. Značajna nelinearna ponašanja tla i neelastične deformacije elemenata temeljenja, očekuju se obzirom na temeljenje mosta na vrlo dugim i vitkim pilotima koji prolaze kroz slojeve mekanog tla. Napravljena je 3D analiza interakcije temeljnog tla i konstrukcije temelja za jedno karakteristično stupno mjesto – Stup 9 s volumenskim konačnim elementima (kontinuum model sustava tla i temeljenja).

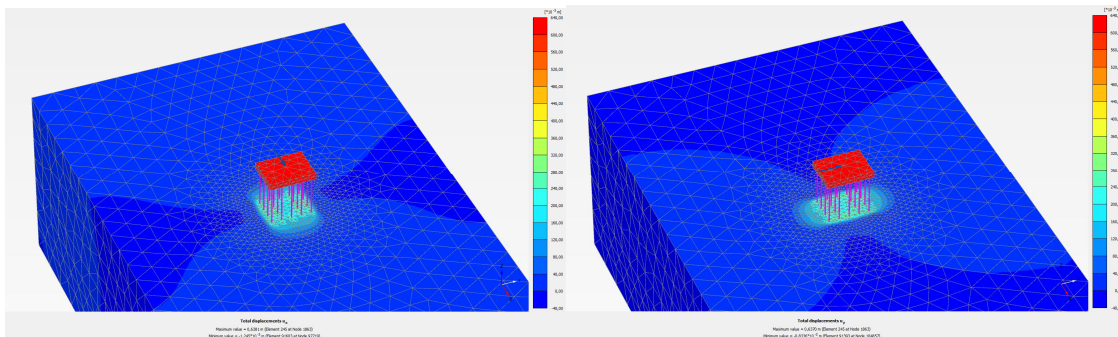


Slika 14. 3D model kontinuuma tla i temeljne konstrukcije s volumenskim FEM elementima

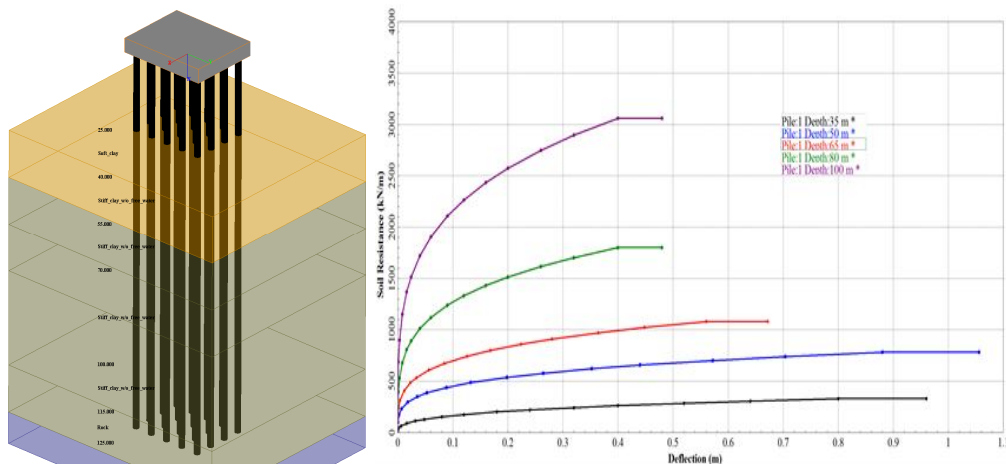


Slika 15. U fazi traženja optimalnog načina temeljenja bile su analizirane brojne varijante sa različitim brojem pilota, i s kosim pilotima

Analiza je izvedena na HSS geotehničkom modelu (Hardening Soilwithsmall-strain stiffness), koji omogućava uvažavanje velikih promjenljivosti krutosti kod povećanja relativnih posmičnih deformacija u području malih deformacija tla, histereznih efekata i histereznog prigušivanja u tlu, u slučaju cikličkog opterećivanja ili dinamičkog ponašanja tla. Preliminarne statičke „Pushover“ analize bile su provedene na SSI modelu kako bi se procijenilo ponašanje pod utjecajem vertikalnih i horizontalnih opterećenja, intenzitete od 10 do 50 MN) u nedreniranim uvjetima (zbog kratkotrajnog djelovanja horizontalnog opterećenja).



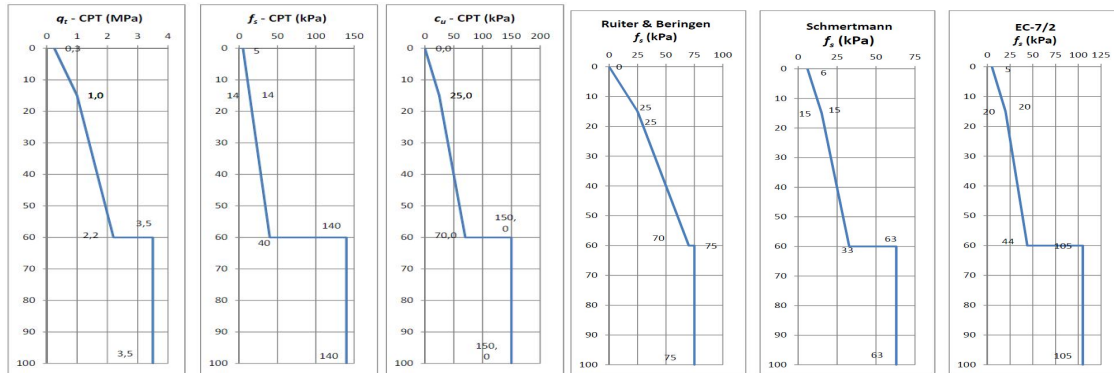
Slika 16. Deformacije konstrukcije (vertikalno opterećenje + horizontalno opterećenje 50 MN u smjeru osi mosta i poprečno na os mosta (nedrenirani uvjeti)



Slika 17. Prikaz „p-y“ krivulje / nelinearnog ponašanja temeljnog tla – gline na različitim dubinama

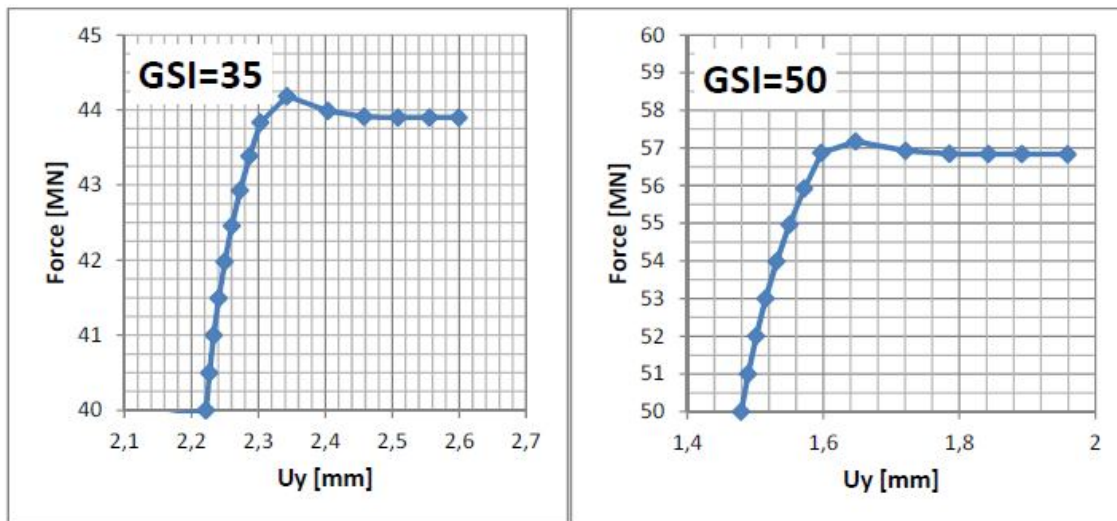


Nosivost pilota po plaštu određena je temeljem rezultata CPT testa (vrijednost otpora prodiranju šiljka. Na slijedećoj slici prikazan je odnos vrijednosti otpora prodiranju šiljka (CPT) q_t , trenja po plaštu f_s i nedrenirane posmične čvrstoće c_u prema dubini. Granična vrijednost trenja po plaštu pilota f_s određena je prema Ruiter&Beringen (1997), Schmertmann (1978) i Eurokodu 7/2, kako je prikazano na slijedećoj slici:



Slike 18,19. Vrijednost otpora prodiranju šiljka (CPT) q_t , trenje po plaštu f_s i nedrenirana posmična čvrstoća c_u vs. dubina, Granična vrijednost trenja po plaštu pilota f_s prema Ruiter&Beringen (1997), Schmertmann (1978) i EC 7/2

Obzirom da ne postoje pouzdani analitički izrazi za određivanje nosivosti „šuplje“ stope čeličnih pilota velikog promjera, nosivost stope takvih pilota dobivena je nelinearnim proračunom stope pilota pomoću metode konačnih elemenata. Model se sastoji od tla i pilota, a proračun je proveden pomoću programskog paketa za geotehničke analize Plaxis.



Slike 20,21. GSI slika prikazuje pomak stope pilota pri slomu (GSI=35) i krivulju sila – pomak za zadnji korak opterećivanja od 40 MN – 50 MN (GSI=35) i od 50 MN – 60 MN za GSI=50. Dobivena je granična nosivost za stopu šupljeg čeličnog cjevastog pilota u iznosu od 43.9 MN i 56.8 MN za GSI vrijednosti 35 odnosno 50, osiguravajući da se pilot u potpunosti oslanja na stijenu.

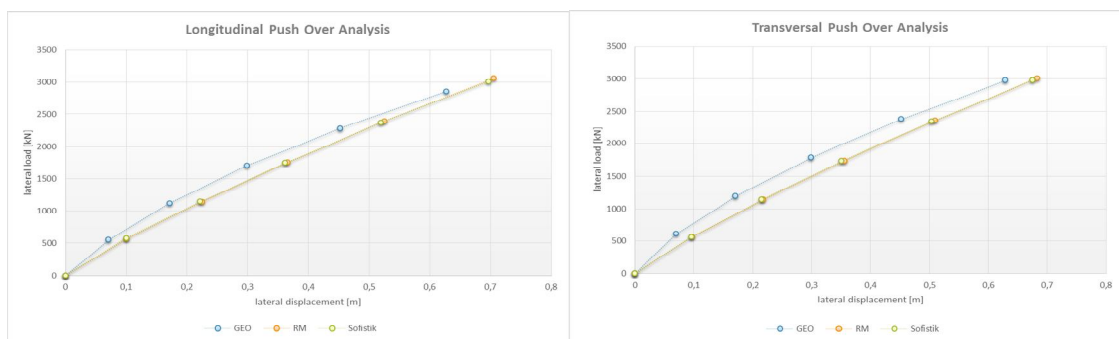


Nosivost stopa pilota, koji su betonirani u stijenu može se procijeniti prema izrazu $q_b=3q_u$. Za uvjete gdje je stijena slabije nosivosti, pretpostavka na strani sigurnosti je da je nosivost na stopi pilota $q_b = q_u$, što je korišteno za dokazivanje nosivosti pilota za pilote betonirane u stijenu. Obzirom da otpornost stijene premašuje čvrstoću betona, proračunska nosivost ograničena je na nosivost pilota ($f_{ck} = 35 \text{ MPa}$).

Pri proračunu nosivosti pilota na tlak uvažavali su slijedeći sigurnosni faktori: $\gamma_c = 1.10$ (parcijalni koeficijent za tlačnu otpornost pilota), $\gamma_M = 1.40$ (faktor modela za alternativne metode dokazivanja nosivosti) i $\gamma_G = 1.35$ (parcijalni koeficijent za povećanje težine pilota). Pri proračunu nosivosti pilota na vlak uzeti su slijedeći sigurnosni faktori: $\gamma_c = 1.15$, $\gamma_M = 1.40$ i $\gamma_G = 1.00$.

3.2 Detaljna analiza mosta

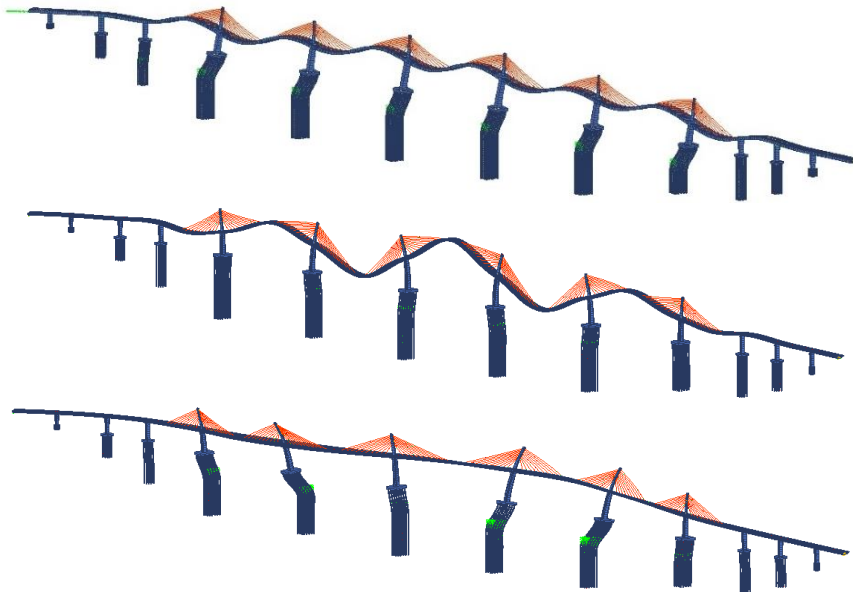
Globalna analiza mosta provedena je paralelno / nezavisno s dva različita renomirana programska paketa, RM-Bridge Enterprise / Bentley i Sofistik. Oba kompjutorska modela napravljena su s istom točnošću, s uvažavanjem SSI. Tu je potrebno posebno napomenuti (Soil – structure interaction) - kalibriranje i kontrolu štapnih računskih modela za pravilno uvažavanje nelinearnosti temeljnog tla. Kako bi se potvrdile vrijednosti „p-y” krivulja dobivenih pomoću kontinuum modela tla i temeljenja, provedena je kontrolna “push - over” analiza za štapni model konstrukcije mosta s nelinearnim oprugama tla.



Slike 22,23. Usporedba rezultata „push-over“ analize na geotehničkom modelu i na štapnom modelu s nelinearnim oprugama



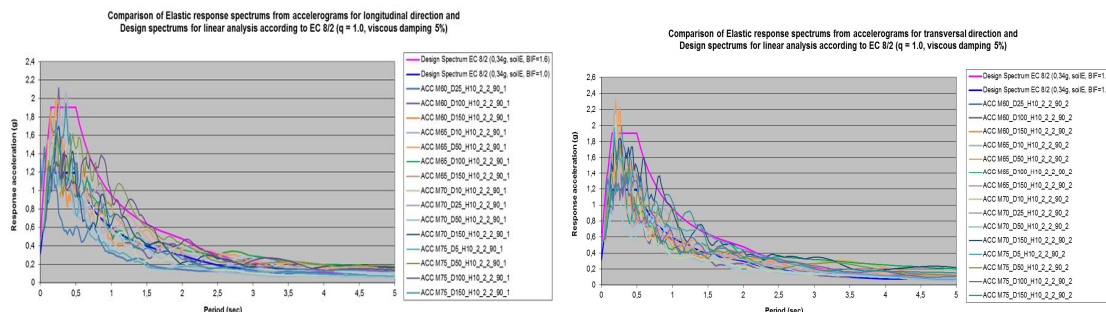
Slika 24. RM Bridge / Bentley model sa štapnim (beam) elementima i Sofistik model sa štapnim i pločastim elementima

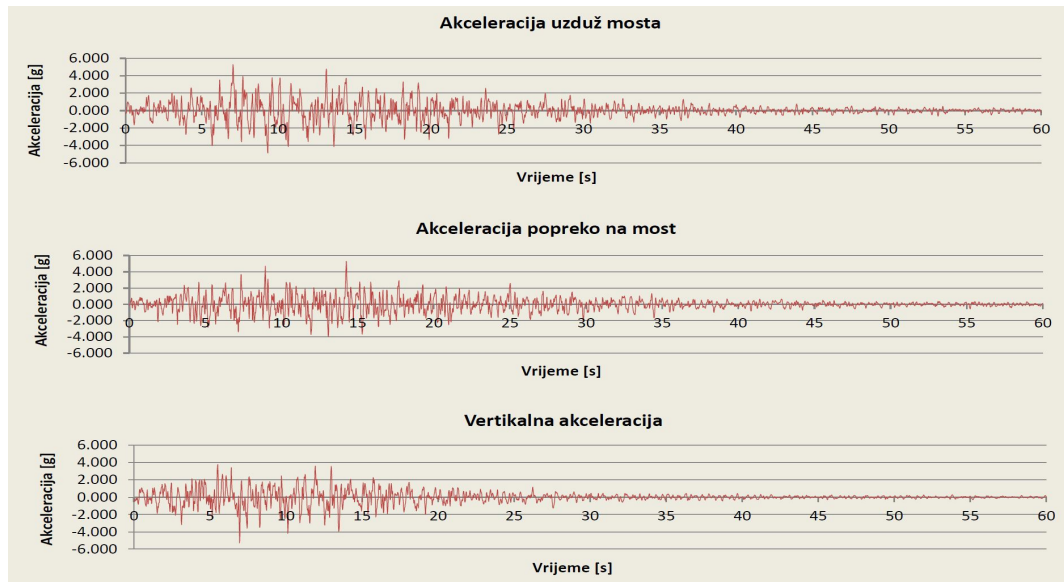


Slika 25. Prva tri oblika osciliranja konstrukcije mosta

Most je projektiran i konstruiran tako da izdrži djelovanje ruševnog potresa bez oštećenja, koja bi uticala na lokalnu ili globalnu nosivost i upotrebljivost mosta. Prema HRN EN 1998-2/NA: TNCR = 475 godina, $PGA = 0.34g$, faktor važnosti $\gamma_I = 1.60$, faktor ponašanja mosta iznosi $q = 1.0$, $AE = 0.34 \times 1.6 = 0.54g$. Analiza vremenskog zapisa ubrzanja tla (Time History Analysis) izvedena je na osnovi seizmološke studije koju je izradio Geološki odsjek Prirodoslovno - matematičkog fakulteta iz Zagreba. Generirana su 72 numerička sintetička akcelogramata za potrese magnitude $M = 6.0, 6.5, 7.0$ i 7.5 i za udaljenost od epicentra $5.0, 10.0, 25.0, 50.0, 100.0$ i 150.0 km, u dubini od 10 km, što iznosi ukupno 24 različita seta seizmičkog opterećenja.

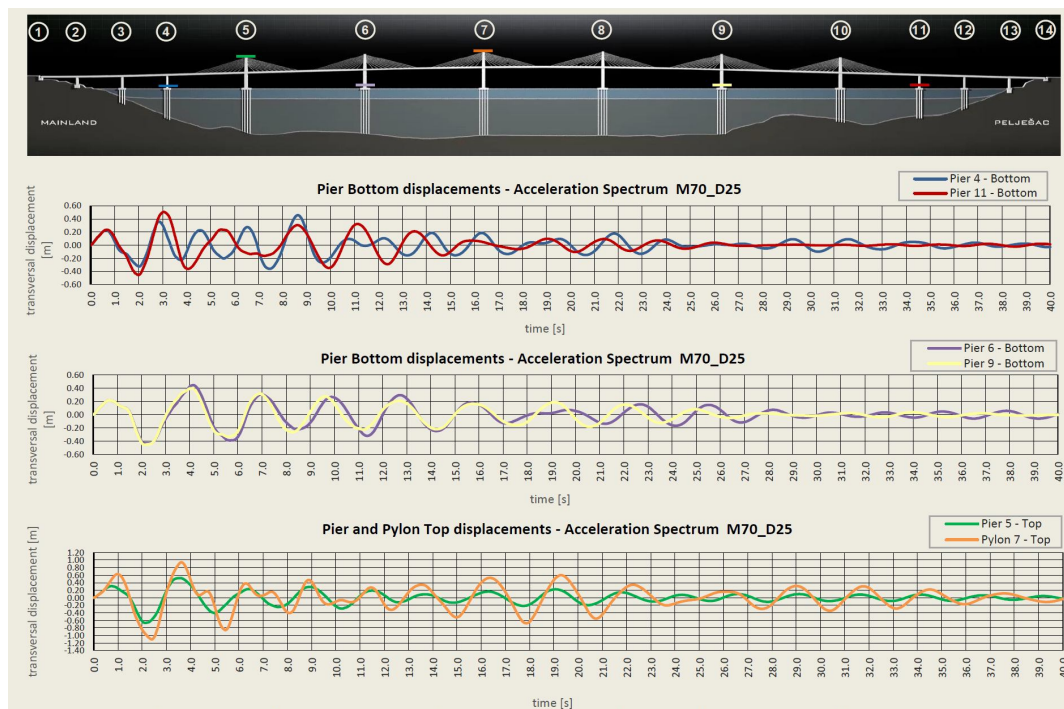
Svaki set opterećenja sastoji se od tri različita zapisa, za tri različita smjera (uzdužno, poprečno, vertikalno). Nelinearna dinamička analiza (Nonlinear Time History Analysis) provedena je na modelu s nelinearnim oprugama (p-y). Petnaest najkritičnijih setova opterećenja izabrano je od 24 seta opterećenja i za ta opterećenja napravljena je „Time History“ analiza. Svako od tih opterećenja sadrži simultano djelovanje triju različitih zapisa u tri smjera (uzduž mosta, poprijeko na most i vertikalno). Analiza je bila provedena uzimajući u obzir maksimalnu vrijednost projektnog seizmičkog ubrzanja $\alpha_g = 0.54 g$ za sve epicentralne udaljenosti (normiranje akcelogramata na $0.54 g$).

Slika 26,27. Usporedba elastičnih spektra određenih na osnovi akcelogramata i projektnog spektra određenog prema HRN EN 1998-2 ($q=1.0$, prigušivanja 5%)



Slika 28. Primjer potresnog opterećenja - sintetičkih akceleroograma, simultano djelujućih uzdužno, poprečno i vertikalno na most ($M = 7.5$, udaljenosti epicentra 100 km)

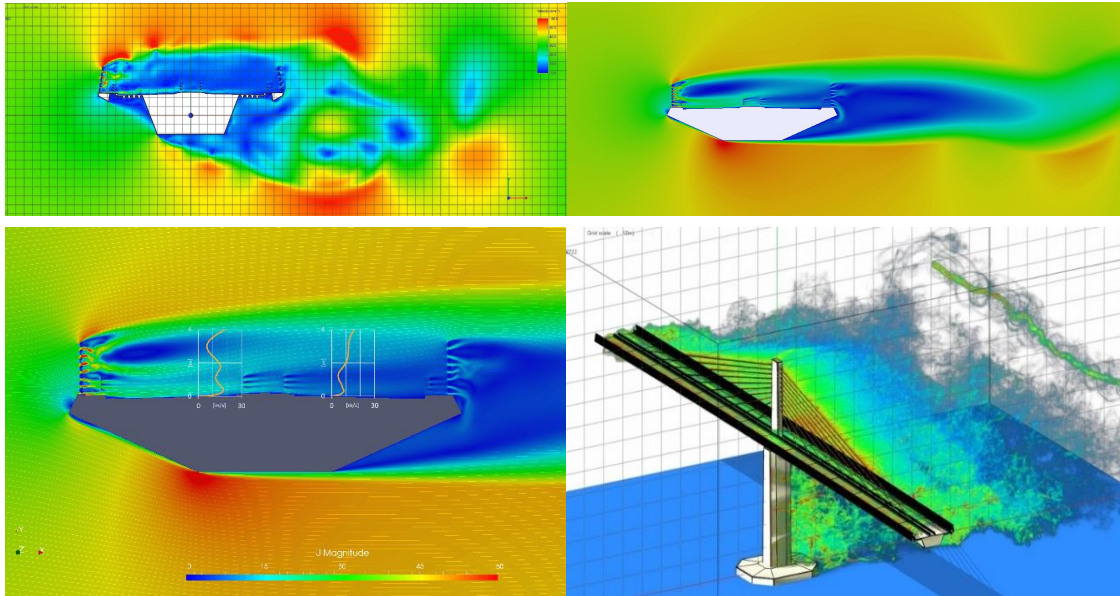
Rayleighovo prigušenje je definirano s matricom prigušenja $C = \alpha K + \beta M$. Vrijednosti prigušenja na temelju materijala dane u EN 1998/2, 4.1.3 su: zavareni čelik $\xi = 2\%$ i armirani beton $\xi = 5\%$. Prigušivanje konstrukcije uzeto u obzir u analizi u iznosu 2.5 %.



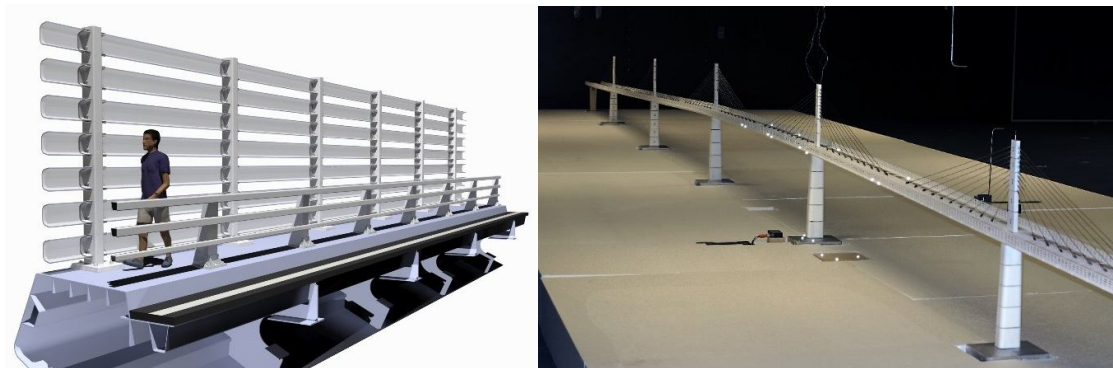
Slika 29. Rezultati TH analize – vremenski ovisni pomaci konstrukcije u poprečnom smjeru



U traženju optimalnog oblika rasponskog sklopa i zaštite od vjetra, CFD (Computational Fluid Dynamic) analizirano je više različitih oblika poprečnog presjeka, s i bez ograde za zaštitu od vjetra.



Slika 30. Rezultati "in-house" CFD analiza poprečnog presjeka i mosta v fazi građenja



///

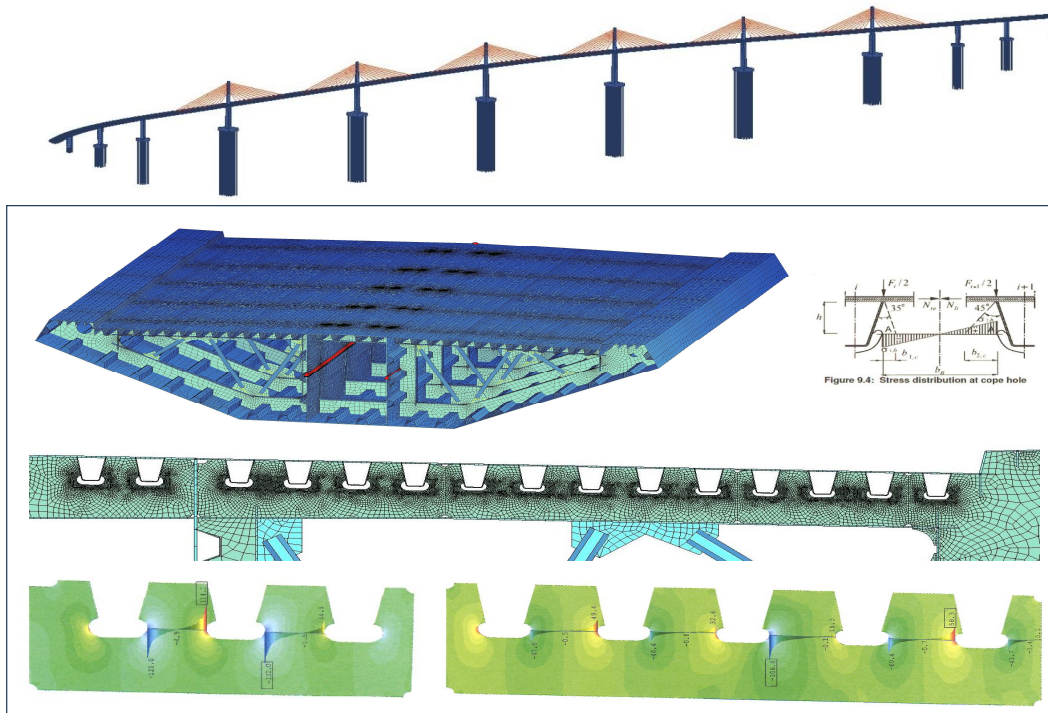
Slike 31,32. Ograda za zaštitu od vjetra i testiranja modela mosta (Full Bridge Model Test, 1:150) u vjetrovnom tunelu Force Technology / Kopenhagen - Danska

Aerodinamičke značajke poprečnog presjeka i mosta kao cjeline potvrđene su testiranjem mosta u zračnom tunelu. U prvoj fazi provedeno je ispitivanje modela segmenta mosta. Kako se rezultati dobiveni u zračnom tunelu za 2D model ne mogu direktno usporediti sa stvarnim ponašanjem cijele konstrukcije mosta, u slijedećoj fazi projektiranja provedeno je ispitivanje modela cijelog mosta. Ispitivanje modela cijelog mosta provedeno je u zračnom tunelu tvrtke Force Technology. U program ispitivanja bilo je uključeno ispitivanje aerodinamičke stabilnosti modela cijelog mosta u fazi uporabe i dijela konstrukcije u fazi gradnje – piona s konzolom.

Na temelju ispitivanja aerodinamičkog odgovora modela cijelog mosta moguće je zaključiti, da je osigurana aerodinamička stabilnost mosta za sve brzine vjetra i različite smjerove djelovanja, kako u laminarnom tako i u turbulentno strujanju minimalno do brzine vjetra 250 km/h (70 m/s).

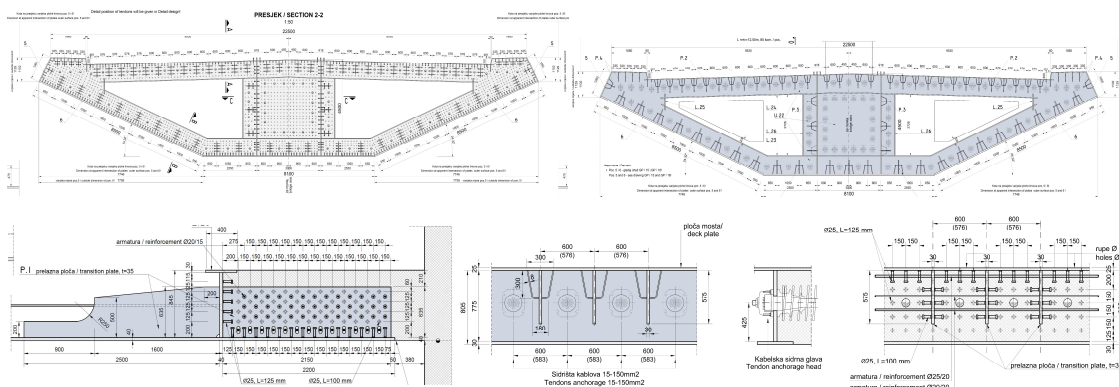


Čelična konstrukcija rasponskog sklopa analizirana je za globalne i lokalne utjecaje. Izračunate su rezne sile za sva mjerodavna djelovanja i maksimalni/minimalni normalni i posmični naponi u pojedinim čeličnim elementima, kako za fazu građenja, tako i za fazu uporabe mosta. Globalnoj analizi je slijedila provjera pločastih elemenata rasponske konstrukcije na izbočivanje (plate buckling resistance) i dimenzioniranje zavora. Debljine limova rasponskog sklopa ne premašuju 40 mm, a u područjima gdje su naponi prekoračeni predviđen je čelik više kvalitete (S460).

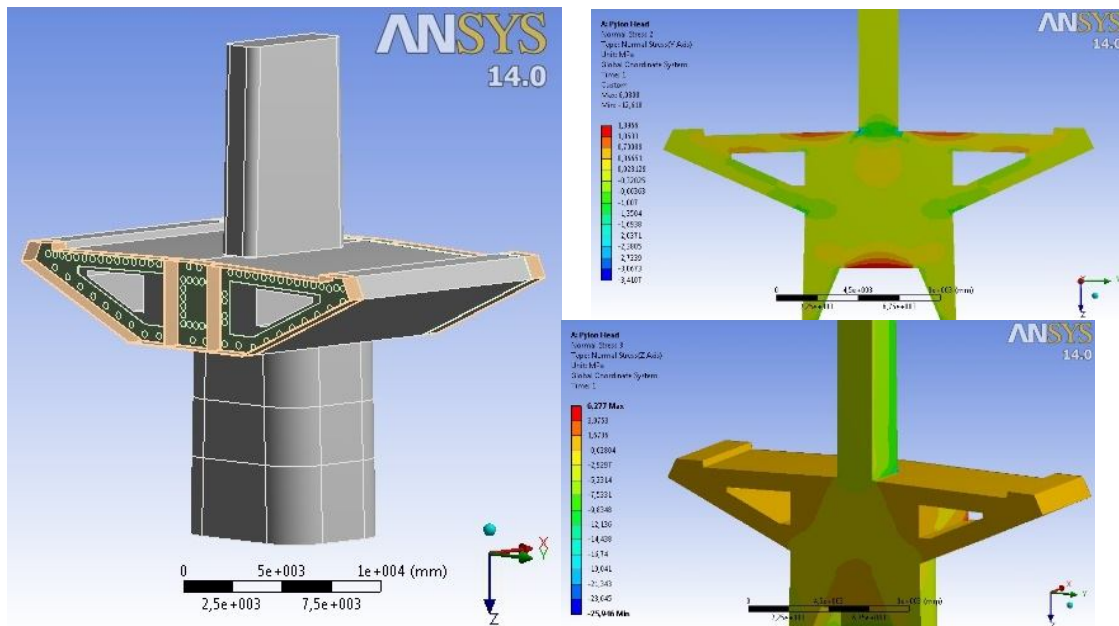


Slika 33. Model kompletnog mosta i prikaz kontrole zamora u limovima rasponskog sklopa

Analizirana je kombinacija učinaka od lokalnog i globalnog opterećenja. U poprečnom smjeru analizirana su poprečna ukrućenja i dijafragme iznad stupova. Izvedena je kontrola sidrišta kosih zatega, a posebno detaljno je analiziran kontakt-spoj između betonske i čelične konstrukcije.



Slika 34. Prikaz kontakta - spoja između betonske i čelične konstrukcije



Slika 35. Prikaz detaljne analize spoja stupa, pilona i čelične konstrukcije sa "solid" elementima

5. MONITORING U FAZI GRADNJE I U FAZI UPORABE

Za Most Pelješac predviđena je primjena modela trajnog praćenja stanja konstrukcije sa jednog centralnog mjesta gdje će se „in-time“ u fazi gradnje i u fazi eksploatacije objekta pratiti:

- parametre ponašanja konstrukcije (temperatura čelične konstrukcije, kosih zatega i betonske konstrukcije, naponi, deformacije, vibracije,),
- vremenske parametre pomoću vremenske stanice s ugrađenim ultra-soničnim anemometrom (temperatura i vlažnost zraka, smjer i brzina vjetera),
- seizmičku aktivnost (mjerenje seizmičke aktivnosti na užem području mosta),
- trajnost konstrukcije.

4. ZAKLJUČAK

Potrebno je napomenuti da je napravljen veliki napor da se napravi konstrukcijski suvremen, oblikovno jedinstven i ekonomičan most, koji na vrlo jasan način oslikava vrijeme u kojem je nastao. Ali ovakav veliki i impresivan most ne može biti samo suvremena i vrhunski dizajnirana inženjerska konstrukcija bez duše i karaktera. Veliki i značajni mostovi imali su u povijesti graditeljstva uvijek posebnu ulogu i kao spomenici tehničke kulture nekog naroda. Mostovi izražavaju najljepše arhitektonske poruke o upotrjebljenoj tehnologiji gradnje, snazi, tehničkoj i kulturnoj prosvjetljenosti investitora, kao i o osjećaju projektanta za konstrukcijsku harmoniju (usklađenost) i inventivnost.

Most Pelješac će se nakon izgradnje svrstati među 5 najvećih i najatraktivnijih mostova u Europi. Nema dvojbi da će most predstavljati i jedan od novih simbola suvremene Hrvatske.