

Marko BOŽOVIĆ

Građevinski fakultet

marko.bozovic1998.mb@gmail.com

Mentor: prof. dr Mladen Ulićević

PROJEKTOVANJE I IZGRADNJA LUKOBRANA ZA ZAŠTITU LUKA OD DEJSTVA MORSKIH TALASA

UDK 627.235(043.2)

Sažetak: Lukobrani predstavljaju vrstu maritimnih objekata, koji su aktuelni kako u svijetu tako i kod nas. U ovom radu je definisan opis i namjena ovakvih konstrukcija sa njihovim osnovnim karakteristikama. Osnovna uloga lukobrana jeste zaštita obale i svih ostalih dijelova jedne luke. U zavisnosti od njegove funkcije i lokacije na kojoj se gradi bitno je izvršiti adekvatan izbor tipa lukobrana. Pored izbora tipa lukobrana razmatran je i istorijski razvoj tipova lukobrana počevši sa lukobranima od kamenog nasipa i vertikalnim lukobranima pa do kompozitnih vrsta lukobrana. Za svaki tip lukobrana prikazan je proračun dejstava koja se javljaju sa naznakom na teoriju talasa kao dominantno dejstvo. Kao i za svaki drugi inženjerski objekat, i za lukobrane su definisani kriterijumi trajnosti i nosivosti, prednosti i nedostaci. Nakon adekvatno obrađenog teorijskog dijela izvršena je izrada idejnog projekta vertikalnog lukobrana sa meteorološkim, batimetrijskim i geotehničkim karakteristikama lokacije kao u luci Bar. U poređnom analizom dvije varijante rješenja lukobrana, kesonskog i lukobrana od betonskih blokova, odabran je kesonski lukobran za koji je izvršen proračun dejstava i uticaja. Dimenzionisanje elemenata, za granična stanja nosivosti i upotrebljivosti, izvršeno je prema *Eurokodu* i to za projektovani vijek konstrukcije od 100 godina. S obzirom da u novije vrijeme imamo upotrebu kompozitnih materijala, kao što je armatura od polimera ojačanih staklenim vlaknima (GFRP), izvršeno je poređenje učinkovitosti armiranja klasičnom čeličnom armaturom i armaturom od polimera i to u pogledu ekonomske i inženjerske racionalnosti. U sklopu idejnog projekta poseban akcenat je dat na aspekt izgradnje i održavanja ovakvih objekata jer se rade u uslovima koji su promjenljivi sa vremenom. Pored kamena, jednako bitan konstruktivni materijal za izgradnju je beton, za koji su razmatrani kriterijumi za sastav betonske mješavine usljed agresivnosti morske sredine. Imajući u vidu da je ova vrsta inženjerskih objekata u Crnoj Gori nedovoljno istražena, bilo je inspirativno i zanimljivo obraditi ovakvu temu sa stručnog i naučnog stanovišta.

Ključne riječi: lukobran, teorija talasa, beton, GFRP, izgradnja

UVOD

U novije vrijeme, razvojem pomorskog saobraćaja i turizma na crnogorskom primorju, javlja se velika potreba za istraživanjem u oblasti projektovanja i izgradnje objekata maritimne infrastrukture kao što su luke, lučice i marine. Osnovni razlog za ovo istraživanje jeste aktuelnost predložene teme i nedostatak iskustava, znanja i vještina u Crnoj Gori za uspješnu realizaciju ovog tipa maritimnih objekata.

Predmet istraživanja su aspekti projektovanja i izgradnje lukobrana – pomorskih građevina za zaštitu lučkih i marinskih akvatorija i plovnih objekata od dejstva morskih talasa. Na osnovu raspoloživih literaturnih izvora i dodatnih istraživanja urađen je pregledni rad koji se sastoji od prikaza projektovanja i izgradnje lukobrana za zaštitu od dejstva morskih talasa i idejnog projekta vertikalnog lukobrana u luci Bar. Na taj način stečena znanja u teorijskom dijelu se primjenjuju u idejnom projektu vertikalnog lukobrana gdje su projektovana dva varijantna rješenja vertikalnog lukobrana. Odrađena je uporedna analiza lukobrana od kesona, kao prvog varijantnog rješenja, i lukobrana od betonskih blokova, kao drugog varijantnog rješenja. Osim toga, zbog specifičnosti lokacije na kojoj se objekat projektuje, testirana je mogućnost primjene savremenih materijala od polimera ojačanih staklenim vlaknima.

Svrha istraživanja jeste nadograđivanje postojećih znanja i vještina u datoj oblasti u cilju formiranja stručnog inženjerskog kadra koji će biti sposoban za uključenje u izradi složenih građevinskih projekata koji su već prisutni ili su planirani na crnogorskom primorju.

Polaznu osnovu za izradu ovog istraživanja čini stručna literatura (Babović, 2014) (Takahashi, 2002) u kojoj su prikazani principi projektovanja i izgradnje lukobrana. Dalju nadogradnju predstavljaju najkompletniji tehnički standardi koji propisuju opšte i posebne kriterijume i postupke za projektovanje i izgradnju pomorskih objekata – britanski standardi serije BS 6349 (BSi 1991, 1994, 2000). U ovim tehničkim publikacijama su sublimirana relevantna iskustva razvijenih pomorskih zemalja u datoj oblasti. Specifičnost određivanja signifikantne visine morskih talasa obrađuje Pršić (2008) dok američki priručnik za obalno inženjerstvo SPM (1984) daje formule za određivanje debljine elemenata primarnog zaštitnog sloja lukobrana od nasipa. Određivanje dužine vjetrovnih talasa na Jadranu obradili su Zorović i Mohović (2003) dok Burcharth i Sorensen (1999) uvode parcijalne faktore sigurnosti u proračun vertikalnih kesonskih zidova. S obzirom da britanskim standardima nije dovoljno razrađen seizmički proračun lučkih konstrukcija, za ovu oblast vrlo je korisna publikacija svjetskog udruženja za vodnu transportnu infrastrukturu (PIANC, 2001). Isto udruženje (PIANC, 2005) je standardizovalo i predložilo primjenu prefabrikovanih betonskih elemenata za izgradnju lučnih zaštitnih objekata. Veoma korisne informacije dobijaju se i iz raspoložive tehničke dokumentacije koja je formirana pri izgradnji novijih marinskih objekata u Crnoj Gori (*Porto Montenegro, 2013*). Set evropskih standarda za projektovanje građevinskih konstrukcija – *Eurokodovi* su nedavno usvojeni kao crnogorski nacionalni standardi sa obaveznom primjenom, tako da se odgovarajući dijelovi tih standarda koriste za proračun elemenata konstrukcije ovog rada

(CEN 2004, 2005, 2006). Za testiranje primjene savremenih materijala dragocjene informacije su pronađene u američkim standardima za projektovanje betonskih konstrukcija armirane armaturom od polimera ojačanim vlaknima (2015).

Cilj istraživanja je ovladati novim znanjima i vještinama, koje će biti konkurentne i afirmativne za uspješno učešće u inženjerskoj djelatnosti projektovanja i izgradnje maritimnih objekata.

PRIKAZ PROJEKTOVANJA I IZGRADNJE LUKOBRANA ZA ZAŠTITU OD DEJSTVA MORSKIH TALASA

Opis, namjena, tipične podjele i izbor odgovarajućeg tipa lukobrana

Lukobrani su maritimni objekti koji se grade širom svijeta kako bi zaštitili bazene, obale i druge ranjive dijelove primorskih područja. Njihova osnovna uloga je da pruže zaštitu brodova na vezovima i njihovim sidrištima od talasa, morskih struja i pokretnog leda. Pored ove glavne uloge, oni takođe pružaju bezbjedan pretovar robe sa brodova na obalu kao i manevrisanje i okretanje istih u okviru luke. Oni mogu biti upotrijebljeni i kao zaštita pristupnih kanala od primorskih nanosa ili za poravnanje plimnog ulaza. U zavisnosti od vrste lukobrana, mogu poslužiti i kao pomoć za navigaciju. Projektovanje objekta kao što je lukobran određeno je njegovom funkcijom, topografijom lokacije, uslovima životne sredine i ekonomskim aspektima.

Prema njihovom položaju u odnosu na obalu, imamo različite dispozicije lukobrana kao što su:

- lukobran spojen sa obalom;
- ostrvski lukobran;
- lukobran spojen sa obalom i ostrvski lukobran;
- dva lukobrana spojena sa obalom.

Prema značaju lukobrana u odbrambenom sistemu protiv talasa imamo:

- primarne lukobrane;
- sekundarne lukobrane.

Prema tipu poprečnog presjeka imamo:

- lukobrane od nasipa (*mound type of breakwaters*);
- vertikalne lukobrane (*vertical type of breakwaters*);
- kompozitne lukobrane (*composite type of breakwaters*);
- horizontalne kompozitne lukobrane (*horizontal composite type of breakwaters*);
- specijalne lukobrane (*non-gravity type of breakwaters*).

Izbor odgovarajućeg tipa lukobrana zavisi od uslova životne sredine, dubine vode, visine talasa, izgradnje i troškova održavanja, opreme za izgradnju, stepena obučenosti radne snage i raspoloživosti materijala. Prema (Babović, 2014, str. 224) smjernice za izbor tipa lukobrana su prikazane u Tabeli 1.

Tabela 1. Izbor tipa lukobrana (Babović, 2014, str. 224)

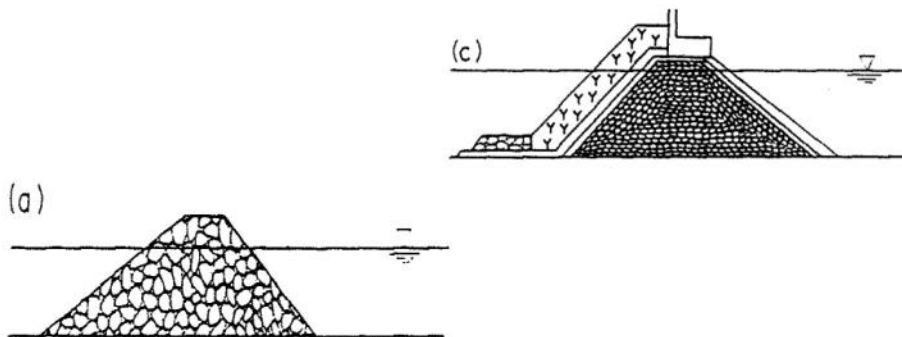
Dubina vode d (m)	Signifikantna visina talasa H_s (m)	Tip lukobrana
-	< 3	Kameni lukobran bez parapeta
< 20	> 3	Kameni lukobran sa parapetom
> 20	3–6	Vertikalni lukobran sa parapetom
> 20	> 6	Kompozitni lukobran

Lukobrani od nasipa

Poprečni presjeci, istorijski razvoj, elementi, izgradnja i održavanje lukobrana od nasipa

Glavni faktori koji određuju poprečni presjek su priroda nasipa na morskom dnu kao i visina i širina gornjeg dijela lukobrana. Dimenzije i oblik usvojenog poprečnog presjeka moraju biti adekvatni za uslove fundiranja kao i za očekivana slijeganja.

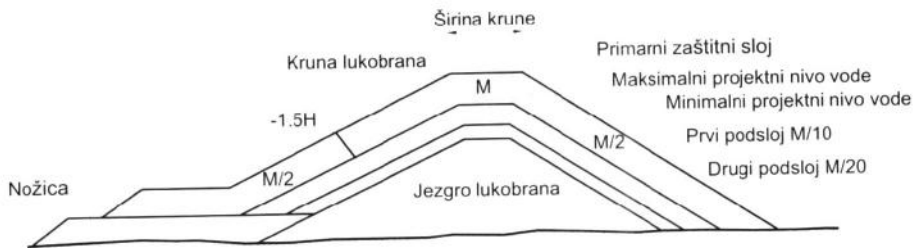
Istorijski gledano hijerarhija počinje od najjednostavnijeg lukobrana kosog tipa to jeste lukobran od nasumično postavljenog kamenja (Slika br. 1a).



Slika 1: Istorijski razvoj lukobrana od nasipa (Takahashi, 2002, str. 4)

Da bi se povećala stabilnost lukobrana i redukovala transmisija talasa, kao i da bi se smanjili troškovi, razvijen je lukobran iz više slojeva. Daljim razvojem je dobijen najčešći tip lukobrana od nasipa a to je kameni lukobran sa nadgradnjom, koja smanjuje prenos talasa a takođe može imati funkciju pristupnog puta lukobranu (Slika br. 1c).

Prilikom projektovanja jednog lukobrana od kamenog nasipa definišemo sljedeće elemente (Babović, 2014, str. 227, 228): kota i širina krune lukobrana kao i betonskog parapeta (nadgradnje); primarni zaštitni (oklopni) sloj; debljina i dužina primarnog zaštitnog sloja kao i kota dna; konstrukcija glave lukobrana; primarni zaštitni sloj na strani lučkog bazena; sekundarni zaštitni sloj i podslojevi; posteljica i nožica lukobrana kao i jezgro lukobrana.



Slika 2: Elementi lukobrana od kamenog nasipa (Babović, 2014, str. 227)

Primarni zaštitni sloj je najvažniji dio lukobrana od kamenog nasipa, jer njegovo oštećenje se prenosi na sve ostale dijelove lukobrana, kao što su urušavanje krune lukobrana i erozija donjih slojeva. Veličina kamena ovog sloja zavisi od visine talasa. Obično je to signifikantna visina talasa H_s . Za određivanje dimenzija elemenata zaštitnog sloja najviše je korišćena Hadsonova formula (SPM, 1984).

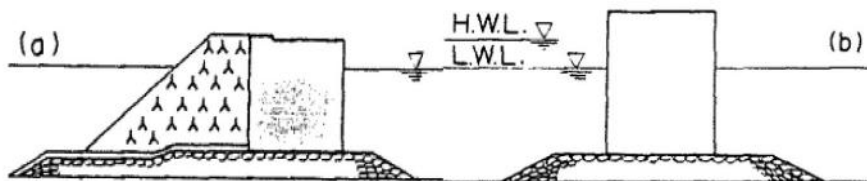
Izgradnja ove vrste lukobrana može se odvijati preko postrojenja postavljanih na kopnu ili na moru. Za plutajuća postrojenja je potrebno razmotriti klimatske uslove same lokacije, dok lukobrani koji će se graditi korištenjem postrojenja na kopnu zahtijevaju veliku širinu krune, dovoljnu za pristup i izgradnju na visini koja dozvoljava kontinuirani rad u normalnim uslovima talasa. Prvo se pristupa pripremi morskog dna nakon čega slijedi izrada nožice. Potom se jezgro i podslojevi lukobrana, uglavnom sastavljeni od kamena goreg kvaliteta od prosjeka, gradi pomoću barži koje su samoistovarne ili sa bočnim iskipavanjem. Na kraju slijedi postavljanje elemenata primarnog sloja pomoću gusjeničara sa odgovarajućim kapacitetom. Stanje lukobrana treba da bude redovno pregledano kako bi se njegovo ponašanje moglo procijeniti i kako bi se omogućilo otkrivanje oštećenja u ranim fazama. Kontrolu treba izvršiti na kraju zimskog perioda, a posebno poslije jakih oluja.

Vertikalni lukobrani

Poprečni presjeci, tipovi i potencijalna oštećenja vertikalnih lukobrana

Prethodna vrsta lukobrana je imala funkciju da razbije talase, a vertikalni lukobrani imaju funkciju da odbiju talase. Na taj način cijela energija se reflektuje nazad, tako da na lučnoj strani lukobrana nema dejstva talasa, pa se ta strana može koristiti za pristajanje brodova. Varijante vertikalnog lukobrana korišćene u prošlosti su lukobrani od betonskih blokova, ćelijski zagati i kesonski lukobrani.

Vertikalni kompozitni lukobrani se sastoje od kamenog nasipa (ili od blokova) i kesona različitih visina.



Slika 3: Vertikalni i horizontalni kompozitni lukobrani (Takahashi, 2002, str. 4–5

Većinom se grade na lokacijama gdje je raspon plime veliki zato što u slučaju izražene osjeke kompozitni lukobran će raditi kao lukobran od kamenog nasipa, dok u slučaju izražene plime će raditi kao lukobran od kesona. Takođe, ovakav lukobran obezbjeđuje zaštitu od ispiranja (Slika br. 3b).

Ako imamo prekomjerno dejstvo sile na vertikalni zid lukobrana, postoji mogućnost da će doći do preliivanja talasa pa i prevrtanja kesona. Iz toga razloga se formiraju horizontalni kompozitni lukobrani koji u stvari predstavljaju kombinaciju vertikalnog kompozitnog lukobrana i kamenog nasipa sa bočne strane (Slika br. 3a)

U projektu se moraju uzeti u obzir i sva moguća oštećenja kao što su klizanje, prevrtanje, neravnomjerno slijeganje kamenih nasipa, erozija temelja od kamenog nasipa, ispiranje morskog dna, lom i pomjiranje elemenata primarnog zaštitnog sloja.

Dejstva na vertikalne lukobrane

Osim dejstava od sopstvene težine i pritisaka tla, druga dejstva koja mogu djelovati na morske objekte su vjetar, snijeg, led, temperaturne promjene, plime, morske struje, talasi i zemljotresi. Pored ovih prirodnih pojava imamo dejstva koja se javljaju usljed operativnih aktivnosti, kao što su pristajanje plovnih vozila, vez, saobraćajna dejstva, klizanje, skladištenje i rukovanje teretom. S obzirom da se radi o maritimnim objektima, dominantno je izraženo dejstvo od talasa i seizmike.

Talasi koji djeluje na vertikalne lukobrane mogu se podijeliti na neprelamajuće, prelamajuće i prelomljene talase. Vrsta talasnog dejstva na lukobran će zavisi od dubine, nagiba morskog dna ispred lukobrana kao i od strmosti i smjera talasa. U odnosu na vrstu talasa znaćemo da li se javljaju hidrostatički, hidrodinamički pritisci ili kombinacija ovih vrsta pritisaka.

Sile usljed neprelamajućih talasa razmatraju se na vertikalnom lukobranu gdje dolazi ili ne dolazi do preliivanja vode. Kada dolazi do preliivanja talasa preko zida očekuje se da će sile biti manje nego u slučaju zida gdje ne dolazi do preliivanja, tako da je ideja da pomoću redukcionog faktora procijenimo silu koja djeluje na zid. Kod vertikalnog kompozitnog lukobrana, sila od talasa je redukovana u odnosu na slučaj gdje nemamo kameni nasip. Ovo je, naravno, posljedica toga što kameni nasip obezbjeđuje značajnu disipaciju energije, jer se radi o jednoj poroznoj konstrukciji.

Prilikom razmatranja pravca djelovanja talasa imamo talase sa otvorenog mora i sa bazenske strane. Iz tog razloga Babović (2014) predlaže da treba ana-

lizirati 4 kombinacije i to kombinaciju talasa sa grebenom (krestom) odnosno dolinom (doljom) na morskoj ili bazenskoj strani sa mirnim morem na morskoj ili bazenskoj strani. Najkritičnija kombinacija je kad je greben talasa na jednoj strani, a dolina talasa na drugoj strani. Sile neprelamajućih talasa su analizirane pomoću metoda Senflua (1928), Lundgren (1969), SPM-a (1984) i drugih. Od prethodno navedenih, najviše korišćena je metoda Senflua koja je zastupljena i u idejnom projektu ovog rada.

Kada se lukobrani grade u zonama prelamajućih talasa oni se izlažu jakim silama koje djeluju lokalno. Da bi se lukobrane osposobili da prime dejstva ovih talasa razvijene su metode dobijene na osnovu ispitivanja modela. Najprihvaćenija od metoda za analizu sila prelamajućih talasa je metoda Goda (BS 6349-1:2000, str. 110) ali prije njega treba pomenuti i metode Hiroa (1919), Bagnolda (1939), Minikina (1963) itd. Prema metodi Goda prosječni talasni pritisak, od lomljenih i od prelamajućih talasa, na konstrukcije velike dužine daje dinamičke sile preko pseudostatičkog dijagrama pritisaka. Prednost je što se na ovaj način uzimaju više sile usljed sloma talasa, ali nedostatak je što se ne uzimaju u račun talasi čiji je pravac direktan u odnosu na zid. Prema pomenutim britanskim propisima preporuka je da se maksimalna visina talasa H_{\max} uzme kao visina jedne trećine najviših talasa $H_{1/3}$ uvećana 1.8 puta i to na mjestu zapljuskujućih talasa odnosno zoni surfa. Naime, visina H_{\max} se uzima na rastojanju od $5H_{1/3}$.

Ukoliko talasi do lukobrana dopijaju kao već prelomljeni, Babović (2014) objašnjava na koji način proračunati ukupnu silu prelomljenih talasa. U tom slučaju procjena pritisaka se pojednostavljuje, odnosno, uzima se da je brzina širenja talasa konstantna na relaciji između preloma talasa i konstrukcije lukobrana. Istraživanjem Wiegela (1964), ustanovljeno je da je 78% talasa visine koja je veća od nivoa mirnog mora. Pritisak ovih talasa se sastoji od hidrostatičkih i hidrodinamičkih komponenti.

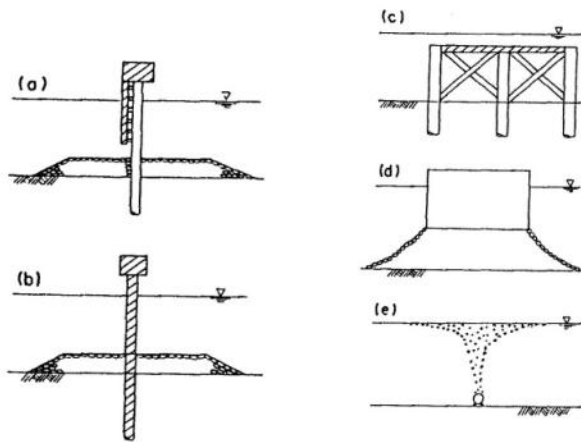
Nezavisno od metode, koja se koristi za proračun pritisaka od talasa, osnovni potrebni parametar je visina talasa. U slučaju da na posmatranoj lokaciji nema instrument za definisanje visine talasa onda se za inženjerske svrhe može koristiti lokalna kratkoročna vremenska prognoza vjetrovnih talasa. Za ovu prognozu su potrebni podaci o vjetru kao što su smjer, srednja satna brzina vjetra, trajanje vjetra i privjetrište. Prema Pršiću (2008), u sklopu prognoze koristi se SMB metoda, kojom se pomoću određenog dijagrama određuju parametri talasnog profila. Očitavanje podataka se zasniva na pronalasku zajedničke tačke srednje satne brzine vjetra sa dužinom privjetrišta ili sa trajanjem vjetra. Proračun efektivne dužine privjetrišta sprovodi se tako što se u izabranom smjeru postavi centralni zrak koji kreće od izabrane tačke u blizini luke. Dalje se rotacijom tog centralnog zraka u iznosu od 6° , u smjeru i suprotno od kazaljke na satu, postavljaju pravci kroz istu izabranu tačku. Rotacija se vrši od -42° do 42° . Sljedeći korak je određivanje dužine svakog zraka od početne tačke do prve prepreke. Nakon izračunatih dužina svakog zraka koristi se izraz za proračun efektivne dužine privjetrišta (Pršić, 2008):

$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum_i F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

gdje je brojilac suma projekcija susjednih zraka na centralni zrak, a imenilac suma kosinusa uglova.

Specijalni tipovi lukobrana

Posebne vrste lukobrana postoje još od antičkog doba i imaju specijalne karakteristike upotrebe. Uobičajeni lukobrani ovog tipa su zastorni zidni, horizontalni panelni, plutajući ili pneumatski tipovi lukobrana (Takahashi, 2002, str. 6).



Slika 4: Specijalni tipovi lukobrana (Takahashi, 2002, str. 6)

IDEJNI PROJEKAT VERTIKALNOG LUKOBRANA U LUCI BAR

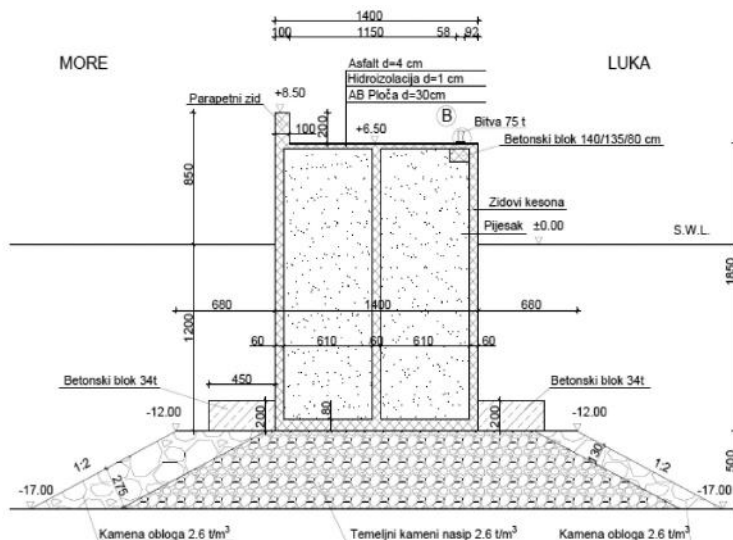
Opis lokacije i konstruktivni sistem

Predmetna lokacija vertikalnog lukobrana je u luci Bar, koja se nalazi na jugoistočnom dijelu Jadrana. Karakteristična klima navedene lokacije je mediteranska. Najznačajniji i vjetrovi najjačeg inteziteta su bura i jugo. Bura obično stvara niske i kratke talase do 2.5 m dok jugo obično uzrokuje talase do 6 m. Najznačajnije geološke tvorevine su flišni sedimenti, krečnjaci, pjeskovi i šljunkovi, dok u pogledu seizmoloških karakteristika treba naglasiti da seizmogene zone Skadra, sa jedne, i Petrovca, Budve i Kotora sa druge strane, mogu izazvati zemljotrese sa magnitudama do 7 stepeni Rihterove skale.

Za vertikalni lukobran su razmatrana dva varijantna rješenja – kesonski lukobran i lukobran od blokova. Dužina lukobrana je 201.6 m.

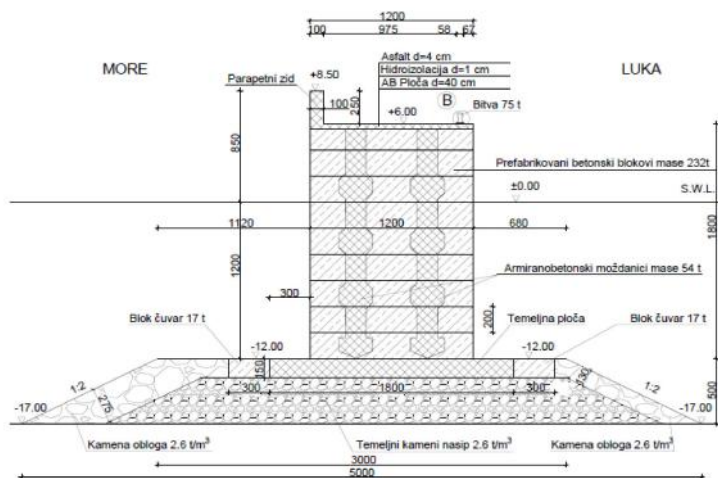
Prvo varijantno rješenje, kesonski lukobran, jeste širine 14 m a sastoji se od temeljnog nasipa debljine 5 m, kesonskih segmenata ukupne visine 18.45 m i nad-

gradnje visine 2 m. Temeljni nasip se sastoji od jezgra i kamene obloge. Kamena obloga na morskoj strani lukobrana se sastoji od kamenog bloka minimalne mase 2.6 t/m^3 odnosno 7 t/m^2 dok je masa kamena jezgra, kao i masa kamena obloge na lučnoj strani lukobrana 0.7 t/m^2 . Pored kamene obloge radi dodatnog obezbjeđenja kesona postavljeni su sa bočnih strana kesona i blokovi mase 34 t. Svaki montažni segment se sastoji od 4 komore koje su ispunjene pijeskom i uokvirene spoljašnjim i unutrašnjim zidovima. Spojevi koji povezuju segmente su ispunjeni betonom cijelom visinom segmenta. Komore kesona su sa donje strane kesona zatvorene pločom veće debljine u odnosu na ploču sa vrha kesona. Cjelokupnom površinom gornje ploče kesona se rasprostire hidroizolacija i asfalt. Za obezbjeđenje sigurnosti brodova projektovana je bitva nosivosti 75 tona.



Slika 5. Prvo varijantno rješenje lukobrana

Drugo varijantno rješenje je masivna konstrukcija, odnosno, lukobran od betonskih blokova čija je kruna širine 12 m. Sastoji se od temeljnog nasipa debljine 5 m, prefabrikovanih betonskih blokova u visini od 17.95 m i parapetnog zida visine 2.5 m. Temeljni nasip se, kao i kod kesonskog lukobrana, sastoji od jezgra i kamene obloge. Minimalna masa kamena obloge na morskoj strani je 2.6 t/m^3 odnosno 7 t/m^2 , a jezgra i kamene obloge na lučnoj strani lukobrana 0.7 t/m^2 . Između betonskih blokova i temeljnog nasipa je AB ploča koja je utvrđena blokovima čuvarima mase 17 tona. Prefabrikovani betonski blokovi mase 232 tone se slažu horizontalno i povezuju se armiranobetonskim moždanicima mase 54 tone. Moždanici i blokovi se povezuju AB pločom iznad koje se postavljaju slojevi hidroizolacije i asfalta kao i bitve nosivosti od 75 tona.



Slika 6. Drugo varijantno rješenje lukobrana

Poređenjem ova dva prototipa lukobrana zaključuje se da je za kesonski lukobran potrebna manja količina betona i manje vremena za izgradnju. Mana prvog varijantnog rješenja je veća širina krune koja je potrebna za obezbjeđenje povoljnijih napona u tlu i adekvatne stabilnosti lukobrana na prevrtanje. Sa druge strane, mana drugog varijantnog rješenja, kao masivne konstrukcije, jesu veći pritisci koji se javljaju u temeljnom nasipu ispod konstrukcije. Pored prednosti u vidu manje širine krune, lukobran od betonskih blokova ima uštedu na potrebnoj armaturi, a samim tim i manju opasnost od korozije ukoliko se koristi čelična armatura.

U skladu sa prethodno navedenim i očigledne uštede na vremenu i betonu izabran je kesonski lukobran kao optimalno rješenje ali sa posebnim akcentom na testiranje upotrebe savremenih materijala otpornih na koroziju.

Tehnologija izvođenja i tehnički uslovi za sastav betonske mješavine

Tehnologija izgradnje

Izgradnja kesonskog lukobrana na temeljnom nasipu se odvija kroz više faza. Prije početne faze izgradnje potrebno je provjeriti vremensku prognozu, odnosno, provjeriti da li ima dovoljno mirnih perioda kako bi se izgradnja odvijala što brže.

Prva faza je izgradnja temeljnog nasipa na morskom dnu. Kamen temeljnog nasipa se dovozi iz obližnjeg kamenoloma do obale. Dalje se pomoću plutajućih platformi, koje tegljači odvlače na mjesto ugradnje, kamen spušta na pripremljeno morsko dno. Prvo se sipa kamen jezgra temeljnog nasipa. Smjer nasipanja kamena je od korijena prema glavi lukobrana. S obzirom da jezgro temeljnog nasipa, zbog oštećenja od valova ne može dugo stajati nezaštićeno, pristupa se izradi kamene obloge na morskoj i lučnoj strani lukobrana. Kamena obloga se ugrađuje plovnom dizalicom tako da se prati izgradnja jezgra u zaostatku od cca 40 m. Krana

temelnog nasipa se pažljivo izravna slojem sitnog kamenog materijala. Postupak izravnjanja se odvija tako što se postave dva paralelna čelična profila koji su na razmaku od 14 m. Između tih profila se presipa sloj debljine 0.5 m. Zatim dva ronioca pomoću trećeg teškog čeličnog profila vrše poravnanje tako što treći profil kliže poprečno preko dva profila koja su ranije postavljena. Na taj način se dobije uredna posteljica kojom se osigurava ravnomjeran ležaj za postavljanje kesona. Nakon završetka krune potrebno je obezbijediti, ukoliko vrijeme dozvoljava, da se odradi slijeganje temeljnog nasipa i tla morskog dna.

Druga faza je postavljanje montažnih segmenata kesona kojih ima ukupno 15. Svaki segment kesona se sa kopna pomoću dizalice spušta u vodu. Dalje se segment vezuje kablovima za plutajuću platformu i plutajući dovodi do odgovarajuće pozicije. Za vuču i pozicioniranje, predviđene su odgovarajuće tačke u konstrukciji gdje se sidre kablovi. Nakon dolaska segmenta na projektovani položaj slijedi njegovo spuštanje na morsko dno. Potapanje kesona se vrši punjenjem pijeska u unutrašnji prazan prostor, odnosno, komore. Položaj kesona se kontroliše geodetskim instrumentima, a i dodatno ga provjeravaju roniaci. Praznine između segmenata kesona se popunjavaju slojem betona debljine 10 cm kako bi se spriječilo kretanje vode, ispiranje posteljice i temeljnog nasipa. Prvo se na krajevima zazora, prema morskoj i lučnoj strani lukobrana, postavljaju takozvane Proserve čarape za fuge koje su napravljene od veoma fleksibilnog materijala. Usvojene čarape su na osnom razmaku od 13 m. One se spuštaju na dno, gdje se fiksiraju dok se na vrhu vješaju. Mješavinom betona se kontrolisano pune čarape tako da čarape nijesu pod pritiskom i da je rizik iscurivanja betona u okolinu minimalan.

Treća faza se odnosi na betoniranje ploče na vrhu kesona koja se izvodi po završetku radova na povezivanju kesona. Prvo se postavi oplata, nakon toga armatura i zaliye se betonom. Zatim se na licu mjesta izvodi i parapetni zid na morskoj strani lukobrana.

Četvrta faza je postavljanje hidroizolacije i asfaltnog sloja. Nakon toga slijedi sidrenje bitvi za vez nosivosti 75 tona koje se postavljaju na razmaku od 13.4 m. Vršu se obilježavanje saobraćajnih traka za promet servisnih vozila. Nakon toga slijedi eksploatacija kesonskog lukobrana.

Tehnički uslovi za sastav betonske mješavine

Beton je heterogen materijal koji se sastoji od agregata (drobljena stijena, šljunak, pijesak), cementa, vode i aditiva. S obzirom da se radi o betoniranju u morskoj sredini, mehaničke karakteristike potrebnog betona se razlikuju u odnosu na betoniranje na kopnu. Prema (*Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton u objektima izloženim agresivnom dejstvu sredine*, 1992, str. 10) osnovne zaštitne mjere, koje se primjenjuju radi povećanja postojanosti betona u agresivnim sredinama, su: posebne vrste cementa, odgovarajući sastav mineralnog agregata, hemijski dodaci za beton, smanjenje vrijednosti v/s , zgušnjavanje svježeg betona i postizanje tražene vodonepropustljivosti betona.

Sa visokom alkalnošću u cementu manja je vjerovatnoća pojave korozije. Iz tog razloga se za morsku sredinu preporučuju sulfatno otporni cement kao što

je sulfatno otporni portland cement i portland cement sa dodatkom zgre. Prema evropskim propisima preporučena minimalna količina cementa je 320 kg/m^3 za klasu izloženosti XS2, dok je maksimalni odnos vode i cementa 0.45. Radi postizanja odgovarajućeg kvaliteta betona agregat mora biti tvrd, stalnog volumena i bez primjesa. Šahinagić Isović (2012) smatra da je za hidrotehnički beton maksimalno zrno 125 mm, a najviše treba da bude zastupljeno 6 frakcija. Hemijski dodaci betonu u agresivnim sredinama se biraju tako da ne uzrokuju koroziju armature i da ne dolazi do redukcije čvrstoće betona. Pored plastifikatora i beshlornih ubrzivača, aeranti su naročito korisni kod betona izloženim agresivnim uticajima i mrazu jer u stvorenim mjehurićima vazduha, ukoliko dođe do smrzavanja betona, led može nesmetano da se širi pa se tako eliminišu unutrašnji naponi koji dovode do destrukcije betona.

Uvažavanjem prethodno navedenih mjera, a u skladu sa evropskim propisima, predloženi sastav betonske mješavine za dobijanje indikativne čvrstoće betona C35/45 je prikazan u sljedećoj tabeli.

Komponenta betona	Vrsta	Količina
Cement	Sulfatno otporni portland cement klase P 42.5	370 kg/m^3
Agregat	Rječni četvorofrakcijski agregat, D = 31.5 mm	1887 kg/m^3
Voda	Obična voda	148 kg/m^3
Aditivi	Plastifikatori, ubrzivači (bezhlorni) i aeranti	2 % od mase cementa (plastifikatori)

Tabela 2: Predloženi sastav betonske mješavine

Proračun konstrukcije

Analiza konstrukcije je izvršena za stalna i promjenljiva dejstva, dejstva od vezanih plovila, propelera, udara plovila, temperature, seizmike i dejstva od talasa. Proračun prethodno navedenih dejstava je odrađen u skladu sa britanskim i evropskim standardima. S obzirom da je proračun većine dejstava poznat, u ovom radu je dat akcenat na dejstva od vezanih plovila i talasa.

Dejstva od vezanih plovila i talasa

a) Dejstvo od vezanih plovila

Dejstvo od vezanih plovila koje se prenosi na lukobran posljedica je dejstva dominantnih pravaca vjetrova. Prema podacima iz Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju dva najučestalija smjera vjetra su zapadni (pulenat) i sjeveroistočni (bura). Pored dejstva vjetra razmatra se i dejstvo morskih struja. Za proračun ovih sila usvojeno je plovilo dužine 90 m. Užad su orijentisana pod uglom od 45° u horizontalnoj ravni i 25° u vertikalnoj ravni, u odnosu na pravac lukobrana.

Dejstvo na lukobran usljed dejstva vjetra je obradjeno u skladu sa britanskim propisima (BS 6349-1, 2000) i proračunava se preko formule:

$$F_t = C_t \rho_A A V^2 10^{-4}, \text{ gdje su usvojene sljedeće vrijednosti:}$$

$$A = 1800 \text{ m}^2 - \text{projektovana podužna površina plovila,}$$

$$\rho_A = 1.2 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina vazduha,}$$

$$V = 23 \text{ m/s} - \text{brzina vjetra na visini od 10 m za lokaciju Bar,}$$

$$C_{t, \text{aft}} = 2.5 - \text{transverzalni koeficijent za silu vjetra na zadnjem dijelu plovila,}$$

$$C_{t, \text{forward}} = 2.0 - \text{transverzalni koeficijent za silu vjetra na prednjem dijelu plovila.}$$

Nakon unesenih vrijednosti dobijene su sile $F_{t, \text{aft}} = 285.66 \text{ kN}$ i $F_{t, \text{forward}} = 228.53 \text{ kN}$. Pored dejstva vjetra javlja se i manji uticaj morskih struja koje se proračunavaju prema formuli:

$$F_t = C_t C_c \rho L_{BP} d_m V^2 10^{-4}, \text{ gdje su usvojene sljedeće vrijednosti:}$$

$$L_{BP} = 90 \text{ m} - \text{dužina plovila,}$$

$$d_m = 4 \text{ m} - \text{gaz plovila,}$$

$$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina morske vode,}$$

$$V = 0.7 \text{ č/h} = 0.36 \text{ m/s} - \text{brzina morske struje na istočnom dijelu Jadrana,}$$

$$C_t = 1.3 - \text{koeficijent sile otpora struje,}$$

$$C_c = 1.3 - \text{faktor korekcije dubine za sile otpora struje.}$$

Unošenjem navedenih parametara dobijaju se sile $F_{t, \text{aft}} = 8.08 \text{ kN}$ i $F_{t, \text{forward}} = 8.08 \text{ kN}$.

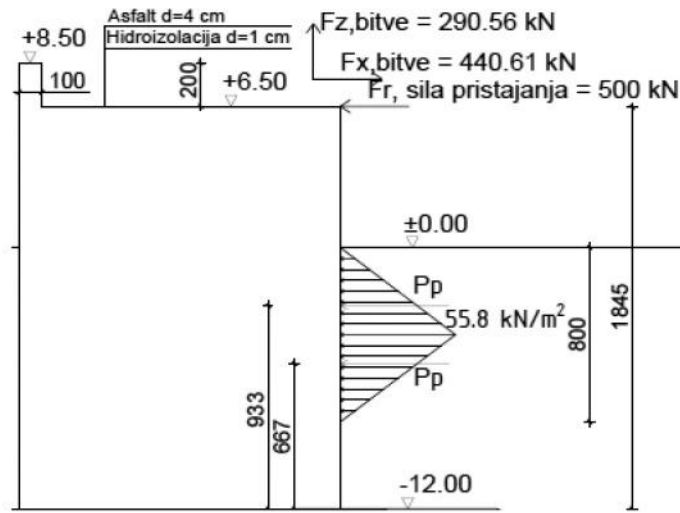
Sabiranjem sila, usljed dejstva vjetra i morskih struja na plovilo, dobija se ukupna sila koju bitva treba da podnese. U pitanju je sila $F_{t, \text{aft}} = 293.74 \text{ kN}$ odnosno $F_{t, \text{forward}} = 236.61 \text{ kN}$.

Sa užadima orijentiranim pod uglom od 45° u odnosu na ravan pristaništa i uzimajući u obzir dinamički koeficijent usljed talasnog kretanja od 1.5 dejstvo na bitvu (u horizontalnoj ravni) iznosi:

$$H_{t, \text{aft}} = 1.5 \cdot F_{t, \text{aft}} / \cos 45^\circ = 623.12 \text{ kN}$$

Sa užetom orijentisanim, u vertikalnoj ravni, od 25° dejstvo na bitvu Q iznosi: $Q = H_{t, \text{aft}} / \cos 25^\circ = 687.53 \text{ kN} = 68.75 \text{ t}$ što znači da je potrebna nosivost bitve cca 69 tona. Usvojena je bitva nosivosti 75 tona.

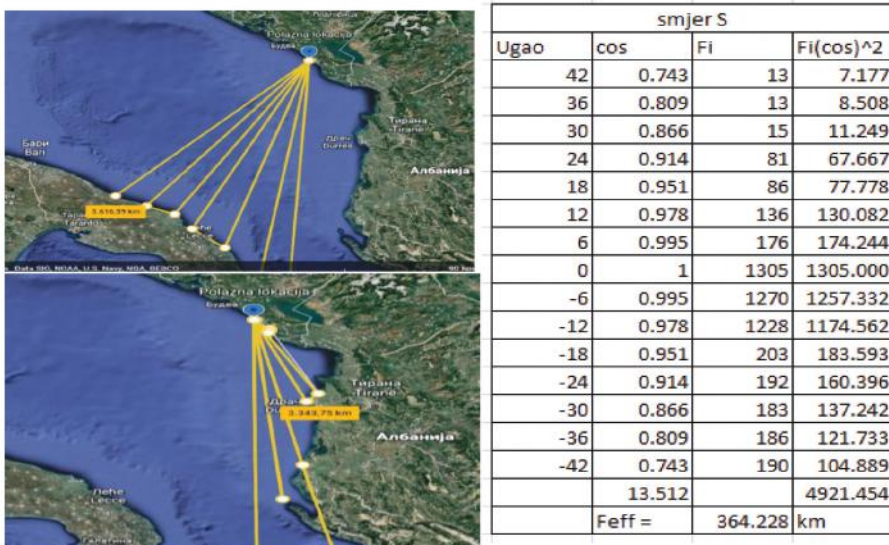
Horizontalna i vertikalna komponenta sile Q su prikazane na narednoj slici, a osim njih predstavljena su i dejstva propelera kao i udara plovila.



Slika 7. Prikaz dejstava usljed djelovanja propelera, vezivanja i udara plovila

b) Dejstvo od talasa

Prije definisanja dejstva od talasa definisana je visina talasa koja je najvažniji parametar za proračun. S obzirom da na prostoru luke Bar, u trenutku izrade ovog rada, nije postojao instrument za mjerenje visine talasa, za dobijanje visine talasa je korišćena lokalna kratkoročna vremenska prognoza koja koristi podatke o vjetru i efektivnu dužinu privjetrišta.



Slika 8. Skica i proračun efektivne dužine privjetrišta za centralni smjer S

Najveća efektivna dužina privjetrišta od 364.228 km je za centralni smjer S, a dobijena je postupkom postavljanja centralnog zraka kroz analizirani smjer i njegovom rotacijom od -42° do $+42^\circ$ (Slika br. 8).

Za ovu dužinu privjetrišta i maksimalnu srednju satnu brzinu od 15 m/s značajna visina dolazećeg talasa je $H_s = 4.3$ m. Visina je dobijena pomoću dijagrama (Pršić, 2008, str. 32). Dalje je prema poznatoj zavisnosti maksimalna visina talasa jednaka $H_{\max} = 1.8 H_s = 1.8 \cdot 4.3 = 7.7$ m.

Ako se projektuje lukobran na maksimalnu visinu talasa H_{\max} obezbijedena je potpuna sigurnost objekta. Međutim, vjerovatnoća pojave maksimalne visine talasa je mala, a pored toga mala je i vjerovatnoća kombinacije maksimalne visine talasa i privezanog plovila. Iz tog razloga, da bi bili na strani racionalnosti, projektuje se lukobran na srednju vrijednost maksimalne i značajne visine talasa odnosno:

$$H_{\text{proj}} = \frac{H_s + H_{\max}}{2} = \frac{4.3 + 7.7}{2} = 6 \text{ m.}$$

Talasa dužina prema istraživanjima na Jadranu (Zorović, R. Mohović i Đ. Mohović, 2003, str. 149) je: $L = 16.78 H^{0.71} = 16.78 \cdot 6^{0.71} = 59.88$ m.

Za određivanje pritisaka od talasa, pored projektovane visine talasa, potrebno je provjeriti lom talasa ispred lukobrana koji je uslov za odabir metode po kojoj će se izvršiti proračun. Inženjerski uslov (Pršić, 2008, str. 17) da ispred zida ne dođe do loma talasa glasi:

$$d \geq 2.5 \cdot H_{\text{dol}} \rightarrow 17 \geq 2.5 \cdot 6 \rightarrow 17 \text{ m} \geq 15 \text{ m}$$

Pored njega, drugi uslov da ne dolazi do loma talasa je: $d / L_0 > 0.20 \rightarrow 17 / 59.88 = 0.28 > 0.20$.

S obzirom da su oba uslova zadovoljena proračun pritisaka se može sprovesti po metodi Senflua.

Za dubinu lukobrana $d = 17$ m i dubinu temeljnog nasipa $h_s = 12$ m vertikalno pomjeranje, prema metodi Senflua, iznosi:

$$\delta_0 = \frac{\pi H_{\text{proj}}^2}{L} \coth \frac{2\pi h_s}{L} \rightarrow \delta_0 = \frac{\pi 6^2}{59.88} \coth \frac{2\pi 12}{59.88} = 2.21 \text{ m}$$

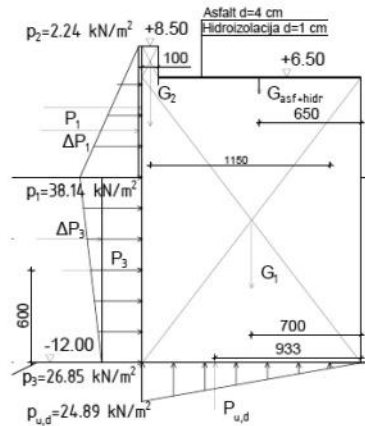
A maksimalni porast vode usljed djelovanja talasa je: $\eta_{\max} = H_{\text{proj}} + \delta_0 = 6.0 + 2.21 = 8.21$ m što znači da se usvaja kruna sa parapetom na visini od 8.5 m iznad mirnog nivoa mora.

Poznavajući proračun hidrostastičkog pritiska od vode, u nastavku slijedi proračun i prikaz sila od hidrodinamičkog dejstva talasa prema istoj metodi.

$$\text{Pritisak na zid } p_1 = (p_2 + \gamma_w h_s) \frac{H_{\text{proj}} + \delta_0}{H_{\text{proj}} + h_s + \delta_0}$$

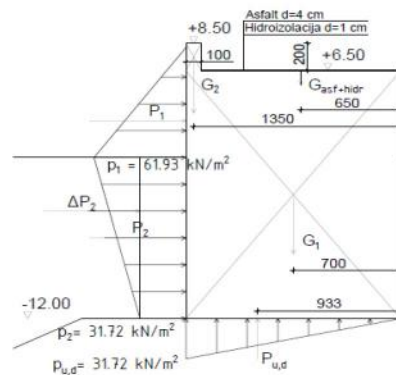
$$\text{gdje je } p_2 = \frac{\gamma_w H_{\text{proj}}}{\cosh(2\pi h_s / L)} = \frac{10.06 \cdot 6}{\cosh(2\pi 12 / 59.88)} = 31.72 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{pa je } p_1 = (31.72 + 10.06 \cdot 12) \frac{8.21}{8.21 + 12} = 61.93 \text{ kN/m}^2$$



Slika 9. Dijagram hidrodinamičkih pritisaka prema metodi Senflua

Bez obzira što je za razmatranu dubinu optimalna metoda Senflua, prikazane su dobijene vrijednosti pritisaka po metodi Goda (Slika br.10), a sve to u cilju ukazivanja adekvatnosti korišćenja pristupa u zavisnosti od ulaznih podataka. Nakon odrađenog poređenja može se zaključiti da se prema metodi Senflua dobijaju veći pritisci što je vjerovatno posljedica toga što je metoda Senflua starija i konzervativnija. Za visinu talasa od 6 m lukobran je projektovan tako da nema preliivanja prema metodi Senflua dok je prema metodi Goda potreban parapet veće visine kako bi se spriječilo preliivanje.



Slika 10. Dijagram hidrodinamičkih pritisaka prema metodi Goda

Kontrola stabilnosti lukobrana od kesona i provjera naprezanja u tlu**a) Kontrola stabilnost lukobrana na prevrtanje i klizanje**

Za granično stanje statičke ravnoteže konstrukcije treba da bude zadovoljena sljedeća nejednačina:

$$E_{d,destab} \leq E_{d,stab}, \text{ gdje je:}$$

$E_{d,destab}$ – proračunska vrijednost uticaja od destabilizujućih dejstava sa usvojenim parcijalnim koeficijentima sigurnosti od 1.35 za stalna i 1.5 za promjenljiva dejstva.

$E_{d,stab}$ – proračunska vrijednost uticaja od stabilizujućih dejstava.

Rezultati kontrole stabilnosti lukobrana na prevrtanje i klizanje za različite proračunske situacije su prikazani u sljedećoj tabeli.

Tabela 3. Kontrole stabilnosti lukobrana na prevrtanje i klizanje

	Stabilnost na prevrtanje		Stabilnost na klizanje	
	$E_{d,destab}$ [kNm]	$E_{d,stab}$ [kNm]	$E_{d,destab}$ [kN]	$E_{d,stab}$ [kN]
Pritisak od talasa na morskoj strani lukobrana po metodi Senflua	30300.4	36569.2	1224.2	1633.3
Pritisak od talasa na morskoj strani lukobrana po metodi Goda	26644.2	36569.2	892.8	1657.2
Kombinacija dinamičkih pritisaka od lučnih talasa, uzgona, dejstva propelera i sila od pristajanja plovila	33460.4	35933.6	1194.7	1743.6
Kombinacija dinamičkih pritisaka od povratnih talasa na morskoj strani, uzgona, dejstva propelera i sila od pristajanja plovila	34331.6	35933.6	1702.2	1855.4
Seizmička proračunska situacija	34046.7	35933.6	1470.2	1744.4

b) Provjera naprezanja u tlu

Za najkritičniju kombinaciju opterećenja bez seizmike provjera naprezanja je izvršena ručno. Naprezanja nasipa na temeljnim ivicama iznose:

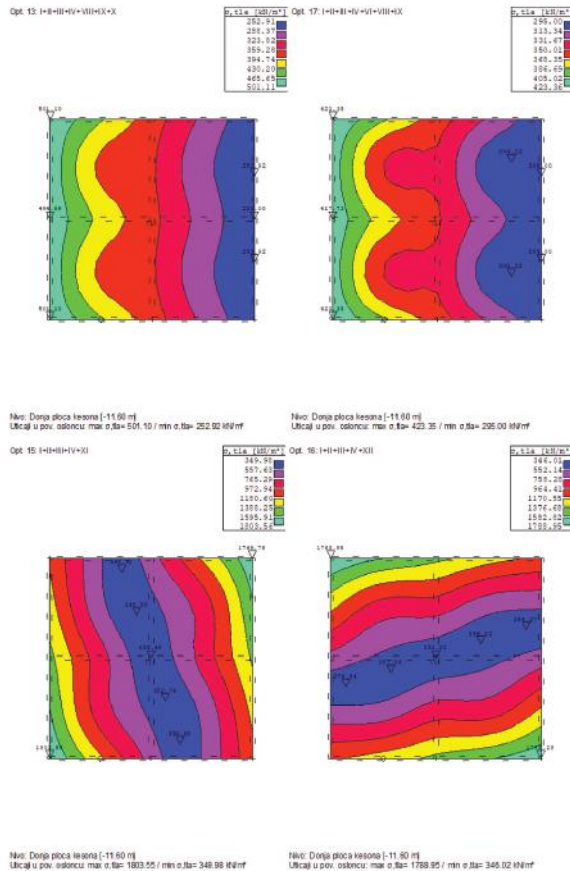
$$\sigma_{1,2} = \frac{R_V}{A} \pm \frac{M_C}{W} = \frac{\sum V}{A} \pm \frac{M_C}{W} = \frac{3266.65}{14} \pm \frac{7676.63}{32.67} = 233.33 \pm 234.97 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 = 468.30 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{\text{doz}} = 2000 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_2 = -1.64 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{\text{doz}} = 2000 \text{ kN/m}^2$$

što znači da je provjera naprezanja u tlu zadovoljena.

Iako je napon napon zatezanja, njegova veličina je mala tako da će biti zanemarena. Provjere naprezanja u tlu za ostale kombinacije opterećenja su izvršene u programskom paketu Tower i prikazane na narednoj slici.

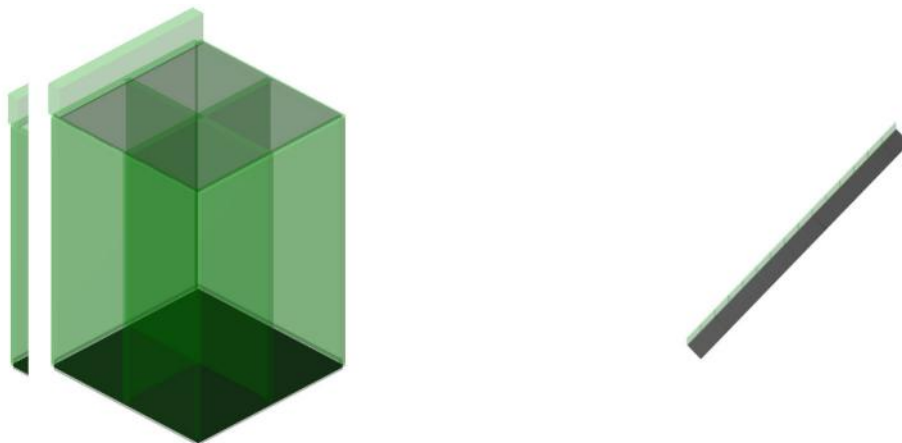


Slika 11. Provjera naprezanja u tlu preko programskog paketa Tower

Proračunski model konstrukcije

Modeli lukobrana za analizu i dimenzionisanje konstrukcije napravljeni su u programskom paketu Tower 7. Izvršeno je modeliranje konstrukcije za fazu montaže i fazu eksploatacije. Za fazu montaže obuhvaćena su sljedeća dejstva: sopstvena težina, dodatno stalno dejstvo (pijesak, asfalt, hidroizolacija, težina bitvi), hidrostatički i hidrodinamički pritisak. Za fazu eksploatacije pored prethodno navedenih opterećenja obuhvaćena su dejstva kao što su saobraćajna dejstva (pokretno i ravnomjerno raspoređeno opterećenje), dejstva od vezivanja plovila, udar plovila, dejstvo propelera, temperatura i seizmička dejstva.

Ploče i zidovi su modelirani površinskim elementima odgovarajućih poprečnih presjeka. Tlo je usvojeno kao tlo tipa B. Model jednog segmentnog kesona za fazu montaže i eksploatacije je prikazan na slici (Slika br. 12, lijevo). Gornja ploča kesona leži na pijesku – elastičnom medijumu pa se iz tog razloga ona modelira zasebno i to kao površinski element na površinskom osloncu koji ima odgovarajuću krutost (Slika br. 12, desno)



Slika 12. Model segmentnog kesona za fazu montaže i eksploatacije (lijevo) i model gornje ploče kesona za fazu eksploatacije (desno)

Seizmički proračun je u navedenom programskom paketu odrađen u skladu sa evropskim propisima (EN1998-1:2004). Kao ulazni podaci za seizmički proračun korišćeni su rezultati iz modalne analize, odnosno, svojstvene vrijednosti i oblici oscilovanja konstrukcije.

U cilju dobijanja povoljnog seizmičkog odgovora konstrukcije, ista se može projektovati tako da posjeduje ili veliku nosivost ili manju nosivost, a odgovarajuću duktilnost. U ovom slučaju kesonski lukobran je projektovan sa faktorom ponašanja 1 odnosno konstrukcija za vrijeme zemljotresa ostaje u elastičnom domenu.

Razmatrane kombinacije komponenti zemljotresnog opterećenja su $1.0 S_x + 0.3 S_y + 0.3 S_z$ i $1.0 S_y + 0.3 S_x + 0.3 S_z$.

Dimenzionisanje

Dimenzionisanjem pomoću klasične čelične armature je dokazano granično stanje nosivosti i upotrebljivosti pri čemu je usvojena odgovarajuća armatura. Procenat armiranja podužnom armaturom je od 0.0038 do 0.008 za gornju, odnosno, donju ploču kesona, a za zidove je bio potreban minimalni procenat armiranja što je i očekivano. Koeficijent armature za smicanje donje ploče kesona je 0.006, a za zidove kesona 0.0068.

S obzirom da se objekat nalazi u agresivnoj sredini, kao što je morska, definisana je klasa izloženosti XS2, XS3 i maksimalna vrijednost prslina $w_{k,max} = 0.3$ mm (MEST EN 1992-1-1/NA:2017, str. 138). Kontrola graničnog stanja prslina je izvršena za dva mjerodavna presjeka u donjoj ploči i jedan mjerodavni presjek u zidu kesona. Minimalna količina vertikalne armature na stranama zida nije bila dovoljna za kontrolu prslina pa je iz tog razloga na mjestu mjerodavnog naprezanja povećana armatura sa R ϕ 14/20 na R ϕ 14/7.5.

Usvojena količina ankera bitve (4R ϕ 42) zadovoljava kontrole nosivosti na zatezanje, smicanje kao i interakciju smicanja i zatezanja (prema MEST EN 1993-1-8/NA:2018).

Dimenzionisanje pomoću klasične čelične armature je izvršeno u skladu sa *Eurokodovima* dok je dimenzionisanje pomoću armature od polimera ojačane staklenim vlaknima izvršeno prema američkim propisima (ACI 440.1R-15, 2015).

Uporedna analiza čelične armature i armature od polimera ojačane staklenim vlaknima (GFRP)

U novijoj istoriji alternativa čeličnoj armaturi su kompozitni materijali odnosno polimeri ojačani vlaknima (FRP). U agresivnim sredinama glavna prednost u odnosu na čelik je odsustvo korozije. Osim toga posjeduju veliku čvrstoću na zatezanje, ali samo u pravcu ojačavajućih vlakana. Mana kompozitnih materijala je što se elastično ponašaju do tačke loma odnosno ne posjeduju duktilnost. Posljedica anizotropnosti FRP je niska smičuća otpornost FRP armature. Koeficijent termičkog širenja FRP armature je manji nego kod betona.

Polimeri ojačanih staklenim vlaknima (GFRP) u odnosu na čelik imaju više nego dvostruku veću zateznu čvrstoću. Pored toga, imaju visoku otpornost na visoke temperature. Međutim, GFRP materijali imaju nižu čvrstoću na savijanje i niži modul elastičnosti. Čelična armatura može podnijeti veći nivo elastičnih deformacija prije nego dođe do tečenja dok GFRP armatura može podnijeti veće sile zatezanja. Ove razlike ukazuju da beton armiran polimerom ojačanim staklenim vlaknima treba projektovati na lom po betonu dok beton armiran klasičnom armaturom treba projektovati na lom po armaturi. Mehaničke karakteristike armature od polimera ojačanih staklenim vlaknima (GFRP) koje su korišćene u idejnom projektu ovog rada su:

$$f_{tu} = 1200 \text{ MPa}$$

$$E_f = 50 \text{ GPa}$$

A mehaničke karakteristike čelične armature B500B su:

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 500 / 1.15 = 434.78 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

U cilju utvrđivanja ekonomske isplativosti čelične i FRP armature izvršeno je poređenje količine armature i novca koji je potreban za jedan segment kesona. S obzirom na aktuelna dešavanja u svijetu, virus Covid 19 i rat između Rusije i Ukrajine, došlo je do drastičnih povećanja kako cijena materijala, tako i izgradnje objekata. Samim tim, ekonomsko poređenje čelične i FRP armature zasnovano je na cijenama, koje su podložne čestim promjenama.

Tabela 4. Uporedna analiza ekonomske isplativosti upotrebe čelične i GFRP armature

Cijena segmenta kesona dimenzionisan pomoću čelične armature B500B	Cijena segmenta kesona dimenzionisan pomoću GFRP armature	Razlika u cijeni (€)
109 147	125 034	15 887

ZAKLJUČCI

Sumiranjem rezultata dobijenim tokom istraživanja teme ovog master rada donose se sljedeći zaključci:

- Obradom raspoložive literature, zaključuje se da je odabir kompozitnih lukobrana kao varijantnih rješenja dobar izbor jer se smanjuje širina tijela lukobrana, povećava korisni prostor na morskom dnu, smanjeno je održavanje lukobrana, izgradnja je dosta brža i ima manji stepen greške.
- Sprovedenom analizom prednosti i mana dva prototipa lukobrana na konkretnoj lokaciji omogućen je izbor optimalne varijante konstrukcije. Izabran je kesonski lukobran za koji je, u odnosu na lukobran od betonskih blokova, potrebno manje vremena za izgradnju kao i manja količina betona.
- Poređenjem metoda, Senflua i Goda, za proračun pritisaka od talasa, dobijaju se veći pritisci prema starijoj i konzervativnijoj metodi odnosno metodi Senflua. Takođe, za projektovanu visinu talasa od 6 m, prema proračunu pritisaka po Senfluu nema preliivanja talasa dok prema metodi Goda je potreban parapet veće visine kako bi se spriječilo preliivanje.
- Analizom mehaničke i ekonomske isplativosti čelične i GFRP armature zaključuje se da su glavne prednosti tradicionalne armature duktilnost i niža cijena materijala. Sa druge strane, kompozitni materijali imaju izrazitu prednost u agresivnim sredina kao što je morska jer imaju otpornost na koroziju koja je veoma bitna za trajnost maritimnih objekata.
- Iako je maksimalna širina prsline $w_{k,max}$ uzeta kao 0.3 mm predlaže se smanjenje vrijednosti $w_{k,max}$ jer se objekat radi u morskoj sredini.
- Pravac daljih istraživanja može ići u smjeru valorizacije energije talasa, odnosno, pretvaranja energije talasa u električnu energiju pomoću osilatornog vodenog stuba. Koncept zavisi od obezbjeđivanja adekvatnih dimenzija komore šupljeg kesona i podešavanja sistema, jer oscilacije najviše zavise od same frekvencije talasa.

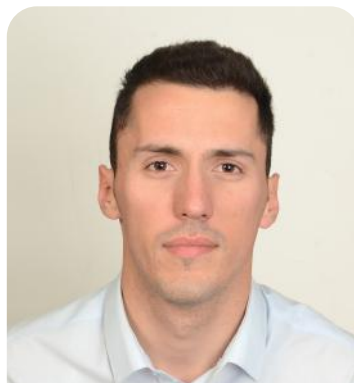
LITERATURA

- ACI 440.1R-15 (2015) – *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber – Reinforced Polymer (FRP) Bars*. USA: American Concrete Institute.
- Babović, A. (2014). *Luke i pristaništa*. Beograd: Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet.
- BS 6349-1: British standard (2000): *Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria*.
- CERC, USACE. (1984): *Shore Protection Manual (SPM)*. Vicksburg, Miss
- EN 1998-1: Eurocode 8 (2004): *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: CEN.
- MEST EN 1992-1-1/NA: Eurokod 2 (2017): *Projektovanje betonskih konstrukcija – Dio 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade – Nacionalni aneks*. Podgorica: Institut za standardizaciju Crne Gore.
- MEST EN 1993-1-8/NA: Eurokod 3 (2018): *Proračun čeličnih konstrukcija – Dio 1-8: Projektovanje veza*. Podgorica: Institut za standardizaciju Crne Gore.
- Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton u objektima izloženi agresivnom dejstvu sredine* (1992).
- Pršić, M. (2008). *Vodnogospodarske građevine*. Zagreb: Tehničko Veleučilište Zagreb.
- Šahinagić – Isović, M. i Ćećez, M. (2012). *Posebne vrste betona. Izvođenje betonskih radova u ekstremnim klimatskim uslovima*.
- Takahashi, S. (2002). *Design of vertical breakwaters*. Japan: Port and airport research institute.
- Zorović, D., Mohović, R., & Mohović, Đ. (2003). Prilog određivanju duljine vjetrovnih valova na Jadranu. *Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 50(3-4), 145-150.

Marko BOŽOVIĆ**DESIGN AND CONSTRUCTION OF BREAKWATERS FOR PROTECTION THE PORTS FROM THE EFFECTS OF SEA WAVES**

Abstract: Breakwaters represent a type of maritime facilities, which are current both in the world and in our country. In this work, the description and purpose of such constructions with their basic characteristics are defined. The main role of the breakwater is to protect the coast and all other parts of the port. Depending on its function and the location where it is being built, it is important to make an adequate choice of breakwater type. In addition to the choice of breakwater type, the historical development of breakwater types was considered, starting with rubble mound breakwaters and vertical breakwaters and ending with composite types of breakwaters. For each type of breakwater, a calculation of the loads that occur, is presented with an indication of the wave theory as the dominant load. As for any other engineering object, the criteria of ultimate and serviceability limit state, advantages and disadvantages are defined for breakwaters. After the theoretical part has been adequately processed, the conceptual design of the vertical breakwater with the meteorological, bathymetric and geotechnical characteristics of the location was created, as in the Port of Bar. Through a comparative analysis of two variants of breakwater solutions, caisson and concrete block breakwater, a caisson breakwater was selected, for which the effects and impacts were calculated. The dimensioning of the elements, for ultimate and serviceability limit states, was carried out according to the Eurocode and for the projected life of the structure of 100 years. After dimensioning, graphic documentation of characteristic elements was presented. Nowadays, since we have the use of composite materials, such as glass fiber reinforced polymer reinforcement (GFRP), a comparison of the effectiveness of reinforcement with classic steel reinforcement and polymer reinforcement was made in terms of economic and engineering rationality. As a part of the conceptual project, special attention was placed on the aspect of construction and maintenance of such facilities, because they are built in conditions that change over time. In addition to stone, an equally important constructive material for construction is concrete, for which the criteria for the composition of the concrete mixture were considered due to the aggressiveness of the marine environment. Bearing in mind that this type of engineering objects in Montenegro is insufficiently researched, it was inspiring and interesting to work on this topic from a professional and scientific point of view.

Key words: breakwater, wave theory, concrete, GFRP, construction



Građevinski fakultet

MARKO BOŽOVIĆ rođen je 30. maja 1998. godine u Nikšiću gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju. Osnovne studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore završio je akademске 2019/20. godine. Studijske 2020/21. godine upisao je master, postdiplomske studije na konstruktivnom smjeru gdje je sve predmete, predviđene nastavnim planom i programom, položio sa pro-

sječnom ocjenom „A“ (9.60). Master rad Projektovanje i izgradnja lukobrana za zaštitu luka od dejstva morskih talasa, pod mentorstvom prof. dr Mladena Ulićevića, odbranio je sa ocjenom „A“ u oktobru 2022. godine. Za vrijeme osnovnih i master studija bio je stipendista Opštine Nikšić i Ministarstva odbrane Crne Gore.