

Fizika valova i utjecaj na obalne građevine

Tićak, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:513223>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Petra Tićak

**Fizika valova i utjecaj na obalne građevine
Physics of waves and their impact on costal buildings**

Završni rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij
Fizika**

**Petra Tićak
JMBAG: 0114029968**

**Fizika valova i utjecaj na obalne građevine
Physics of waves and their impact on costal buildings**

Završni rad

Rijeka, Rujan, 2022.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Petra Tićak

U Rijeci, 08.09.2022.

ZAHVALA

Ovim putem želim se zahvaliti svim osobama koje su mi bile bezgranična potpora tokom cjelokupnoga studiranja, ponajviše roditeljima koji su uvijek prvi vjerovali u mene.

Naravno, zahvaljujem se i mentoru dr.sc. Borisu Podobniku bez kojega ovaj rad ne bi bio moguć.

SAŽETAK

Ovim završnim radom objašnjene su osnovne značajke fizike valova i valnog gibanja, njihov nastanak, podjela i karakterizacija kroz generalno značenje s koncentracijom na morske valove . Objasnjeno je nastajanje vjetrovnih valova te načini širenja zajedno sa primjerom utjecaja sila na vertikalne i kose produkte unutar obalnog inženjerstva.

Ključne riječi

Ključne riječi: val, amplituda, duljina vala, visina vala, lom vala, oplicavanje, refleksija vala, difrakcija vala, projektni val

ABSTRACT

This final paper explains the basic features of the physics of waves and wave motion, their origin, division and characterization through a general meaning with the concentration being on sea waves. The generation of wind waves and their propagation methods are explained together with an example of the influence of forces on vertical and oblique products within coastal engineering.

Key words

Key words : wave, amplitude, wave length, wave height, wave breaking, wave refraction, wave reflection, wave diffraction, projected wave

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2.NASTANAK VALOVA	2
3. DEFINICIJA VALA	3
4. PODJELA VALOVA.....	4
5. KARAKTERIZACIJA VALA.....	6
6. VJETROVNI VALOVI.....	7
7. ŠIRENJE VALOVA.....	9
7.1. Oplićavanje vala (“shoaling efekt”)	9
7.2. Refleksija valova	10
7.3. Difrakcija valova	12
8. LOM VALOVA	14
9. PROJEKTNI VALOVI.....	16
10. UTJECAJ SILA NA OBALNE GRAĐEVINE	17
10.1. Sile na obalne građevine s okomitim površinama	17
10.2. Sile na obalne građevine s kosim površinama	18
11. ZAKLJUČAK	20
12. LITERATURA I IZVORI.....	21

POPIS SLIKA

Slika 1. Val na vodi [4]

Slika 2 Oblik longitudinalnog i transverznog vala [5]

Slika 3. Valne crte i zrake kružnog i ravnog vala [3]

Slika 4. Oblik profila vala [6]

Slika 5. Razlika konstruktivnih I destruktivnih valova [1]

Slika 6. Primjer promjene vala kod oplićavanja [8]

Slika 7. Idealna refleksija [7]

Slika 8. Difrakcija vala [7]

Slika 9: Dijagram koeficijenta difrakcije K_{diff} [7]

Slika 10: Tipovi loma vala [1]

Slika 11: Dijagram određivanja visine vala [7]

Slika 12: Nasuti lukobran [10]

Slika 13: Preporučeni koeficijent stabilnosti K_D [10]

1. UVOD

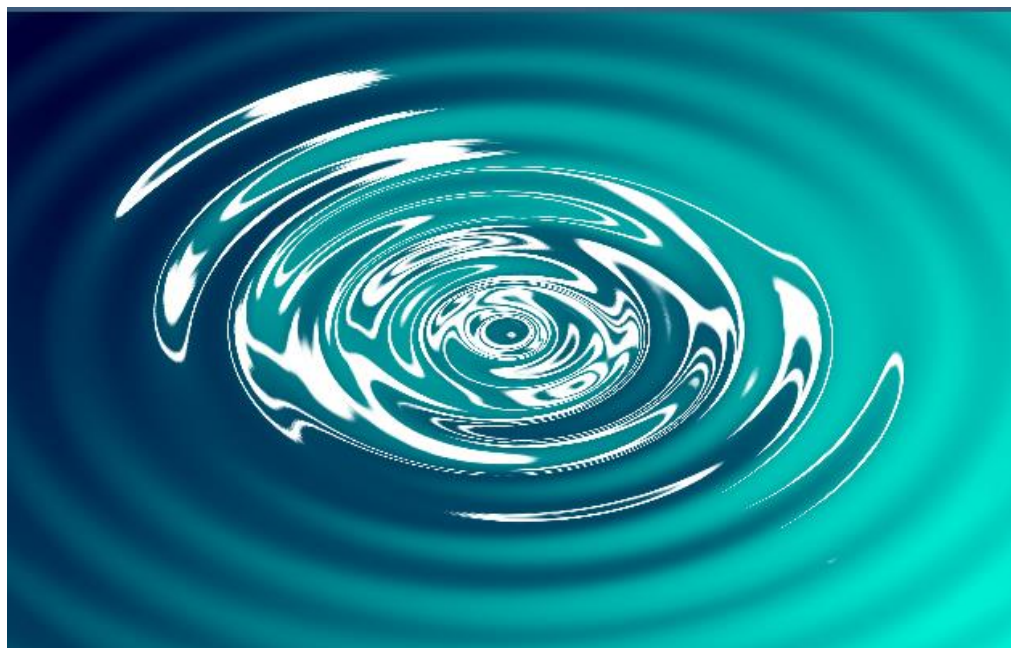
Obalna područja obuhvaćaju kopnena područja omeđena morem ili oceanom. Ta područja su vrlo osjetljiva i dinamična okruženja koja uključuju transformaciju mase i energije kroz različite sile, stvarajući stjenovite obale i plaže. Unutar građevinskog područja najvažniji vanjski izvori energije koji dovode do promjena okoliša te utječu na sam proces projektiranja su upravo vanjski izvori energije tj vjetrovi, valovi te plima i oseka [1].

Fenomen valova je opširan pojam i nalazi se u više područja fizike: optici, elektromagnetizmu, toplinskoj fizici i kvantnoj mehanici. Također pojavu valova često susrećemo i u svakodnevnim životnim pojavama poput površinskih mreškanja, zvukova i glazbe [2].

Upravo poznavanje veličina i ponašanja valova bitan je preduvjet za procese planiranja, projektiranja, izgradnje i funkcionalnosti svih vrsta obalnih građevina. Svi valovi imaju uzrok nastajanja i svoju posljedicu. Eksplicitno razmatranje tih čimbenika može pomoći u razjašnjavanju same pojave valova.

2.NASTANAK VALOVA

Nastanak valova možemo najlakše objasniti primjerom bacanja kamenčića u vodu mirne površine. Nastala pojava mrežkanja na površini te širenje kroz medij vode je upravo pojava vala uzrokovana prenošenjem poremećaja tj kinetičke energije okolnih čestica izazvanog samim upadom kamenčića kao izvorom vala [3].



Slika 1: Val na vodi [4]

3. DEFINICIJA VALA

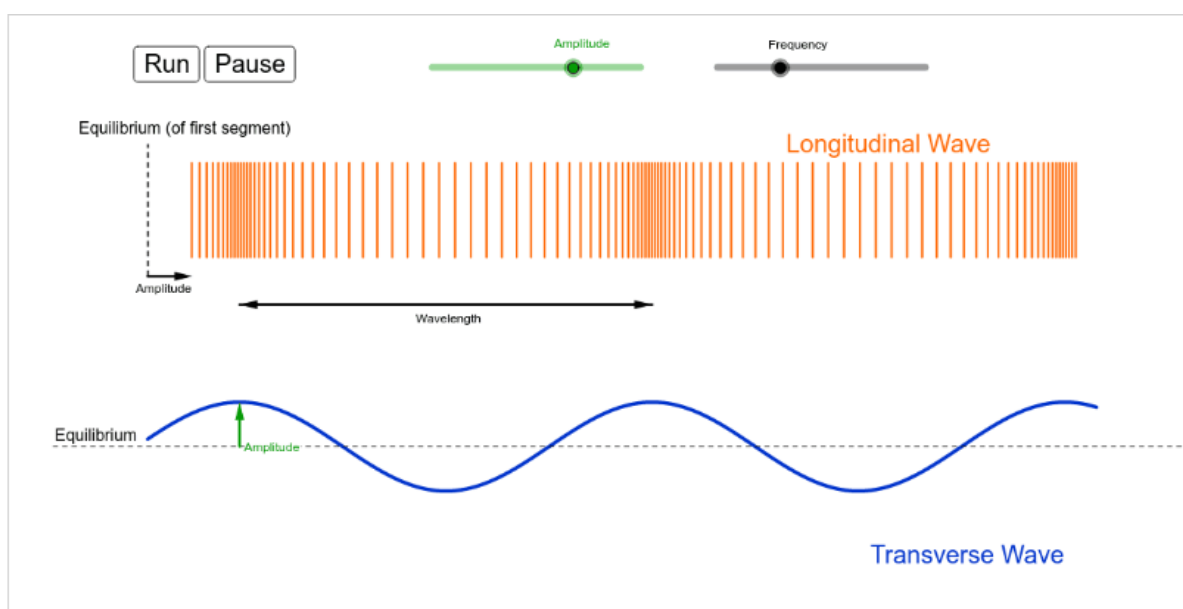
Val se definiše kao kolektivni poremećaj u kojem je događaj na bilo kojoj poziciji točkama zapravo odgođeni odgovor na smetnje u susjednim točkama.

Širenje valova označava napredak poremećaja od jedne točke do druge točke. Za širenje valova je potreban medij širenja poput vode, zraka, stakla ili električnog vodiča. Pozicije unutar medija opisujemo koordinatama koje ovisno o osobinama medija mogu biti u dvije ili tri dimenzije. Na svakoj poziciji, opisu vala dodajemo još najmanje jednu varijablu poput tlaka tekućine ili jakosti električnog polja kako bismo kvantificirali poremećaj. Te varijable zajedno čine valne funkcije. U matematičkom smislu svaka je valna funkcija definirana i ovisi o koordinatama položaja kojima je određena te daljnjom varijablom – vremenom [2].

4. PODJELA VALOVA

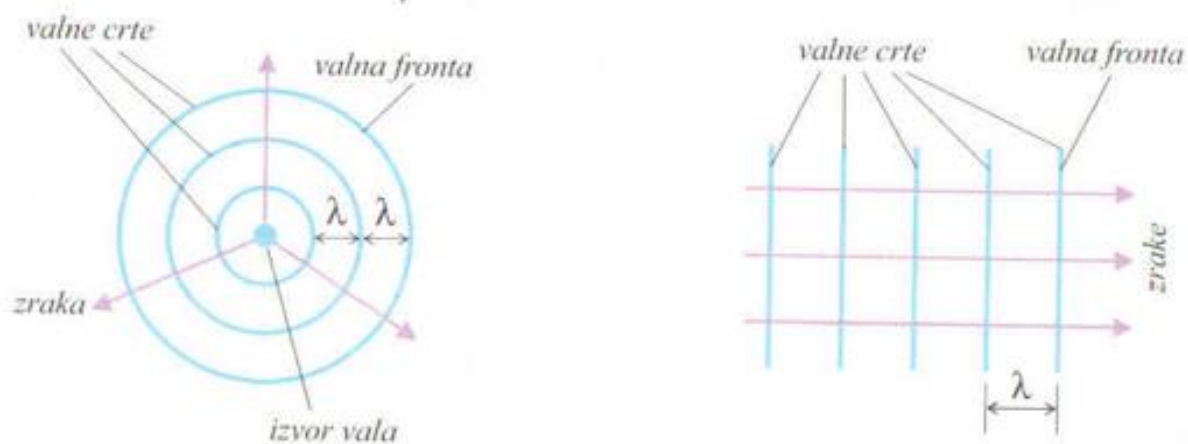
Postoje različite podjele valova. Glavna podjela valova ovisi upravo o načinu gibanja čestica vala s obzirom na smjer širenja vala. Time valove možemo podijeliti na transverzalne i longitudinalne.

Transverzalne valove karakteriziramo širenjem čestica ili poprečnog premještanja medija okomito na smjer širenja vala dok je kod longitudinalnih valova pomak čestica paralelan s smjerom širenja vala. Razliku u samom izgledu možemo vidjeti na Slici 2 [2].



Slika 2: Oblik longitudinalnog (a) i transverznog vala (b) [5].

Valove možemo podijeliti i prema obliku nastale valne fronte odnosno skupu točaka do kojih se val proširio. Takvom karakterizacijom razlikujemo ravne i kružne valove (Slika 3). Kada je valna fronta oblika kružnice tj kuglastog oblika valove nazivamo kružnima odnosno kuglastima dok valove s valnom frontom u obliku crte nazivamo ravnim valovima. Time valnu crtu ili plohu možemo definirati kao skup čestica koje titraju u fazi [3].



Slika 3: Valne crte i zrake kružnog (a) i ravnog vala (b) [3].

5. KARAKTERIZACIJA VALA

Pojednostavljenjem oblika vala (Slika 4) dolazimo do osnovnih karakteristika samoga vala. Time greben postaje najviša, a žlijeb najniža točka vala, dok je visina vala (H) njihova vertikalna udaljenost. Zamišljena horizontalna ravnina između grebena i žlijeba nazvana srednjicom vala čini amplitudu (a). Udaljenosti mjerene od srednjice vala- jednake s obje strane postaju :

$$a = \frac{H}{2} \quad (1)$$

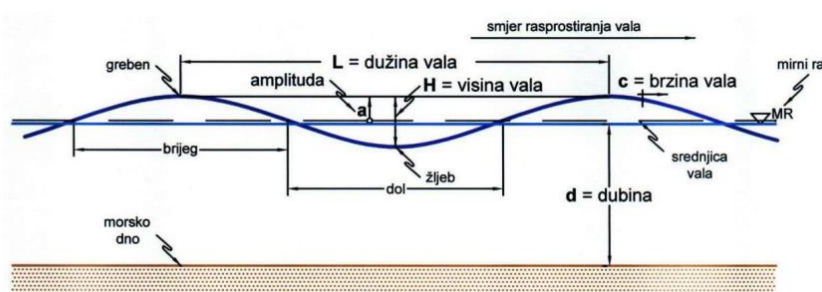
Duljina vala (L) je udaljenost između dva uzastopna grebena ili dva uzastopna žlijeba, dok je period vala (T) vrijeme između uzastopnih vrhova vala koji prolaze kroz istu točku.

Strmost vala određujemo bezdimenzionalnom veličinom omjera visine i dužine vala. Ti se parametri mijenjaju zajedno s dubinom prilikom pomicanja vala.

Pri pojavi loma vala, voda juri prema uzvišenjima plaže što se naziva zamah, dok polagano spuštanje vode natrag nazivamo povratno ispiranje [1].

Oblik profila vala

- Osnovni parametri su:
 - Visina vala H (m)
 - Duljina vala L (m)
 - Period vala T (s)
- } Strmost vala H/L



Slika 4: Oblik profila vala [6].

6. VJETROVNI VALOVI

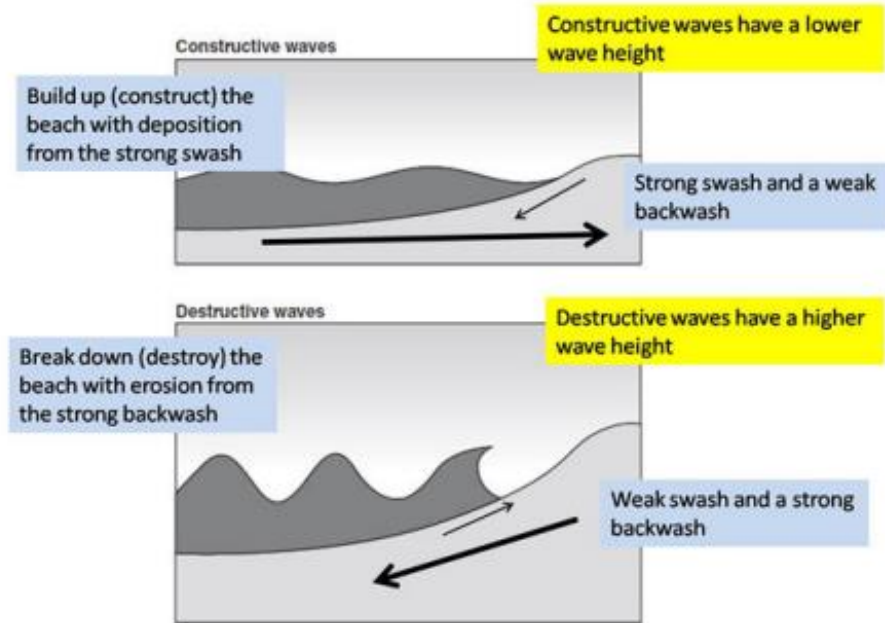
Valovi uzrokovani vjetrom odnosno horizontalnim gibanjem čestica zraka zbog razlike tlaka uključuju prijenos energije iz kretnje čestica zraka prema površini mora. Vjetar koji puše po morskoj površini stvara trenje te, otpor trenja uzrokuje rotaciju čestica vode, čija se energija potom prenosi naprijed u obliku poremećaja tj. vala.

Razlikujemo tri glavna čimbenika koji utječu na valnu visinu i dužinu vjetrovnih valova: brzina i jačina uzročnoga vjetra, vremensko trajanje vjetra i privjetrište odnosno morska površina nad kojom uzročni vjetar generira valove. U stvaranju vjetrovnih valova također sudjeluju niski atmosferski tlak te pomicanje morskog dna (najčešće potresima). Vjetrovni valovi se time razlikuju kao prisilni valovi nastali pod utjecajem vjetra i slobodni valovi nastali kao posljedica prisilnih valova izvan zone privjetrišta koji više nisu pod izravnim utjecajem djelovanja vjetra.

U vidu kretanja obalne sedimentacije i erozije možemo konstruktivne i destruktivne vrste valova.

Konstruktivni valovi nastaju u mirnim vremenskim uvjetima, manje su jačine, dužih valnih duljina i niske visine. Razbijaju se o obalu te talože materijal i tako pridonose izgradnji plaža.

Nasuprot tome, destruktivni valovi nastaju od izrazitih vjetrovnih snaga te zbog kratke valne duljine i dugog putovanja vala erodiraju obalnu površinu (slika 5) [1,9].



Slika 5 : Razlika konstruktivnih (a) i destruktivnih (b) valova [1].

7. ŠIRENJE VALOVA

Pri kretanju valova iz duboke u plitku vodu zbog promjene dubine dolazi do promjene visine i kuta širenja vala. To je uzrokovano učinkom oplićavanja vala (“shoaling efekt“), lomom te raspršivanjem valova. Ukoliko valovi naiđu na barijeru poput lukobrana dolazi do difrakcije i/ili refleksije što uzrokuje dodatnu promjenu smjera širenja te visine vala, no postoji i mogućnost prelaska vala preko strukturne barijere [7].

7.1. Oplićavanje vala (“shoaling efekt”)

Promjenom dubine vode (d) ulaskom valova u plitku vodu dolazi do promjene brzine vala (C) tj. usporavanja valova što rezultira promjenom visine vala (H). (Slika 8)

Izjednačavanjem toka u dubokim i srednjim vodama dobivamo linearnu teoriju :

$$H = K_s H_0 \quad (2)$$

U kojoj:

H = visina valova u bilo kojoj dubini vode

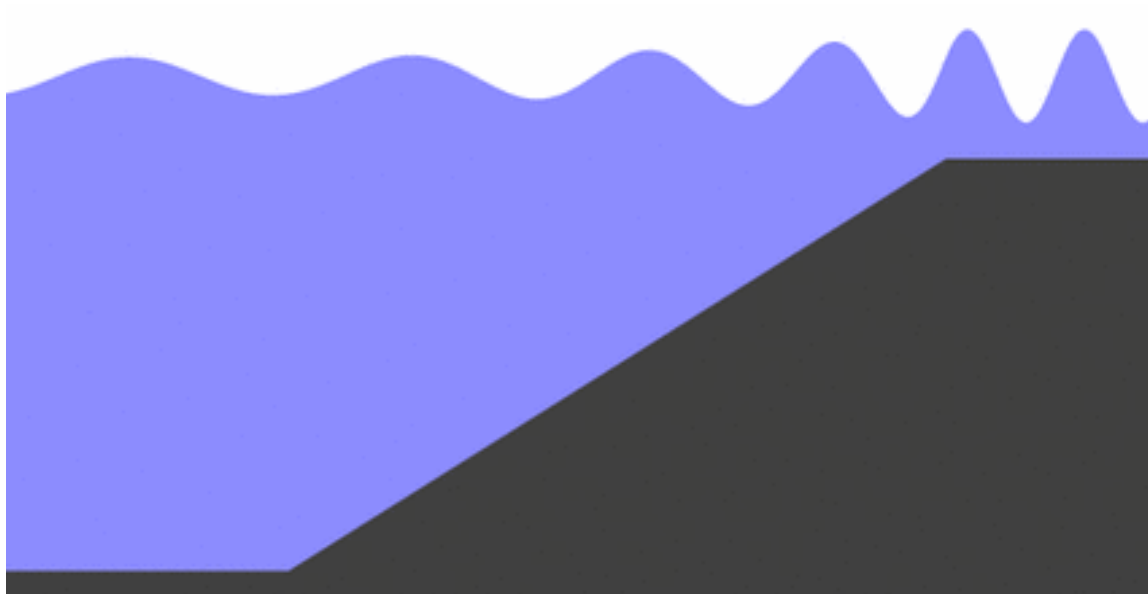
H_0 = visina valova u dubokoj vodi

K_s = Shoaling koeficijent

$$K_s = \sqrt{\frac{C_0}{2nC}} \quad (3)$$

C_0 = brzina valova u dubokoj vodi

C = brzina valova u srednjoj vodi



Slika 6: Primjer promjene vala kod oplićavanja [8].

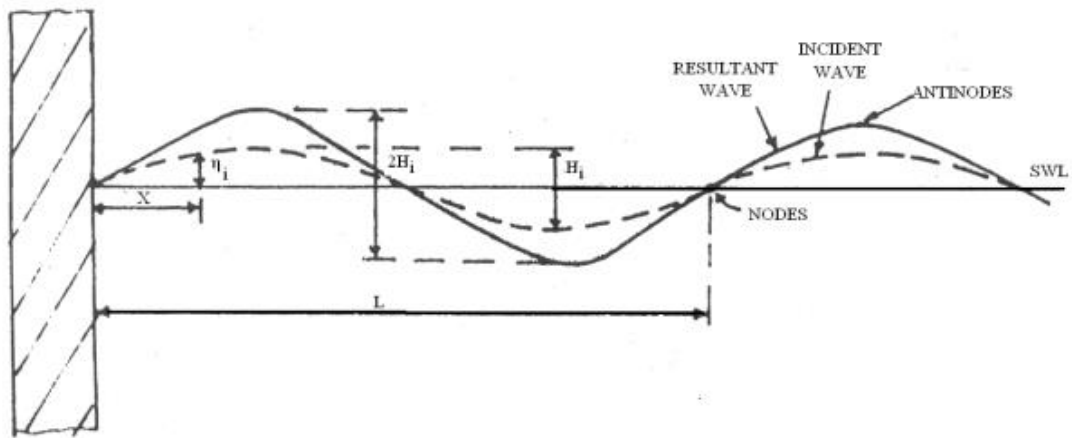
7.2. Refleksija valova

Nepoželjan odraz valova na obalne strukture je refleksija. Nakon udara vala u obalnu barijeru energija vala se reflektira tj. povlači natrag. Iako je idealna refleksija moguća (Slika 7), sama količina reflektiranog vala ovisi o vrsti barijere, svojstvima upadnih valova, te čimbenicima poput propusnosti, hrapavosti i nagiba barijere valu.

Visina (H) reflektiranih valova bit će veća ako je padina barijere strma, s manjom propusnosti i glatkom površinom.

Kod strmijih valova dolazi do rasipanja (ne-linearne disperzije) i manje količine refleksije.

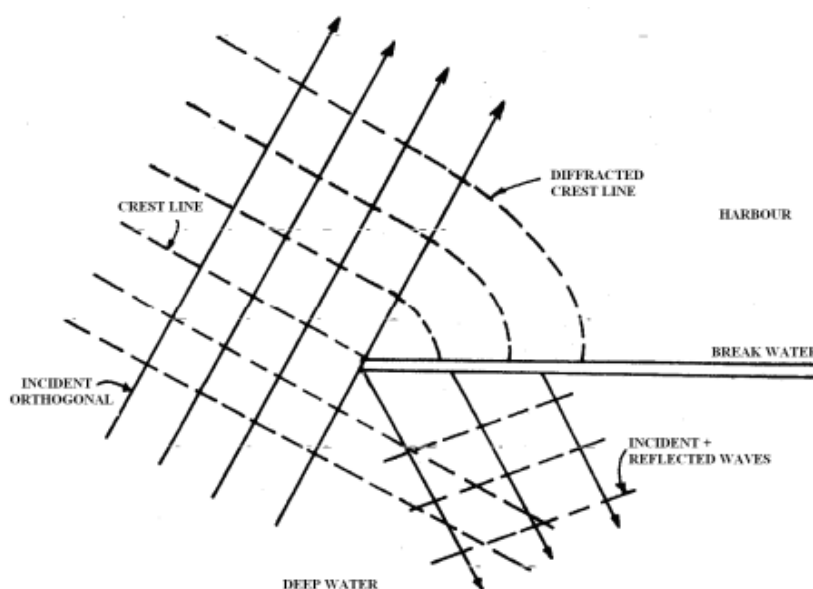
Koeficijent refleksije (K_r) definiran je kao omjer visina reflektiranog i upadnog vala kod proračuna za plaže, niske padine i nasipne lukobrane [7].



Slika 7: Idealna refleksija [7]

7.3. Difrakcija valova

Pri nailasku valova na vertikalnu barijeru poput vrha lukobrana dolazi do difrakcije tj. raspršivanja valova iza prepreke pri udaru (Slika 8). Za razliku od refrakcije (loma vala), difrakcija uključuje prijenos energije laterlano duž linije tjemena. Visina ulaznog vala i njegov smjer mijenjaju se nakon difrakcije. U slučaju više prepreka, ukoliko je duljina razmaka više od dva puta veća od upadne valne duljine, svaki se lukobran gleda kao samostalni čimbenik difrakcije valova. [7,9].



Slika 8: Difrakcija vala [7]

Teoretski pristup difrakciji valova zasniva se na četiri pretpostavke:

1. Voda je idealni fluid (nestišljiv i neviskoznan),
2. Valovi su malih amplituda te se opisuju linearnom teorijom,
3. Gibanje čestica vala je irotaciono i opisano potencijalnom funkcijom koja zadovoljava Laplaceovu jednadžbu,
4. Dubina iza prepreke vala je konstantna [9]

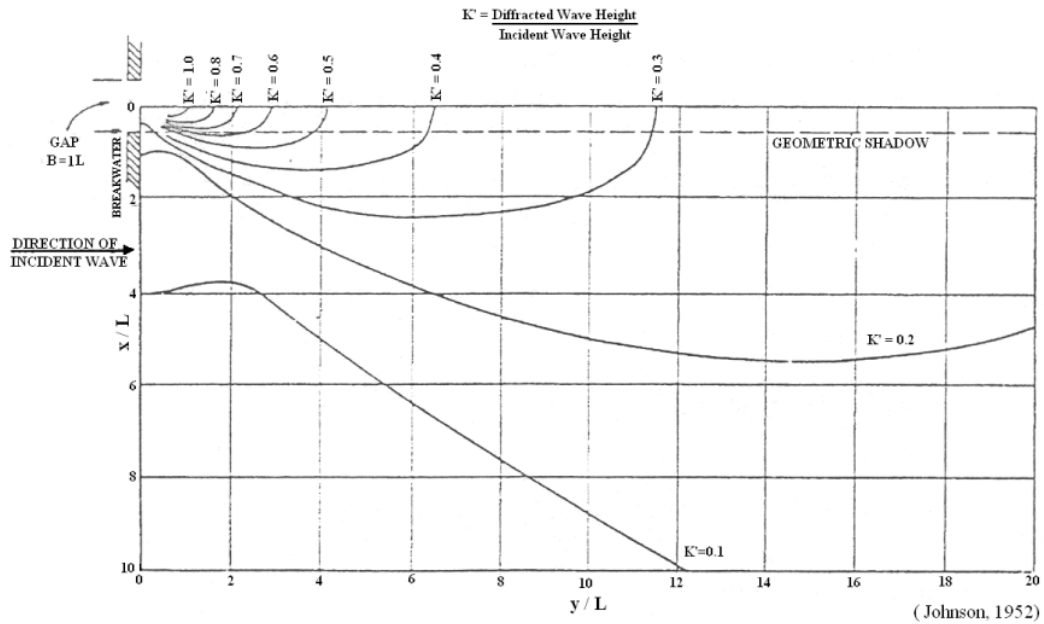
Redukcija visine vala iza prepreke izražava se preko koeficijenta difrakcije

$$H = K_{dif} H_{dol} \quad (4)$$

Gdje,

$$K_{dif} = \frac{H}{H_{dol}}, \quad K_{dif} \leq 1 \quad (5)$$

Koeficijenti difrakcije (K_{dif}) iščitavaju se iz difrakcijskih dijagrama (Slika 9) gdje linearna ljestvica dijagrama mora biti ista kao i ljestvica hidrografske karte koja prikazuje položaj lukobrana [7].



Slika 9: Dijagram koeficijenta difrakcije (K_{dif}) [7]

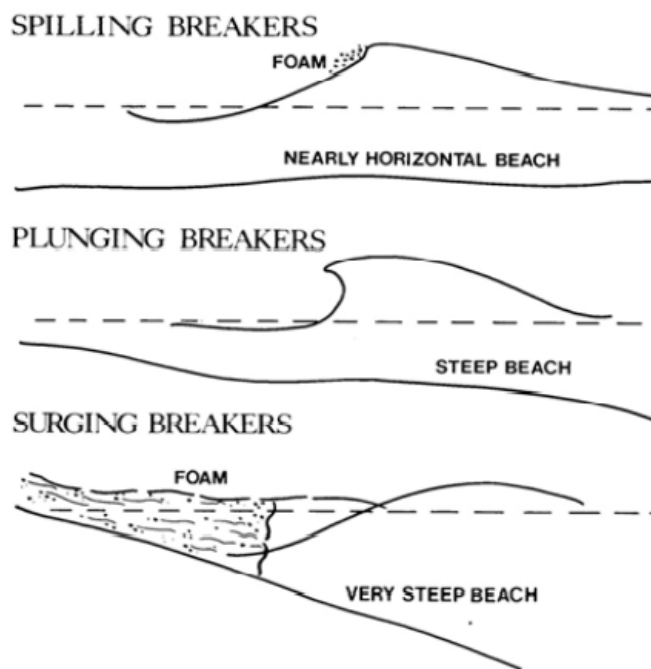
8. LOM VALOVA

Česta pojava kod valova je njihov lom. Do loma valova dolazi kada amplituda dosegne točku u kojoj se sam vrh vala prevrne. Time se razlikuju četiri vrste loma morskih valova (Slika 10).

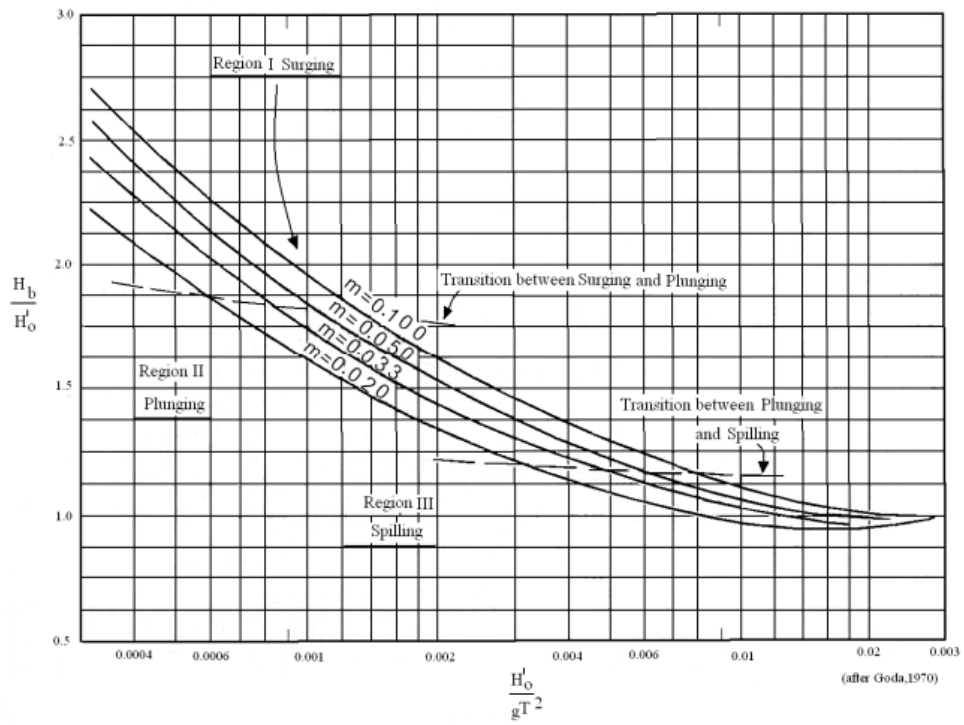
Do prelijevanja (“Spilling”) dolazi kada morsko dno ima postepen nagib. Prebačeni lom (“Plunging”) nastaje kod strmog nagiba dna ili nagle promjene dubine poput grebena. Prolom vala (“Surging”) nastaje nakon dugog razdoblja niskog nagiba i/ili na strmim profilima obala. Kombinacija prebačenog loma i proloma vala naziva se rušenje vala (“Collapsing”).

Razliku visina valova ovisno o njihovoj vrsti može se vidjeti na slici 10.

Lom valova dovodi do povećanja srednje razine vode što nazivamo postavljanjem valova (“wave setup”). U procesu loma vala energija valova je raspršena što rezultira sve manjim protokom mase te rastućom razinom vode [1].



Slika 10: Tipovi loma vala [1].



Slika 11: Dijagram određivanja visine loma vala. [7]

9. PROJEKTNI VALOVI

Kako bi se pri projektiranju obalnih konstrukcija razmotrila sva ekstremna djelovanja unutar projektnog povratnog razdoblja od $PR=5-100$ godina, provode se proračuni funkcionalnosti i konstrukcije. Unutar kojih se u obzir uzimaju veličina projektne valne visine (H_{proj}) u zavisnosti proračuna i vrste konstrukcije u pitanju i veličina projektnog valnog perioda (T_{proj}) u obziru na najnepovoljnije efekte raspona valnih perioda.

Proračuni funkcionalnosti obalnih građevina u pravilu se provode za manje vrijednosti djelovanja valova ($PR=5$ god) jer je šteta pri eventualnoj neispravnosti građevine prihvatljiva i financijski manja u slučaju nužnoga popravka.

Proračuni konstrukcije provode se za visoka djelovanja valova ($PR=50-100$ god) kako bi se izbjegla značajna oštećenja u vidu velike materijalne štete ili ugrožavanja zajednice pri eventualnom lomu ili neispravnosti građevine [9].

10. UTJECAJ SILA NA OBALNE GRAĐEVINE

Metode izračuna sila izazvanih valovima koje djeluju na obalne konstrukcije ovise o vrsti same konstrukcije.

Razlikujemo obalne strukture s okomitim površinama, poput morskih zidova od betona ili čelika paralelnih s obalom kako bi se ista zaštitila od korozije, te strukture s kosim površinama poput nasipnog lukobrana izgrađenim pod kutem u odnosu na obalu kako bi stvorili uvjete mirne vode [7].

10.1. Sile na obalne građevine s okomitim površinama

Prvi korak proračuna obuhvaća odabir projektne visine (H_{proj}) i evaluaciju položaja strukture u odnosu na zonu loma vala. Izbor visine vala ($H_{1/10}$, $H_{1/100}$...) odnosi se na prosječnu vrijednosti 10 ili 100 izmjerenih valova. Ovisno o potrebnoj zaštiti luke, razlikujemo krute, polukrute ili fleksibilne građevine.

Krute građevine poput betonskih zidova ne uključuju apsorpciju energije upadnog vala i nude maksimalnu zaštitu, ali se projektiraju za najveću vrijednost projektne visine vala ($H_{1/100}$) zbog mogućnosti zakazivanja u slučaju jednog velikog vala.

Polukrute građevine koje uključuju stijenke od čeličnih ploča do neke mjere apsorbiraju energiju upadnog vala, zbog čega se projektiraju za manje vrijednosti projektne visine vala u iznosima između $H_{1/10}$ i $H_{1/100}$.

Fleksibilne građevine kao kameni nasipni lukobrani su projektirani za apsorpiranje velike količine energije upadnih valova. Imaju prednost jednostavnog popravka u slučaju oštećenja te se zbog toga projektiraju sa iznosom projektne valne visine $H_{1/3}$.

Lom valova se događa u dubini oko 0,8 do 1,4 puta veće od njihove visine te putuje do obale kao razbijena vodena masa istom brzinom kao i prije loma. Građevina koja se nalazi unutar toga raspona pod utjecajem je sila loma vala. Ukoliko je građevina u dubljem položaju, ona je pod utjecajem sila neprekidnih valova (bez loma), dok su građevine u manjoj dubini od navedenog raspona pod utjecajem razbijene vode.

Sila loma vala i utjecaj razbijene vode su dinamičke i vremenski promjenjive veličine, dok je sila neprekidnih valova (bez loma) statične prirode [7].

10.2. Sile na obalne građevine s kosim površinama

Najčešći primjer obalnih građevina s kosom površinom je kameni nasuti lukobran. (Slika 12).

Njegova vanjska obloga (primarni sloj) podvrgnut je izravnom djelovanju valova. S obzirom na složeno djelovanje valova na primarni sloj lukobrana ne postoje eksplicitne formule za izračun, već samo empirijski izrazi koji opisuju stabilnost primarnog sloja u ovisnosti prema lomljenim valovima ili valovima koji se ne lome. (Slika 13).

U proračunu nasutog lukobrana prema Hudsonovim formulama projektiranja (2) stoga koristimo značajnu visinu vala (H_s) tj. visinu vala nakon efekta oplićavanja [7,10].

Hudsonove formule:

$$\text{Težina blokova : } G_A^{50\%} = \frac{\varphi g H_{proj}^3}{Kd \left(\frac{\varphi_{obl}}{\varphi_m} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad [m] \quad (6)$$

$$\text{Masa blokova: } W = \frac{\gamma a H^3}{Kd \left(\frac{\varphi_{obl}}{\varphi_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (7)$$

Gdje je :

φ_{obl} = gustoća mase materijala obloge

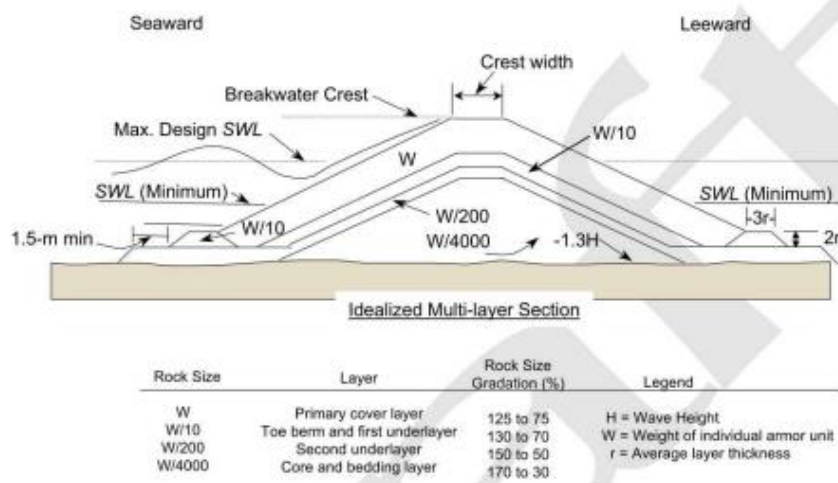
φ_m = gustoća mora

g = ubrzanje sile teže

H_s = značajna visina vala

H_{proj} = projektna visina vala

k_d = preporučeni koeficijent stabilnosti



Slika 12: Nasuti lukobran [10]

Preporučeni koeficijent stabilnosti K_D									
Dimenzioniranje pokrovnog sloja nasutok lukobrana po HUDSON-u (no damage)									
r.br. Obloge	Vrsta elementa pokrovnog sloja	Broj slojeva	Način smještaja	Bok valobrana		Glava valobrana		nagib	
				Lomljeni i valovi	Valovi koji se ne lome	Lomljeni valovi	Valovi koji se ne lome		
1	Glatki zabljeni	2	slučajno	1.2	2.4	1.1	1.9	1:1,5 1:3	
2		>3	slučajno	1.6	3.2	1.4	2.3	1:1,5 1:3	
3	Oštrobridi lomljeni kamen	2	slučajno	2.0	4.0	1.9	3.2	1:1,5	
						1.6	2.8	1:2	
							1.3	2.3	1:3
4		>3	slučajno	2.2	4.5	2.1	4.2	1:1,5 1:3	
5		2	specijalno položeni	5.3	5.8	6.4	7.0	1:1,5 1:3	
6	Tetrapodi Quadripodi	2	slučajno	7.0	8.0	5.0	6.0	1:1,5	
						4.0	5.5	1:2	
							3.5	4.0	1:3
7	Tribari	2	slučajno	9.0	10.0	8.3	9.0	1:1,5	
						7.8	8.5	1:2	
							6.0	6.5	1:3
8	Dolosi	2	slučajno	15.8	31.8	8.0	16.0	1:2	
							7.0	14.0	1:3

Slika 13: Preporučeni koeficijent stabilnosti K_D [10]

11. ZAKLJUČAK

Valovi kao prirodna pojava imaju izraziti učinak na sve dijelove obalnoga života pogotovo prilikom planiranja obalne gradnje.

Obalne strukture izložene su konstantnim pritiscima uzrokovanih udarom i lomom valova. S ciljem zaštite obalnog područja i maksimalnoj funkcionalnosti projektiranih obalnih struktura važno je ispravno poznavanje i analiziranje obalnih procesa gibanja valova. Predviđanjem maksimalnih sila na obalne strukture izbjegava se mogućnost negativnog utjecaja čimbenika valova, nepravilnosti pri realizaciji gradnje, te neispravnost građevine.

12. LITERATURA I IZVORI

- [1] Kamal, S. A., Coastal Forces and Processes, J Coast Zone Manag. S5:002., Bangladesh, 2021.
- [2] Freegarde , T., Introduction to the Physics of Waves, University of Southampton, Cambridge University Press,2012
- [3] C Labor, J., Fizika 3, Alfa d.d. , Zagreb, 2014.
- [4] Podjela valova: <https://sites.google.com/site/fizika8valovi/podjela-valova> , pristup 08.09.2022.
- [5] Walsh,T : Longitudinal and Transverse Wave basics ,
<https://www.geogebra.org/m/SxNZa3Q2> , pristup 22.08.2022.
- [6] Krvavica, N., Rukopis predavanja: „ Osnove mehanike valova’’ iz predmeta Osnove obalnog inženjerstva, skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2021/2022
- [7] Deo,M.C., Waves and Structures, Indian Institute of Technology Bombay,2013
- [8] Lachaume, R. :Propagation of a tsunami offshore ,
https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_shoaling, pristup 08.09.2022.
- [9] Carević D, Pršić M .,Pomorske građevine, web skripta, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Dio 1,2018
- [10] Krvavica, N., Rukopis predavanja: „ Nasuti lukobrani’’ iz predmeta Osnove obalnog inženjerstva, skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2021/2022