

Rješenje stabilizacije plaže primjenom numeričkog modela

Maleš, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:976265>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-07**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

DIPLOMSKI RAD

Petra Maleš

Split, 2017

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Petra Maleš

**Rješenje stabilizacije plaže primjenom numeričkog
modela**

Diplomski rad

Split, 2017

Rješenje stabilizacije plaže primjenom numeričkog modela

Sažetak:

Problem gibanja nanosa analiziran je na plaži lociranoj na istočnoj obali Jadranskog mora. Provedene analize nanosa obavljene su numeričkim modelom GenCade uz upotrebu raspoloživih podataka i studija. Obradena su varijantna rješenja stabilizacije primjenom podmorskog praga i pera. S obzirom na vrijednosti parametara i ulazne podatke, odabir rješenja s perima pokazao se kao prioritetan.

Ključne riječi:

stabilizacija plaže, erozija obale, transport sedimenta, nanos, linija obale, numerički model, GenCade

The solution of beach stabilization using a numerical model

Abstract:

The impact of sediment transport is analyzed on a beach located on the eastern coast of the Adriatic Sea. The sediment transport analyzes were performed using the GenCade numerical model, available data and study. Various solutions of stabilization were processed using submerged breakwater and groins. Considering the values of parameters and input data, the choice of solution with groins has proven to be a priority.

Keywords:

beach stabilization, coast erosion, sediment transport, shoreline, numerical model, GenCade

*Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Veljku Srziću na stručnom vodstvu i savjetima,
asistentu Ivanu Lovrinoviću na pomoći pri izradi diplomskog rada,
obitelji i zaručniku na bezuvjetnoj podršci.*

Primljeno: 01.09.2017.		
Graded	Broj	Prilog
02	30/36	

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Petra Maleš

BROJ INDEKSA: 600

KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**

PREDMET: Obalno inženjerstvo

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Rješenje stabilizacije plaže primjenom numeričkog modela

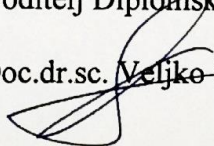
Opis zadatka: Od kandidatkinje se očekuje da na osnovu dostupne dokumentacije, raspoloživih podataka i dostupnih software-skih rješenja:

- jasno opiše problem
- da sažet uvid u dostupnu studijsku dokumentaciju i ulazne podatke
- definira privjetrišta i mjerodavne parametre vjetrovnog vala
- postavi i pokrene numeričke modele valovanja i gibanja sedimenta
- odabere mjerodavno razdoblje u trajanju od minimalno tri mjeseca za potrebe analize procesa valovanja i gibanja sedimenta
- izvrši kalibraciju modela
- predloži rješenje stabilizacije plaže i izvrši analizu gibanja nanosa za predviđeno rješenje

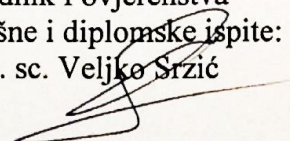
U Splitu, 15.3.2017.

Voditelj Diplomskog rada:

Doc.dr.sc. ~~Veljko Srzić~~



Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomске ispite:
Doc. dr. sc. Veljko Srzić



S a d r Ź a j

1. UVOD	4
2. OBALNI PROCESI	5
2.1. Transformacije vala	6
2.1.1. Uplićavanje	10
2.1.2. Refrakcija	10
2.1.3. Difrakcija	12
2.1.4. Refleksija	13
2.1.5. Lom vala	14
2.2. Transport sedimenta	15
3. MONITORING PLAŽE PETROVAC U CRNOJ GORI.....	19
4. PREGLED DOSTUPNE PROJEKTNE DOKUMENTACIJE.....	25
4.1. Studija hidrografije Budvanskog zaliva	25
4.2. Projekat revitalizacije plaže u Petrovcu, PIM-INCEST d.o.o., Tivat, 2001.	26
5. OBILAZAK PLAŽE PETROVAC 25.03.2017.	30
6. ODREĐIVANJE PRIVJETRIŠTA	35
7. ODREĐIVANJE PARAMETARA DUBOKOVODNOG VALA	41
8. CG WAVE	52
8.1. Primjena CG WAVE modela na plažu Petrovac	55
9. GENCADE	64
9.1. Proračun valnih transformacija.....	70
9.2. Rubni uvjeti	73

9.3. Numerička stabilnost	82
9.4. Utjecaj promjene ulaznih podataka na rezultate modela	88
9.5. Objekti	101
9.5.1. Pero	101
9.5.2. Valobran	109
9.5.3. Prihranjivanje plaže	114
10. PRIMJENA GENCADE MODELA NA PLAŽI PETROVAC	117
10.1. Kalibracija modela	117
10.2. Varijantna rješenja stabilizacije plaže Petrovac	123
11. ZAKLJUČAK	134
12. LITERATURA	136

1. UVOD

Problem stabilizacije plaža prisutan je na svim kontinentima Svijeta pa i na Mediteranu. Istočna obala Jadranskog mora dominantno je krško područje koje samo po sebi čini ležište kamenog materijala različitog vremena postanka. Pod utjecajem atmosferilija, potresa ali i djelovanjem čovjeka, nanosom frakcija kamena sa slivnih područja vrši se prihranjivanje i formiranje plaža. Tako postignuti oblik nije dugoročan zbog izloženosti plaža djelovanju valova, plime i oseke te morskim strujama.

Utjecaj vjetrovnih valova, naročito onih karakteriziranih većim valnim visinama rezultira prijenosom veće energije na materijal od kojih je plaža izgrađena, zbog čega dolazi do pokretanja žala i izmjene geometrije lica plaže. Ovaj problem karakterističan je za plaže na istočnoj obali Jadrana, uz napomenu kako je pojava vala ekstremnih valnih visina zbog smjera pružanja obale najčešće ostvarena za trajanja puhanja juga i garbina.

Uobičajeni postupci stabilizacije plaža provode se za val petogodišnjeg povratnog perioda. Karakteristične veličine parametara vala malog povratnog perioda garantiraju rješenje problema u većem dijelu godine. Pojave valova većih valnih visina izolirani su događaji, relativno kratkog vremena trajanja (od nekoliko sati do dana), na koje plaže najčešće nisu dimenzionirane. S porastom duljine plaže i njezinim položajem u odnosu na dominantne smjerove vjetrovnog vala povećava se količina materijala koja je giba pod djelovanjem sila vala pa su tako i promjene u pogledu širine lica plaže izraženije.

Održiv i postojan oblik tlocrtnih kontura plaže može se donekle očuvati prirodnim prihranjivanjem plaža koje se najčešće ostvaruje bujičnim tokovima sa slivnih područja koja gravitiraju plaži. U nedostatku istih rješenja je moguće potražiti u vidu umjetnog prihranjivanja prije sezone kupanja, ali i izgradnji objekata koje će spriječiti nesmetano gibanje materijala ili ga barem u potrebnoj mjeri umanjiti.

U ovom radu za primjer je odabrana plaža u Petrovcu (Crna Gora) dužine 600 m koja je, zbog geografskog položaja i uvjeta na samoj plaži ali i području koje gravitira istoj, karakterizirana izraženim promjenama širine lica plaža. Za potrebe stabilizacije plaže u pogledu osiguranja postojeće površine lica plaža izrađena je analiza valnog polja u obuhvatu plaže te su numeričkim modelom gibanja nanosa ispitana varijantna rješenja stabilizacije plaže za jedno godišnje doba u kojem se javljaju valovi ekstremnih valnih visina.

2. OBALNI PROCESI

Plaže nastaju prilikom gibanja značajne količine volumena zrnatog materijala, što se događa na slivnim područjima i kod rijeka koje prenose veliku količinu sedimenta prema deltama, gdje se uslijed fluktuacija u razini mora nanese sediment redistribuirajući i formirajući pješčane plaže. Dominantnu ulogu na geografsko-geološke karakteristike obalnog područja ima razorno djelovanje vjetrovnih valova koji su određeni brzinom i smjerom vjetra, trajanjem puhanja vjetra i duljinom privjetrišta, no ne treba zanemariti utjecaje morskih mijena i struja.

Problem nastaje kada dugoročno gledano količina transportiranog materijala u čitavom sustavu rezultira gubitkom, što uzrokuje eroziju plaža i povlačenje obalne crte. Danas je to problem globalne razine jer većina svjetskih plaža nestaje, a razlozi se mogu grupirati:

- smanjenje opskrbe sedimentom,
- usitnjavanje materijala djelovanjem obalne klime,
- potopljenost uslijed relativnog tonjenja obale i podizanja morske razine,
- utjecaj čovjeka [1].

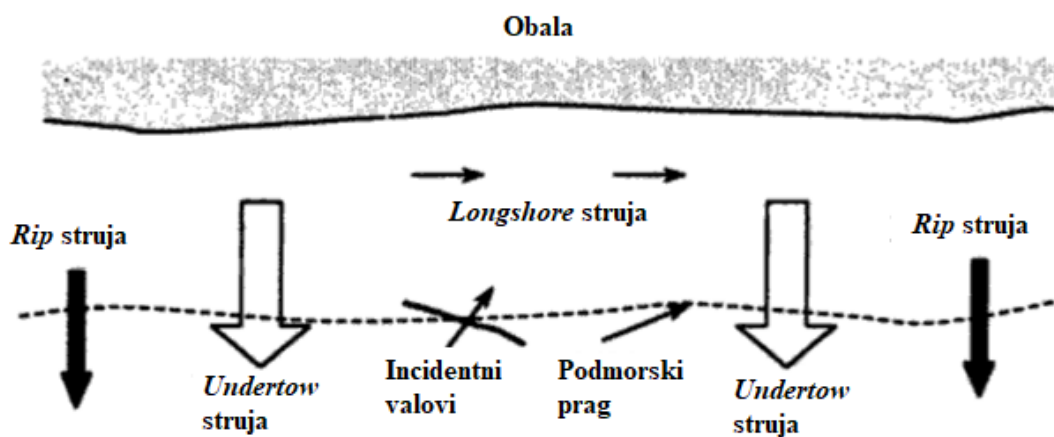
Promjene razina mora se prema povratnom periodu mogu podijeliti na kratkoročne, sezonske i dugoročne, a najočitije su kratkoročne nastale djelovanjem morskih mijena. Plima i oseka se u jednom danu izmjenjuju dva puta, točnije svakih 24 sata i 50 minuta, i u periodu povećanja razine mora se mjesto loma vala kao funkcija dubine pomiče prema obali, pa se za jakih olujnih nevremena bilježe razorna djelovanja valova na konstrukcije. Morske mijene također utječu na nanošenje i povlačenje sedimenta s obale i uzrokuju strujanje, stoga nisu zanemariv čimbenik u ispitivanju obalnih procesa i zaštite od štetnih utjecaja na istu.

Gibanje mora se općenito može podijeliti na usmjereno gibanje čitave morske mase kao morske struje i na pokrete dijelova morske mase odnosno valove.

Morske struje se gibaju u površinskom sloju ili na morskom dnu i uglavnom su karakterizirane manjim brzinama. Važnost njihovog utjecaja se predaje pri proračunu objekata na većim dubinama i problemima s nanosima jer dužim trajanjem mogu prenijeti veću količinu sedimenta s morskog dna.

Manji kut nailaska incidentnog vala u odnosu na obalu u zoni srednje dubokog mora generira sljedeće struje (Slika 2.1 [2]):

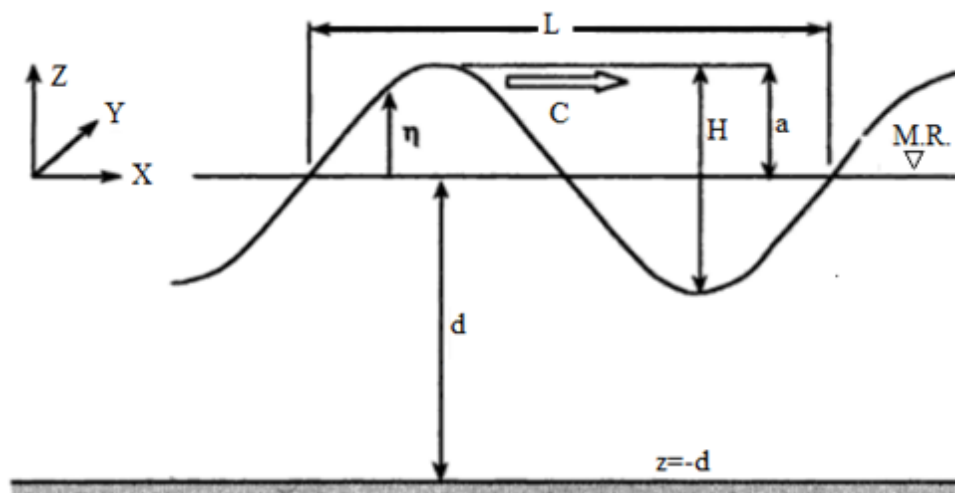
- *longshore* - struja paralelna s obalom (SPO) kao produkt kuta nailaska incidentnog vala u odnosu na obalu,
- *rip* - lokalne, snažne struje usmjerene od obale, nastale na mjestima smanjenja otpora primjerice na prekidima podmorskih pragova,
- *undertow* - struja koja se na morskom dnu giba suprotno od smjera nailaska valova.



Slika 2.1 Struje u zoni srednje dubokog mora [1]

2.1. Transformacije vala

Za razumijevanje transformacija vala potrebno je navesti osnovna načela teorije valova malih amplituda (linearne valne teorije), bazirane na sinusoidnom valu na Slici 2.2 [1] koji oscilira oko mirne razine mora. Valna visina predstavlja vertikalnu udaljenost od žljeba do grebena vala, a amplituda maksimalni otklon površine mora od srednjice vala i odgovara polovini valne visine. Vremenski period između dva uzastopna prolaza grebena kroz istu točku naziva se period vala i konstantan je parametar vala, dok se vrijednosti valne visine, brzine i duljine vala mijenjaju pri promjeni dubine.



Slika 2.2 Sinusoidni val [1]

Jednadžba visinskog položaja vala koji putuje s lijeva na desno u odnosu na srednju razinu mora ima pozitivan predznak i ovisi o udaljenosti u smjeru propagacije vala x i vremenu t . Ukoliko je smjer valovanja suprotan, predznak je negativan:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.1)$$

gdje je:

a - amplituda vala (m),

k - valni broj (rad/m),

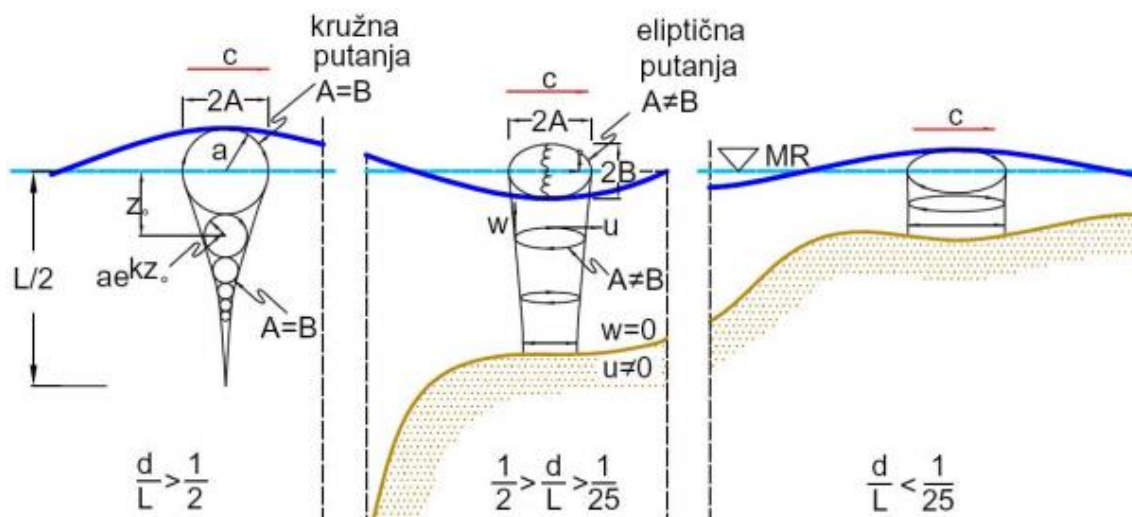
ω - valna kutna frekvencija (rad/s).

H - valna visina (m),

L - valna duljina (m),

T - valni period (s).

Pomaci vodnih čestica vala se u dubokom moru odvijaju u kružnoj putanji, dok se u prijelazu iz dubokog u plitko more odvijaju po eliptičnoj putanji (Slika 2.3). Tablica 2.1 prikazuje parametre vala prema teoriji valova malih amplituda za područje duboke vode, prijelaznog područja i plitke vode.



Slika 2.3 Utjecaj dubine na putanju čestica vala

Tablica 2.1 Prikaz parametara vala prema teoriji valova malih amplituda

Relativna dubina	Duboka voda $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	Prelazno područje $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Plitka voda $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
1. Profil vala	isto	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	isto
2. Brzina vala	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$
3. Dužina vala	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T, T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = T \sqrt{gd} = CT$
4. Brz. grupe valova	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] \cdot C$	$C_g = C = \sqrt{gd}$
5. Brzine čestica a) horizontalna	$u = \frac{\pi H}{T} e^{2\pi z/L} \cdot \cos \theta$	$u = \frac{H g T}{2 L} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\cosh(2\pi d/L)} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$
b) vertikalna	$w = \frac{\pi H}{T} e^{2\pi z/L} \cdot \sin \theta$	$w = \frac{H g T}{2 L} \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\cosh(2\pi d/L)} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{H \pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \sin \theta$
6. Ubrzanja čestica a) horizontalna	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{2\pi z/L} \cdot \sin \theta$	$a_x = \frac{g \pi H}{L} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\cosh(2\pi d/L)} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = \frac{H \pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$
b) vertikalna	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{2\pi z/L} \cdot \cos \theta$	$a_z = -\frac{g \pi H}{L} \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\cosh(2\pi d/L)} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$
7. Pomaci čestica a) horizontalni	$f = -\frac{H}{2} e^{2\pi z/L} \cdot \sin \theta$	$f = -\frac{H}{2} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\sinh(2\pi d/L)} \right]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$f = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{d}} \sin \theta$
b) vertikalni	$f = \frac{H}{2} e^{2\pi z/L} \cdot \cos \theta$	$f = \frac{H}{2} \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\sinh(2\pi d/L)} \right]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$f = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$
8. Putanje čestica a) horizontalna os	kružnica $A = \frac{H}{2} e^{2\pi z/L}$	elipsa $A = \frac{H}{2} \frac{\text{ch} \left[\frac{2\pi(d+z)/L}{\text{sh}(2\pi d/L)} \right]}{\text{sh}(2\pi d/L)}$	elipsa $A = \frac{H}{2} \frac{1}{2\pi d/L}$
b) vertikalna os	$B = \frac{H}{2} e^{2\pi z/L}, A = B$	$B = \frac{H}{2} \frac{\text{sh} \left[\frac{2\pi(d+z)/L}{\text{sh}(2\pi d/L)} \right]}{\text{sh}(2\pi d/L)}$	$B = \frac{H}{2} \frac{2\pi(d+z)/L}{2\pi d/L}$
9. Pritisak ispod vala	$p = \rho g \eta e^{2\pi z/L} - \rho g z$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+d)/L}{\cosh(2\pi d/L)} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g (\eta - z)$

Ukupnu energiju koja se prenosi valom čini potencijalna energija kao posljedica vertikalnog izdizanja morske površine i kinetička energija nastala gibanjem čestica vala:

$$E_{uk} = \overline{PE} + \overline{KE} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \tag{2.2}$$

Kako se dubokovodni val približava obali, sve je veći utjecaj dna koji se očituje kroz promjene parametara vala i smjera gibanja valnih zraka. U nastavku su opisane valne transformacije.

2.1.1. Uplićavanje

Uplićavanje je pojava koja se javlja kada val nailazi okomito na ravnu obalu čije su izobate paralelne s linijom obale. U tom slučaju se cjelokupna valna energija prenosi prema obali, što znači da je protok energije konstantan bez obzira na udaljenost grebena od obale pa se može pisati:

$$EC_g = E nC = const. \quad (2.3)$$

Ako se u izraz uvrsti jednadžba (2.2), dobije se:

$$nCH^2 = n_1C_1H^2_1 = n_2C_2H^2_2 = n_0C_0H^2_0 = const. \quad (2.4)$$

iz čega se odnos bilo koje dvije valne visine može prikazati kao:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 C_1}{n_2 C_2}} \quad (2.5)$$

Općenito, pomoću valne visine u dubokom moru H_0 je moguće dobiti valnu visinu H na bilo kojoj dubini:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 C_0}{n C}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{1}{\text{tg h}(kd)}} = \frac{H}{H_0'} = K_S \quad (2.6)$$

gdje je K_S koeficijent uplićavanja koji u dubokom moru iznosi 1.0, a s dubinom se smanjuje do vrijednosti 0.91, nakon čega raste do beskonačnosti kako dubina mora ide u nulu. [1]

2.1.2. Refrakcija

Refrakcija se događa kada valovi kao posljedica promjene batimetrije nailaze na obalu pod kutom (Slika 2.4 [1]). Valna brzina je funkcija dubine i opada proporcionalno smanjenju dubine, stoga greben vala iz dubljeg mora sustigne greben u plićem moru zbog veće valne brzine pa su za posljedicu grebeni vala u neposrednoj blizini obale paralelni s obalom, a valne zrake se poklapaju s normalama na obalnu liniju. Pretpostavlja se da se sva energija prenosi uzduž zrake vala i da nema gubitka energije okomito na zraku.

Uz uvjet da postoji zakon održanja mase među zrakama međusobne udaljenosti b , slijedi:

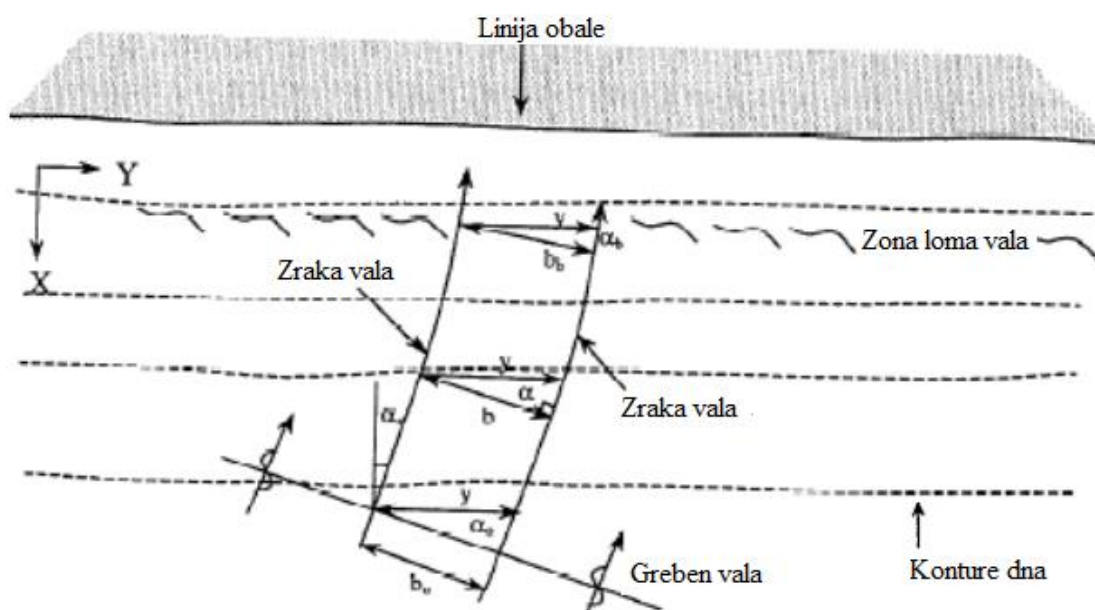
$$nCH^2b = n_1C_1H^2_1b_1 = n_2C_2H^2_2b_2 = n_0C_0H^2_0b_2 = const. \quad (2.7)$$

iz čega se odnos bilo koje dvije valne visine može prikazati kao:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 C_1}{n_2 C_2}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad (2.8)$$

Općenito, pomoću valne visine u dubokom moru H_0 je moguće dobiti valnu visinu H na bilo kojoj dubini:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 C_0}{n C}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n \operatorname{tg} h(kd)} \frac{1}{b}} \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_S K_R \quad (2.9)$$



Slika 2.4 Refrakcija ravnog grebena vala [1]

Jednadžba propagacije vala glasi:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k \sin \alpha) - \frac{\partial}{\partial y} (k \cos \alpha) = 0 \quad (2.10)$$

a kako za obalu koja je postavljena okomito na x os nema promjene u y smjeru, slijedi:

$$k \sin \alpha = \text{const.} \quad (2.11)$$

Uzimajući u obzir da je period vala konstantan, slijedi Snellov zakon refrakcije vala:

$$k \sin \alpha = \frac{\sin \alpha}{C} = \text{konst.} \quad (2.12)$$

pomoću kojeg se računaju kutovi nailaska vala:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_0} = \frac{C}{C_0} = \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2.13)$$

S obzirom da se svaka zraka vala refraktira po istom zakonu, međusobna udaljenost zraka u smjeru pružanja obale ostaje konstanta:

$$\frac{b}{\cos\alpha} = \text{const.} \quad (2.14)$$

$$\sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = \sqrt{\frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}} \quad (2.15)$$

gdje je K_R koeficijent refrakcije [1]:

$$K_R = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}} \quad (2.16)$$

2.1.3. Difrakcija

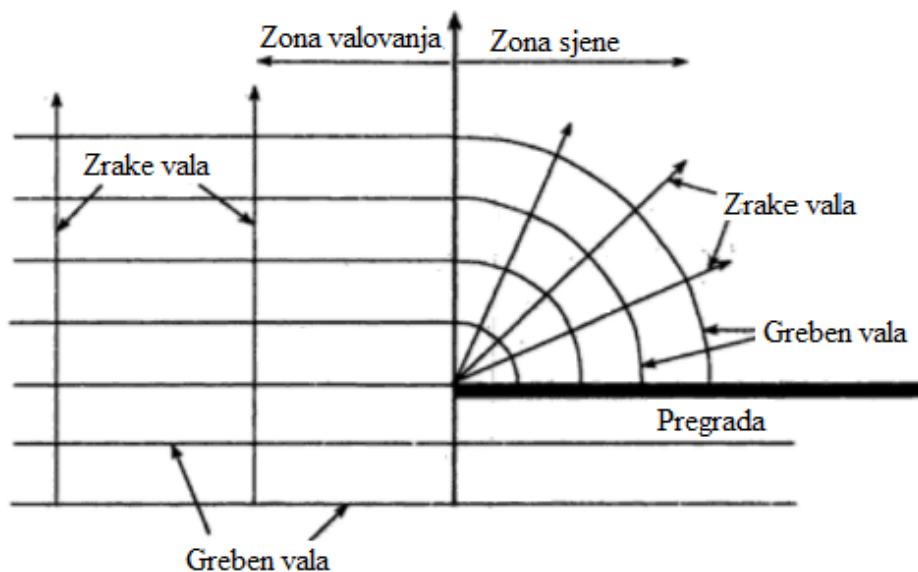
Difrakcija ili ogib nastaje kada valovi naiđu na vertikalnu prepreku i rezultat je bočnog rasprostiranja energije koje se javlja iza prepreke. Iako se u prirodi uglavnom odvija istovremeno s refrakcijom, radi potrebe razmatranja uzima se da nema promjene dubine pa refrakcija nije prisutna. Radi se o slučaju čiste difrakcije prikazanom na Slici 2.5 gdje incidentni dubokovodni val nailazi na pregradu na vrhu koje je razdjelnica područja sjene i zone incidentnog vala. Zrake vala se lome i usmjeravaju prema zoni sjene, gdje dolazi do prijenosa energije.

Koeficijent difrakcije K_D se očitava iz nomograma, a pomnožen s valnom visinom incidentnog vala rezultira valnom visinom u zoni sjene pregrade:

$$K_D = \frac{H}{H_S} \quad (2.17)$$

Proračun valne visine uslijed istovremenog djelovanja uplićavanja, refrakcije i difrakcije [1]:

$$\frac{H}{H_0} = K_S K_R K_D \quad (2.18)$$



Slika 2.5 Primjer čiste difrakcije [1]

2.1.4. Refleksija

Kada val naiđe na kruti, nepropusni vertikalni zid događa se totalna refleksija ukupne energije nadolazećeg vala, koja se superponira s energijom nadolazećeg incidentnog vala formirajući potpuni stojni val kojeg karakterizira maksimalna visina $2H$.

Koeficijent refleksije C_R je u rasponu od nula do jedan i predstavlja udio ukupne količine energije dolaznog vala koji se reflektira od konstrukcije, čiji se reflektirani val superponira sa dolaznim valom, a opterećenje vala na konstrukciju se povećava:

$$C_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (2.19)$$

gdje je:

H_R - visina reflektiranog vala (m),

H_I - visina incidentnog vala (m).

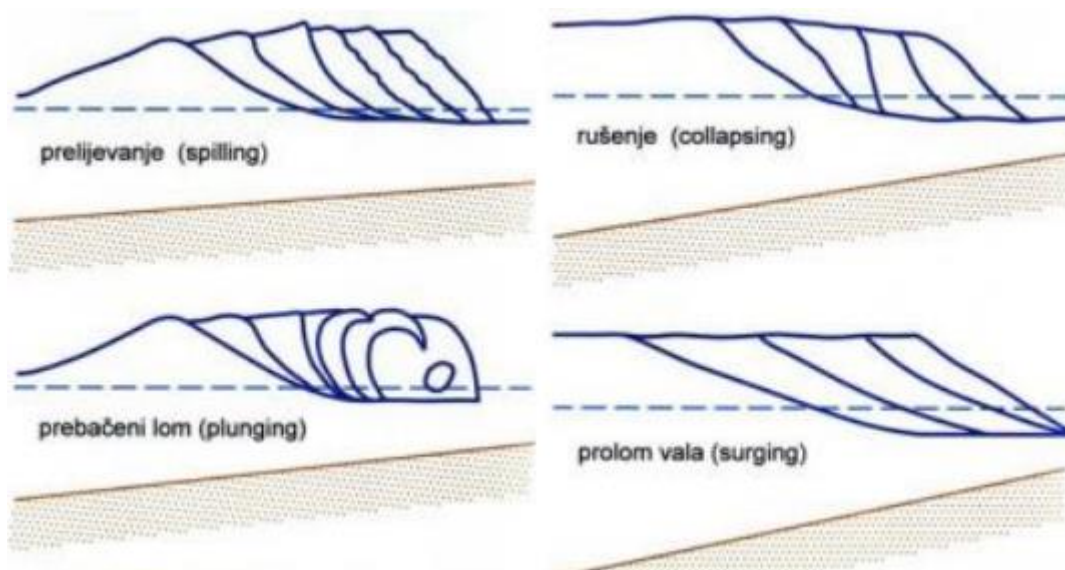
Postojanje gradijenta dubine također uzrokuje refleksiju. Koeficijent refleksije povećava se sa porastom gradijenta dubine. Reflektirani tok energije vala moguće je definirati koeficijentom refleksije kao udio ukupnog toka energije nadolazećeg vala, koji se zbog promjene nagiba dna reflektira nazad, suprotno smjeru incidentnog vala za slučaj kada se zraka incidentnog vala poklapa sa gradijentom dubine. [1]

Plaže su zbog prirodnog položaja i materijala jako dobri disipatori incidentnog vala pa imaju jako male vrijednosti koeficijenta refleksije. Za varijabilne parametre incidentnih valova plaža mijenja geometriju i koeficijent refleksije. [1]

2.1.5. Lom vala

Lom vala će se dogoditi kada se prekorači strmost vala - omjer valne visine i valne duljine. Prema Galvinu postoje četiri tipa loma vala (Slika 2.6):

- prelijevanje kod vrlo blagog nagiba dna (prebačeni lom),
- lom guranjem s obuhvaćenim mjehurom zraka kod strmog nagiba dna,
- propadajući lom kao prijelazna forma i prolom vala,
- izdizanje kod vrlo strmog nagiba. [1]



Slika 2.6 Vrste loma vala prema Galvinu

Kriterij loma vala ovisi o maksimalnoj strmosti [1]:

- za duboko more:

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)_{max} = \frac{1}{7} = 0,142 \quad (2.20)$$

- za plitko more:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{max} = \frac{1}{7} \frac{2\pi d}{L} \quad (2.21)$$

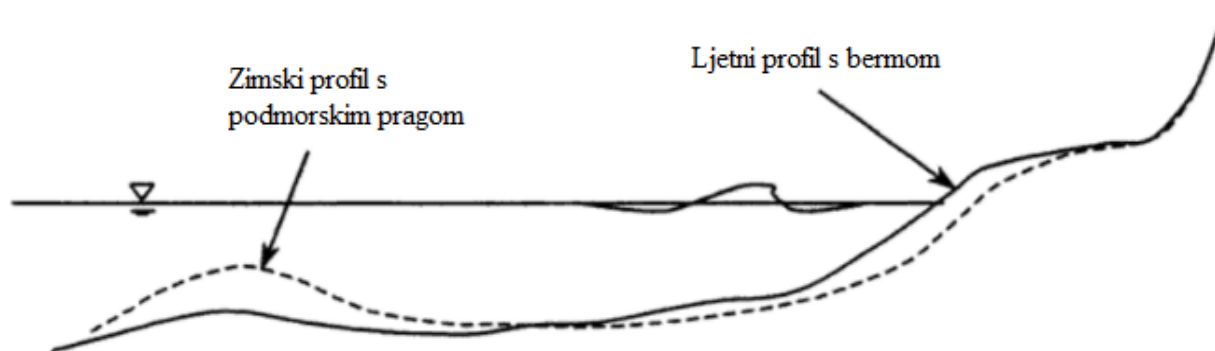
- Micheov opći izraz:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{max} = \frac{1}{7} \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.22)$$

2.2. Transport sedimenta

U obalnom području se neprestano odvijaju procesi razaranja i erozije materijala, te taloženje odnosno sedimentacija materijala. Prijenos sedimenta se radi lakšeg razmatranja može podijeliti na transport u smjeru linije obale i okomito na nju.

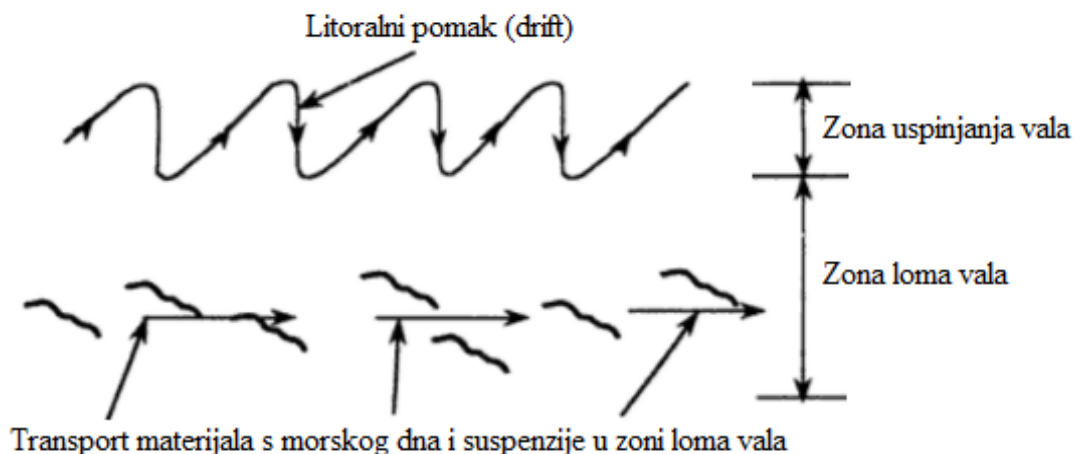
Godišnja promjena u profilu plaže prikazana je na Slici 2.7 [1], što predstavlja **gibanje materijala okomito na liniju obale**. Djelovanjem strmih i visokih valova uslijed jesenskih, zimskih i proljetnih nevremena materijal se s nadmorskog dijela plaže povlači na morsko dno, formirajući podmorski prag na mjestu loma valova. Ljetni valovi blagih nagiba vraćaju nataloženi sediment s morskog dna natrag na površinu, što se očituje u povećanju širine lica plaže iznad razine mora i stvaranju berme.



Slika 2.7 Godišnja promjena u profilu plaže [1]

Postoje dva mehanizma koja opisuju **kretanje sedimenta uzduž linije obale**, prikazani na Slici 2.8 [1]. Valovi se približavaju obali pod određenim kutom, što rezultira stvaranjem struje paralelne s obalom (SPO). Prilikom uspinjanja na obalu valovi podižu čestice sedimenta i prenose ga u smjeru njihovog nailaska, a pri povratku ga okomito na obalu povlače natrag u

more. Ovaj pomak se naziva litoralni pomak ili *drift*. Turbulencije unutar zone loma vala zatim miješaju materijal u suspenziju, koju odnosi SPO. Na isti način se odvija i transport materijala s morskog dna. Ukoliko plaže nisu zaštićene, navedeni procesi mogu odnijeti velike količine materijala godišnje.



Slika 2.8 Transport sedimenta u smjeru linije obale [1]

Proračun transporta sedimenta je dosta kompleksan i uključuje pažljivo ispitivanje valova, struja, parametara plaže i sedimenta kao ulaznih podataka za numerički model. Kod plaža kod kojih je uzdužni transport sedimenta ograničen konačnom količinom sedimenta, potrebno je razlikovati potencijalni stupanj transporta izračunat formulama od stvarnog stupnja transporta koji je u pravilu manji od potencijalnog i uključuje sve gubitke i doprinose sedimenta. Snažno nevrjeme može ukloniti materijal (potencijalni stupanj) za koji su bile potrebne godine da se nataloži (stvarni stupanj).

Plaže uglavnom sadrže različite frakcije sedimenta. Veće frakcije se pretežno nalaze na strmijim dijelovima profila blizu obale i pomiču se driftom u zoni uspinjanja vala, dok se finiji materijal u dubljim dijelovima profila prenosi strujama paralelnim s obalom što se jednostavno može zaustaviti adekvatnim zahvatima u prostoru.

Transport sedimenta uzduž obale je povezan s gradijentom energije. Tok energije odnosno valna snaga \bar{P} (Nm/s) između valnih zraka je:

$$\bar{P} = nCEb \quad (2.23)$$

i kako je prosječna valna snaga po jedinici duljine plaže jednaka:

$$\bar{P}' = \frac{nCEb}{b/\cos\alpha} = nCE \cos\alpha \quad (2.24)$$

uzdužna komponenta valne snage je:

$$P_a = (nCE \cos\alpha) \sin\alpha = \frac{1}{2} nCE \sin 2\alpha \quad (2.25)$$

Uvrštavajući izraze za energiju i valnu brzinu na području loma vala:

$$C_b \rightarrow \sqrt{gd_b} \quad (2.26)$$

$$E_b = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 \quad (2.27)$$

te izraz za indeks loma vala:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} \quad (2.28)$$

dobije se:

$$P_{ab} = \frac{1}{16} \frac{\rho g^{3/2}}{\gamma_b^{1/2}} H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b \quad (2.29)$$

Kod nepravilnih valova se za određivanje valne snage uzima značajna valna visina H_S :

$$P_{asb} = \frac{1}{16} \frac{\rho g^{3/2}}{\gamma_{sb}^{1/2}} H_{sb}^{5/2} \sin 2\alpha_b \quad (2.30)$$

CERC izraz (1984.) pomoću kojeg se računa glavina stupnja transporta sedimenta glasi:

$$I_S = 0.39 P_{asb} \quad (2.31)$$

gdje je I_S uronjena težina transportiranog sedimenta [1].

Ako se uzme u obzir da je gustoća sedimenta $\rho_S=1800$ (kg/m³) i poroznost $n=0.32$, prethodna jednadžba se može pretvoriti u količinu sedimentnog transporta (m³/god):

$$Q_C = 2.2 \cdot 10^6 \cdot \frac{H_{sb}^{5/2}}{\gamma_{sb}^{1/2}} \sin 2\alpha_b \quad (2.32)$$

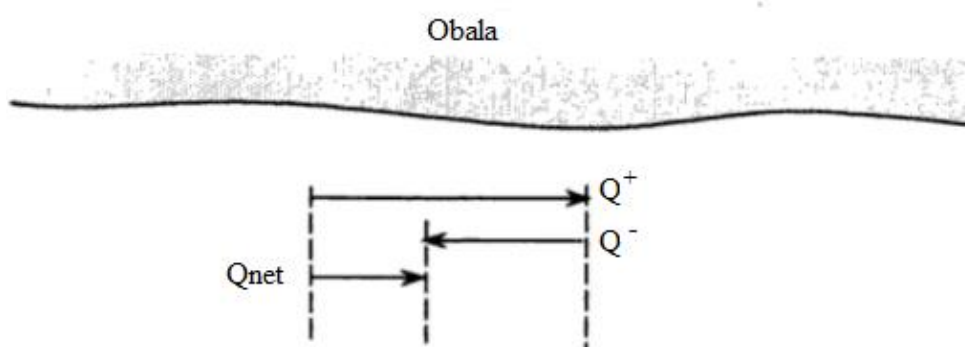
Kod približno ravnih plaža $\gamma_{sb}=0.56$:

$$Q_C = 2.9 \cdot 10^6 \cdot H_{sb}^{5/2} \sin 2\alpha_b \text{ [m}^3/\text{god]} \quad (2.33)$$

odnosno:

$$Q_C = 330 \cdot H_{sb}^{5/2} \sin 2\alpha_b \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (2.34)$$

Suma transporta sedimenta prema desnoj Q^+ i lijevoj strani Q^- uslijed djelovanja različitih incidentnih valova se naziva bruto stupanj transporta sedimenta, a razliku čini neto stupanj transporta sedimenta Q_{net} (slika 2.9). [1]



Slika 2.9 Stupanj i smjer transporta sedimenta [1]

3. MONITORING PLAŽE PETROVAC U CRNOJ GORI

Crnogorsko primorje bogato je stotinama prirodnih plaža, čiji nanos pristiže iz riječnih tokova i bujica koje se ulijevaju u more, te procesa erozije pod djelovanjem valova. Većina plaža je pjeskovitog i pjeskovito - šljunkovitog materijala, manji broj od isključivo šljunkovitog materijala, dok samo kod nekolicine plaža prevladavaju obluci. Problemi nestabilnosti obale crnogorskog primorja dugo godina nisu bili predmet ozbiljnijih istražnih radova jer su bili malih razmjera, obuhvaćali su relativno kratke dionice, a erozija plaža nije bila pretjerano izražena. Nakon nekoliko jakih olujnih nevremena i značajnih oštećenja objekata i plaža, otvorila se potreba ozbiljnijem pristupu problema nestabilnosti obala.

Javno poduzeće za upravljanje morskim dobrom Crne Gore, u suradnji sa Centrom za marinski i priobalni inženjering i konzalting „Adriatik“ iz Kotora, pokrenulo je 2004. godine projekt „Monitoring obalnih procesa“. Sa snimanjem započetim u svibnju 2006. godine monitoring se proširio na plažu Sutomore, a u studenom 2007. godine na gradsku plažu Sveti Stefan.

Prvi korak je bio utvrđivanje položaja i broja evidencijskih profila na plažama, ovisno o intenzitetu procesa erozije, a potom jasno obilježavanje referentnih točaka kao ključnih podataka svih profila. Uz zahtjev da se snimanja poprečnih profila plaže započnu od referentne točke, važnost se davala orijentaciji poprečnih profila, koji su uglavnom bili okomiti na smjer pružanja obale.

Plaže su snimane svako godišnje doba, kako bi se dobila slika kvantitativnih pokazatelja trenutnih stanja i promjena u jesenskim i zimskim periodima sa najintenzivnijom erozijom, te ljetnih perioda sa smanjenim intenzitetom valova. Nakon svakog snimanja provodila se analiza dobivenih podataka i usporedba rezultata u odnosu na prethodna mjerenja, prikazana grafički i tekstualno u obliku tablica s podacima o licu plaže iznad razine mora i podmorskom dijelu profila. Periodički su pisani izvještaji sa osvrtom na značajne promjene pojedinih plaža. [8]

Tablica 3.1. sadrži popis zaprimljenih rezultata monitoringa plaže Petrovac od strane Naručitelja - Javnog poduzeća za upravljanje morskim dobrom Crne Gore, za period od 2010. - 2011. godine. [8]

Tablica 3.1 Popis rezultata monitoringa za period od 2010. - 2011. godine

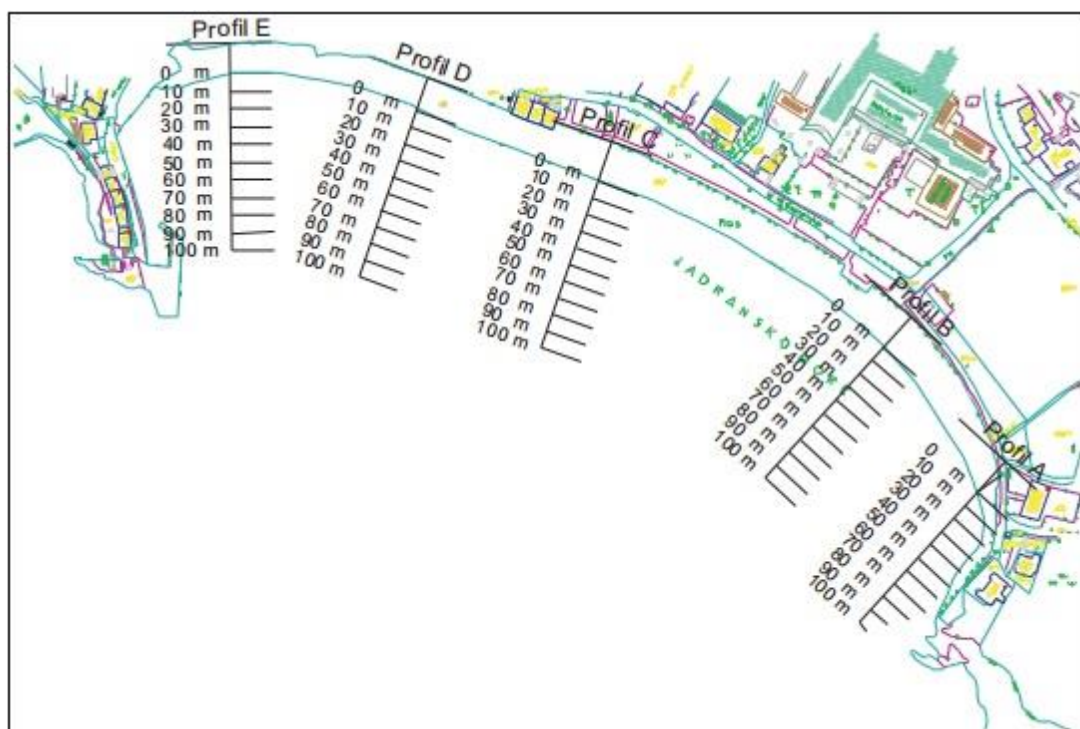
Monitoring 2010. - 2011.	<ul style="list-style-type: none">▪ Monitoring plaža 1. mjerenje 2010. - 2011.pdf▪ 2. mjerenje 2010. -2011.pdf▪ 3. mjerenje 2011. plaža.pdf
--------------------------	---

Kronološki redoslijed mjerenja profila i broj abecedno imenovanih poprečnih profila na plaži Petrovac nalazi se u Tablici 3.2, a slike u nastavku poglavlja su preuzete iz [8].

Tablica 3.2 Popis mjerenja na plaži Petrovac

Plaža	Broj profila	2010.-2011.
Petrovac	5 / 4 *	18.09.2010. 13.01.2011. 30.05.2011.

*Na plaži Petrovac se od uključivo 03.05.2006. snimanja i mjerenja poprečnog profila E ne vrše.



Slika 3.1 Situacija plaže Petrovac sa položajem mjernih profila A-E



Slika 3.2 Profil A plaže Petrovac - stanje 01.04.2010.

Tablica 3.3 Monitoring plaže Petrovac od 2010. - 2011. godine

Monitoring 2010. – 2011.		
	Datum	Zapažanja
1.	18.09.2010.	<p>Podaci sa snimanja su uspoređeni s onima od 14.07.2004., a kao značajne promjene navedene su sljedeće:</p> <p>Profil A: Lice plaže iznad razine mora nasuto je i prošireno za 6,6 m pijeska. Na središnjem podmorskom dijelu primijećena je jaka erozija pijeska i formiranje podmorskog praga 65 m od obale.</p> <p>Profil B: Uočeno je da je širina lica plaže povećana za 9,35 m, a dno profila nasuto za 65 cm pijeska. U podmorskom dijelu zabilježena su tri praga na 40 m, 70 m i 100 m od obale.</p> <p>Profil C: Na nadmorskom dijelu je uočena jaka erozija pijeska u odnosu na snimanje iz srpnja 2004. i debljina naslaga pijeska smanjena je za 410 cm. Zabilježeno je smanjenje širine lica plaže za 14,2 m i veoma jaka erozija duž cijelog podmorskog dijela, s gubitkom 74 cm debljine pijeska.</p>
2.	13.01.2011.	<p>Profil A: U usporedbi s podacima iz siječnja 2006., uočeno je smanjenje širine lica plaže iznad razine mora za 4,4 m i debljine sloja pijeska za 40 cm. U podmorskom dijelu 50 m od obale formiran je prag, gdje je zabilježena srednja erozija pijeska.</p> <p>Profil B: U odnosu na snimanja iz siječnja 2006. evidentirano je smanjenje širine lica plaže iznad razine mora za 6,8 m, a na dnu profila erozija 36 cm pijeska. Uočena su dva praga na 40 m i 60 m od obale.</p> <p>Profil C: Na licu plaže iznad razine mora zabilježeno je povećanje debljine pijeska za 28 cm, a u podmorskom dijelu jaka erozija u odnosu na mjerenja iz siječnja 2006., sa formiranim pragom na 75 m od obale.</p>
3.	30.05.2011.	<p>U odnosu na prethodno snimanje, naznačeno je da je na profilu A nasuto 10 m pijeska te je zabilježeno povećanje debljine lica plaže iznad razine mora 40 cm. Na dnu profila je registrirano intenzivno taloženje pijeska i porast debljine za 42 cm.</p> <p>Kod profila C zabilježeno je smanjenje širine lica plaže za 9,1 m u odnosu na prethodno snimanje i uočena je velika erozija pijeska uz smanjenje debljine naslaga za 132 cm. U podmorskom dijelu zabilježena je jaka erozija.</p>



Slika 3.3 Profil A plaže Petrovac - stanje 18.09.2010.



Slika 3.4 Profil A plaže Petrovac - stanje 30.05.2011

4. PREGLED DOSTUPNE PROJEKTNE DOKUMENTACIJE

U sklopu pregleda raspoložive dokumentacije pregledana je raspoloživa projektna dokumentacija dostavljena Projektantu od strane Naručitelja. U nastavku je pregled ključnog za rješenje projektnog zadatka predmetne plaže.

4.1. Studija hidrografije Budvanskog zaliva

Navedena studija bazira se na eksperimentalnom pristupu autora čime se na fizikalnom modelu MJ 1:150 simulira proces valovanja i strujanja morskih struja u obuhvatu Budvanskog zaljeva. Osim koncepta opisani su uvjeti modelske sličnosti kao i set ulaznih podataka za koje su provedene analize. Mjerodavne valne visine i periodi usvojeni su od strane autora prema nejasno definiranom postupku. Valni parametri definirani su za svaki od tri smjera zasebno:

- Smjer SE; $H = 3$ m, $T = 6, 7.5$ i 9 s
- Smjer S; $H = 3, 4.5, 6$ i 7 m, $T = 6, 7.5$ i 9 s
- Smjer SW; $H = 3, 4.5$ i 6 m, $T = 6, 7.5$ i 9 s

Analizom valovanja i mjerenjima valnih visina na modelu dolazi se do odgovora na pitanje djelovanja vala na bedeme grada Budve, maritimna svojstva unutar akvatorija luke Budva, važnost izgradnje lukobrana, stabilnosti Avalske plaže te se definira potreba izgradnje podmorskog praga u neposrednoj blizini bedema starog grada Budva.

Mjerenja strujanja proizašla fizikalnim modelom ukazuju na postojanje morskih struja vrtložnog karaktera, a skalarnih svojstava takvih da je utjecaj na transport sedimenta zanemariv uz napomenu kako je važnost istih ključna dominantno za izmjenu morskih masa i pospješenje ekoloških uvjeta u akvatoriju zaljeva. Tehnologija mjerenja brzina morskih struja, kako je opisano, temelji se na mjerenjima dvama teodolitima, i uz upotrebu trasera. Ovakav pristup nezamisliv je u suvremenom vremenu te nalaže uzimanje dobivenih vrijednosti brzina sa rezervom. Navedena mjerenja morskih struja provedena u prosincu 1984. godine ukazuju na srednje vrijednosti brzina morskih struja u intervalu 1.3 do 9.0 cm/s, dok se maksimalne vrijednosti istih kreću u intervalu 2.3 do 20.1 cm/s. Važno je napomenuti kako su maksimalne brzine struja dobivene u uvjetima razvijene brzine vjetra od 7 cm/s, uz valove visine 1.5 m i to u površinskom sloju. Uzevši u obzir kinematička svojstva vjetrovnog vala na profilu vodnog stupca ispod površine i činjenicu kako brzine i ubrzanja čestica vala opadaju s dubinom, maksimalne dobivene vrijednosti morskih struja treba uzeti s rezervom. Konačan zaključak

upućuje na mjerodavne brzine morskih struja koje su zanemarive u pogledu transporta sedimenta u akvatoriju Budvanskog zaljeva.

4.2. Projekat revitalizacije plaže u Petrovcu, PIM-INCEST d.o.o., Tivat, 2001.

Projekt je izrađen 2001. godine, nakon olujnog nevremena koje je u studenom 1999. godine pogodilo Sutomore i Petrovac. Prirodni položaj plaže u Petrovcu rezultirao je izloženošću zapadnog dijela plaže na vjetrovne valove iz smjera juga i jugoistoka (u refrakciji i difrakciji), dok je istočni dio plaže izložen valu smjera SW (garbin). U studenom 1999. g. pojava jakog juga rezultirala je rušenjem obalnog zida u dužini od cca 160 m i devastaciji nezaštićenog dijela obale o čemu svjedoče dostupne fotografije s mjesta događaja. Širina plaže od cca 30 m pod djelovanjem vala iz smjera juga u potpunosti je odnesena te je temelj obalnog zida ostao nezaštićen, a konstantni udari valova doveli su do puknuća i rušenja obalnog zida. Tijekom 2000. g. izvedeni su radovi sanacije obale u sklopu kojih je izveden novi obalni zid koji je u odnosu na srušeni položen cca 2.5 m prema kopnu i koji se do danas održao u nepromijenjenim gabaritima te predstavlja zaštitu od erozije uslijed djelovanja vjetrovnih valova na ovoj lokaciji. [7]

U svrhu dugoročne zaštite obale i njezine održivosti, autori su predvidjeli izgradnju podmorskog praga koji je podijeljen na tri zasebna podmorska praga, svaki dužine 75 m sa međusobnim razmakom od 35 m. Izgradnja je predviđena na dubini 4 – 4.5 m, unutar same uvale u Petrovcu. Predviđeno rješenje potencijalno se može usvojiti kao relevantno uz napomenu kako je potrebno:

- Numeričkim modelom valovanja utvrditi zonu loma vala pod utjecajem uplićavanja, difrakcije i refrakcije te definirati položaj grebena izvan zone loma vala, prema otvorenom moru. Na ovaj način eventualna izgradnja podmorskog praga dobiva puni smisao za širok spektar uvjeta na moru, a naročito za valne događaje karakterizirane većim valnim visinama jer će se osigurati lom vala na samom grebenu čime će se minimizirati energija vala a time i erozivni učinak vala na plažu.
- Laboratorijski ispitati konstruktivne parametre podmorskog praga s obzirom da dostupna analitička i numerička rješenja ne garantiraju valjanost u općim uvjetima. U sklopu laboratorijskih istraživanja učinka podmorskog praga na svojstva vala posebno je potrebno definirati: težinu školjere, kotu platoa praga, nagib pokosa prema obali i prema otvorenom moru te širinu platoa praga u smjeru normale na obalnu crtu.

- Samo dimenzioniranje podmorskog praga potrebno je provesti sukladno rezultatima modela valovanja koji će dati uvid u utjecaj procesa prisutnih u zoni utjecaja dna na sam val, a što nije striktno samo proces refrakcije kako je navedeno.

U pogledu meteoroloških podataka, autorima su na raspolaganju podaci o vjetru za razdoblje 1981.-1995. g. Dužina raspoloživog niza je zadovoljavajuća, vodeći se dosadašnjim iskustvima analiziranja vremenskih serija u pogledu postizanja uvjeta statističke stacionarnosti (barem drugog reda), ali uz napomenu kako skala osrednjavanja u navedenom nizu nije navedena. Ovisno o skali osrednjavanja (desetminutni srednjak, satni srednjak ili udar) proizlaze koeficijenti neravnomjernosti koji ukazuju na odstupanja maksimalnih vrijednosti vjetra. Stoga se podatak o maksimalnoj brzini vjetra južnog smjera u iznosu 17.5 m/s uzima s rezervom. Učestalost vjetrova južnog smjera u ukupnom uzorku iznosi 14,5 %, dok je učestalost vjetrova iz kvadranta (SW-SE) osim smjera s 11,1 %. Osim dominantne učestalosti, smjer S karakterističan je i po najdužoj duljini privjetrišta (425 km) u odnosu na ostale smjerove. Zabilježene učestalosti smjerova valova odgovaraju u većoj mjeri smjerovima vjetra. Za potrebe definiranja parametara vjetrovnog vala autori su koristili SMB metodu. Ova metoda dobivena je temeljem iscrpnih ispitivanja u sjevernim morima koja u pogledu svojstava valova i povezanosti s vjetrom odstupa u odnosu na područje Mediterana. Važno je napomenuti kako uvjeti ograničenja duljinom privjetrišta i trajanjem vjetra nisu obrađeni u projektu. S obzirom na velike duljine privjetrišta za očekivati je da će se u većem djelu godine ostvarivati valni događaji u uvjetima ograničenošću trajanjem puhanja što u procjeni mjerodavnih parametara vala treba uzeti u obzir.

Ispitivanja granulometrijskog sastava materijala sa područja plaže u Petrovcu ukazala su na heterogeni sastav materijala čiji je d_{50} u rasponu 1.1-50 mm. Najmanje zrno (0.6-2.0 mm) nalazi se u centralnom dijelu plaže, na profilu koji prolazi bujičnim kanalom kojim materijal prihranjuje plažu. Krupniji granulati zabilježeni su prema istočnom i zapadnom rubu plaže, ali i na većim dubinama u području akvatorija plaže u Petrovcu. [7]

U prijedlogu nasipanja plaže u Petrovcu propisan je granulati 0.6-6 mm što odgovara srednjoj veličini zrna na plaži u količini od cca 32000 m³ materijala. U pogledu navedenog potrebno je za konačan prijedlog rješenja stabilnosti plaže u Petrovcu uzeti u obzir:

- Prirodni materijal kojim se vrši prihranjivanje plaže najčešće je nusprodukt u kamenolomu te je kao takav neobrađen i izrazito nepravilne geometrije sa oštrim rubovima. Iskustva ukazuju da materijal kojim je plaža prihranjena prije ljetne sezone već

po završetku sezone poprimi pravilniji oblik, najčešće oblutak glatkih rubova koji su posljedica međusobnog trošenja zrna materijala pod utjecajem valova. Tijekom vremena prihranjeni materijal se troši te mu se smanjuje promjer. Stoga prilikom odabira materijala za prihranjivanje treba odabrati zrno nešto veće od onog prirodnog koji se nalazi u zoni prihranjivanja.

- Izračunata količina materijala za potrebe proširenja lica plaže za cca 30 m u konačnici će premašiti iznos od 32000 m³. Poprečni presjeci nasutog materijala koji je predviđen za prihranjivanje ukazuju na nepravilno odabrane poprečne presjeke pogotovo u dijelu lica plaža. Lice plaže formira se pod djelovanjem vala i redovito je konkavnog karaktera čiji se profil definira prema literaturi [1, 6]. Takav profil zahtijevat će veću količinu materijala za potrebe proširenja lica plaže za navedenih 30 m.



Slika 4.1 Obala u Petrovcu devastirana nevremenom 18. i 19. 11.1999.



Slika 4.2 Obala u Petrovcu devastirana nevremenom 18. i 19. 11.1999.



Slika 4.3 Obala u Petrovcu devastirana nevremenom 18. i 19. 11.1999.

5. OBILAZAK PLAŽE PETROVAC 25.03.2017.

Obilazak plaže Petrovac obavljen je u jutro 25.03.2017.g. s ciljem utvrđivanja činjeničnog stanja na terenu. Zapadni dio plaže uređen je u obliku male lučice za privez brodova nepotpunog "U" oblika od armiranog betona. Kruna lukobrana nalazi se na mjestu s dubinom 3 m. Nekih 50 m prema istoku nalazi se prvi bujični kanal u blizini kojeg su zabilježeni tragovi nedavne aktivacije. Cijelom dužinom plaže izveden je betonski zid za potrebe zaštite od erozivnog djelovanja valova. U zapadnom dijelu radi se o zidu izvedenom 2000. g. nakon nevremena koje je pogodilo Petrovac u studenom 1999.g.. Širina plaže na dan posjeta varira uzduž plaže. Na zapadnom dijelu lice plaže je širine cca 20 m i u toj širini zadržano je do sredine plaže, odakle se plaža prema svom istočnom rubu sužava.

Po sredini plaže, na udaljenosti 800 m od obale nalazi se otočić Sveta Nedelja a iza njega i otočić Katič. S obzirom na malu širinu otočića od svega 175 m u uzdužnom, odnosno 60 m u poprečnom smjeru (Katič je nešto manjih dimenzija) uočava se kako otočići ne pružaju zaštitu plaže Petrovac od valova iz smjera SW i S. Utjecaj na valno polje zasigurno postoji, međutim zbog udaljenosti od 800 m od obalne crte osigurava se razvoj vala uslijed ogiba incidentnog vala oko samih otočića za smjer SW.

Na svom istočnom rubu lice plaže je značajno smanjeno i postepeno iščezava. Ovaj oblik upućuje na dominantan utjecaj valova iz smjera S i SE koji uzrokuju transport sedimenta prema zapadnom rubu plaže.

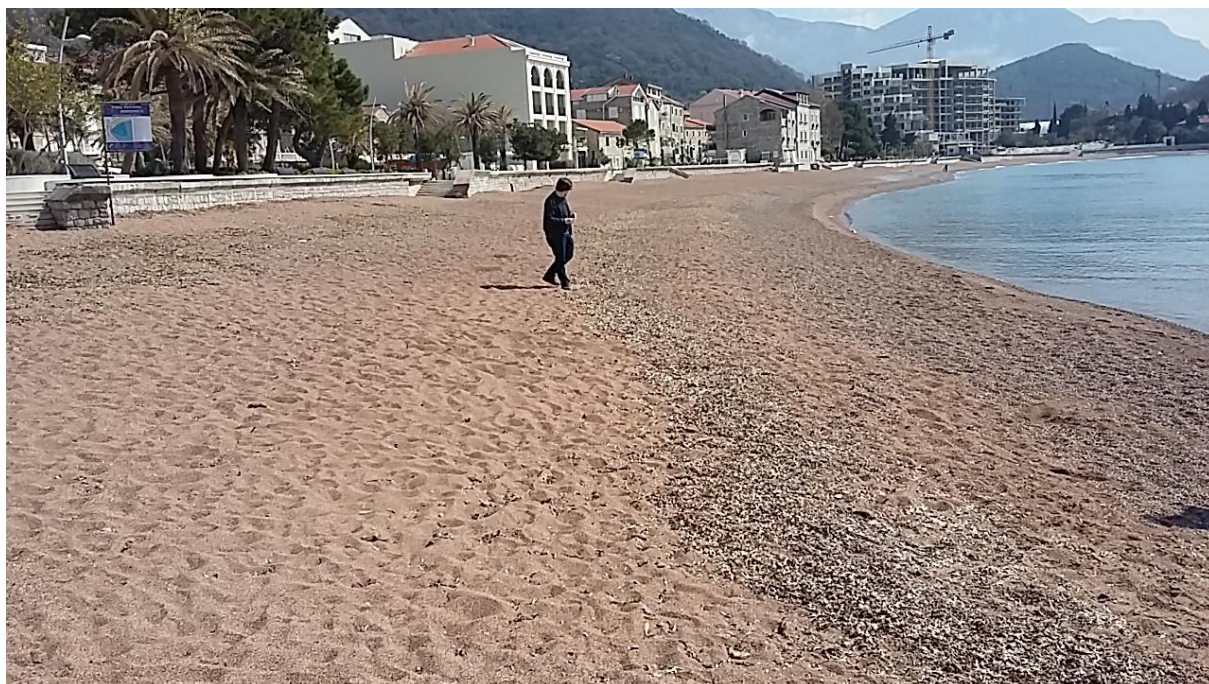
Duž plaže postoji više otvora u obalnom zidu, od kojih je manji broj otvora kanala bujičnog karaktera kojima se plaža prirodno prihranjuje.



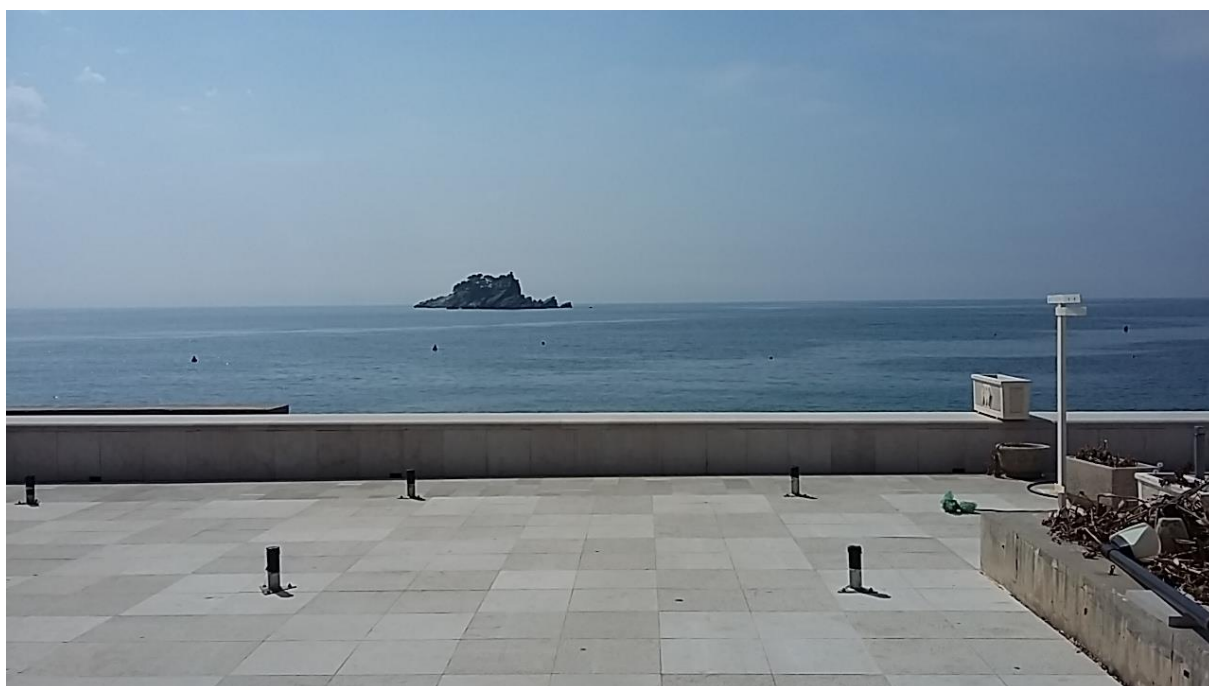
Slika 5.1 Stanje obalnog zida i gata na zapadnom rubu plaže Petrovac 25.03.2017.



Slika 5.2 Stanje obalnog zida i bujični kanal 50 m od zapadnog ruba plaže Petrovac 25.03.2017.



Slika 5.3 Pogleda na istočni dio plaže Petrovac prema 25.03.2017.



Slika 5.4 Pogled prema otočiću Sveta Nedelja s platoa plaže Petrovac 25.03.2017.



Slika 5.5 Bujični potok na istočnom dijelu plaže Petrovac 25.03.2017.



Slika 5.6 Stanje obale na istočnom rubu plaže Petrovac 25.03.2017.



Slika 5.7 Detalj obalnog zida na istočnom rubu plaže Petrovac 25.03.2017.

6. ODREĐIVANJE PRIVJETRIŠTA

Postoji širok spektar metoda i proračunskih modela namijenjenih rješavanju problematike definiranja dužine privjetrišta za razvoj vala. Jednu od metoda korištenu za proračun efektivnih privjetrišta razvio je Saville (1954. g.). Pretpostavio je da vjetar prenosi energiju na vodenu površinu ne samo u smjeru njegovog dominantnog puhanja, već i u smjerovima koji imaju odklon od glavnog smjera za +/- 45°.

Postupak definiranja duljine privjetrišta provodi se tako da se postavi glavna zraka u smjeru puhanja vjetra, zatim se rotacijom od po 6° u smjeru kazaljke na satu (u prvom koraku 3° a potom svaka ostala po 6°) i suprotno od smjera kazaljke na satu postavljaju pravci kroz istu ishodišnu točku. Određuju se duljine svake zrake od ishodišta do prve točke prepreke te se proračunava suma njihovih projekcija na centralnu zraku. Ta suma se dijeli sa sumom kosinusa kutova centralne zrake i ostalih rotiranih zraka, čime se dobiva vrijednost duljine efektivnog privjetrišta:

$$F_{EFF} = \frac{\sum_i f_i \cos^2 \theta_i}{\sum_i \cos^2 \theta_i} \quad (6.1)$$

gdje je:

F_{EFF} - efektivno privjetrište (km),

θ_i - kut odklona zrake vale u odnosu na zraku smjera za koji se izračunava efektivno privjetrište (°),

f_i - duljina privjetrišta zrake otklonjene za kut θ_i (km).

Druga metoda za definiranje duljine privjetrišta je takozvana metoda jednostavnih privjetrišta, gdje su privjetrišta određena preko aritmetičkih sredina privjetrišta u koracima od po 3° (sveukupni raspon 24°). Ova metoda je konzervativnija od prethodno navedene, ali je jednostavnija za primjenu. Obje metode pretpostavljaju da se smjer vala podudara sa smjerom vjetra, te da je oblik energije spektra neovisan o obliku privjetrišta.

Rezultati prikaza izračuna duljine efektivnih privjetrišta za smjerove vjetra koji su kritični u pogledu predmetne lokacije i zahvata definirani su temeljem slijedećih kriterija:

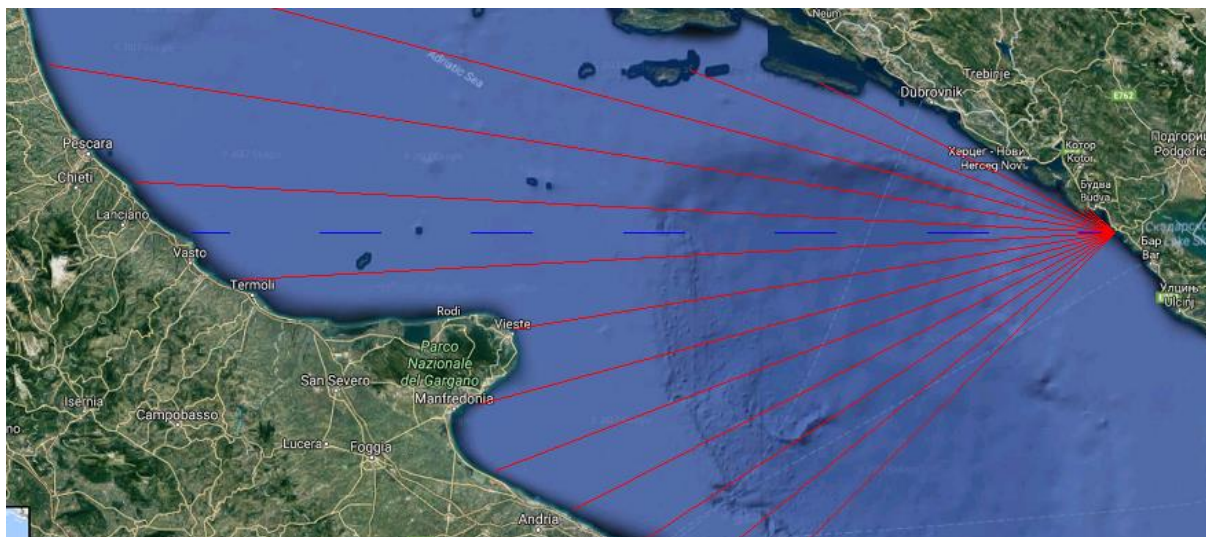
- Položaj zahvata u odnosu na prostorni položaj otoka i kopna u okolini

- Značajne učestalosti većih brzina vjetra za pojedine smjerove
- Značajne duljine privjetrišta kao dominantan faktor u definiranju valne visine

Na ovaj način definirana su četiri mjerodavna smjera za koje će biti analiziran i prognoziran vjetrovni val:

- W
- SW
- S
- SE

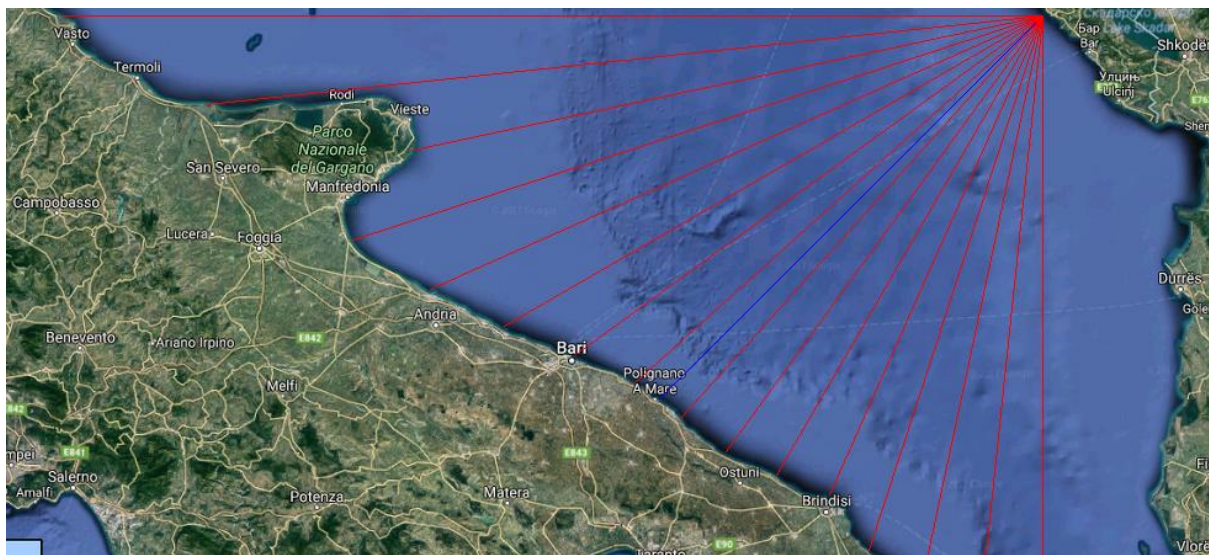
Grafički prikaz izračuna efektivnog privjetrišta za svaki od navedenih smjerova prikazan je grafički (Slika 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 i 6.5) i analitički (Tablice 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 i 6.5). Važno je napomenuti kako su rezultati dobiveni metodom Savillea. Metoda jednostavnih privjetrišta daje značajna odstupanja rezultata za slučaj kada je izražena nepravilnost obalnih crta, što je slučaj u konkretnom obuhvatu. Manji raspon zraka za izračun privjetrišta za ovakav slučaj rezultira većim duljinama efektivnog privjetrišta. Usporedbom parametara vala definiranim na osnovu duljina privjetrišta dobivenih metodom Savillea i metodom jednostavnih privjetrišta, kao mjerodavna je odabrana metoda Savillea. U nastavku su prikazani postupci definiranja privjetrišta za zahvat Petrovac na situacijskim nacrtima sa glavnim i sporednim zrakama te prikazom rezultata proračuna efektivnog privjetrišta.



Slika 6.1 Smjer W

Tablica 6.1 Smjer W

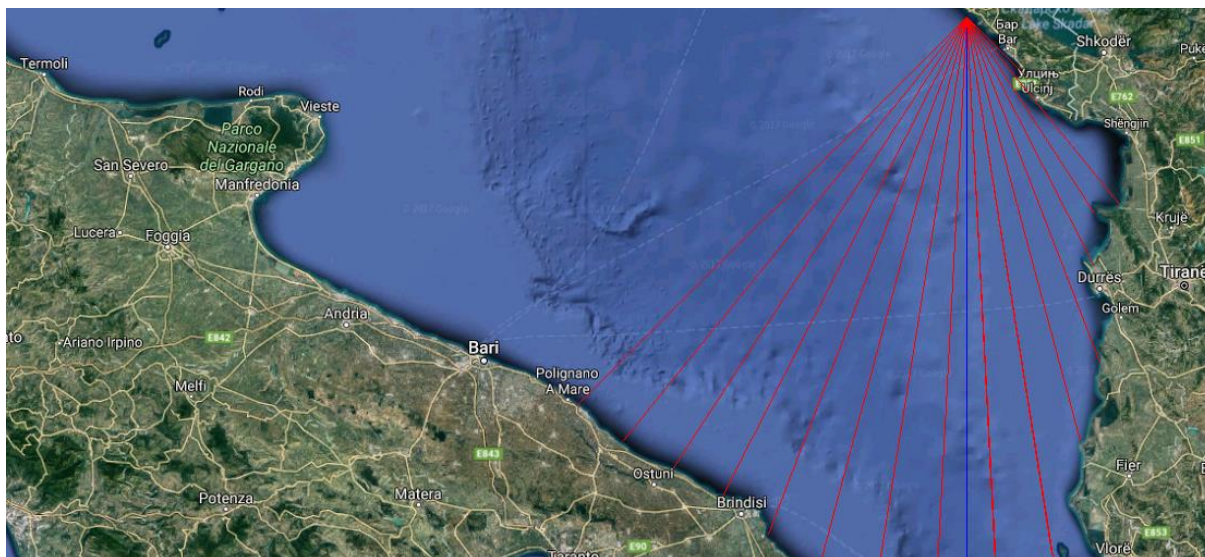
α [°]	f_i [km]	$\cos(\alpha)$	$f_i * \cos^2(\alpha)$
-45	191,322	0,707	95,661
-39	199,844	0,777	120,697
-33	210,407	0,839	147,993
-27	226,619	0,891	179,911
-21	247,443	0,934	215,664
-15	246,139	0,966	229,651
-9	227,300	0,988	221,737
-3	326,050	0,999	325,157
3	366,242	0,999	365,238
9	402,956	0,988	393,095
15	424,980	0,966	396,512
21	172,747	0,934	150,561
27	124,449	0,891	98,799
33	14,059	0,839	9,888
39	13,586	0,777	8,205
45	10,506	0,707	5,253
F_{EFF} [km]	208,741	14,200	2964,024



Slika 6.2 Smjer SW

Tablica 6.2 Smjer SW

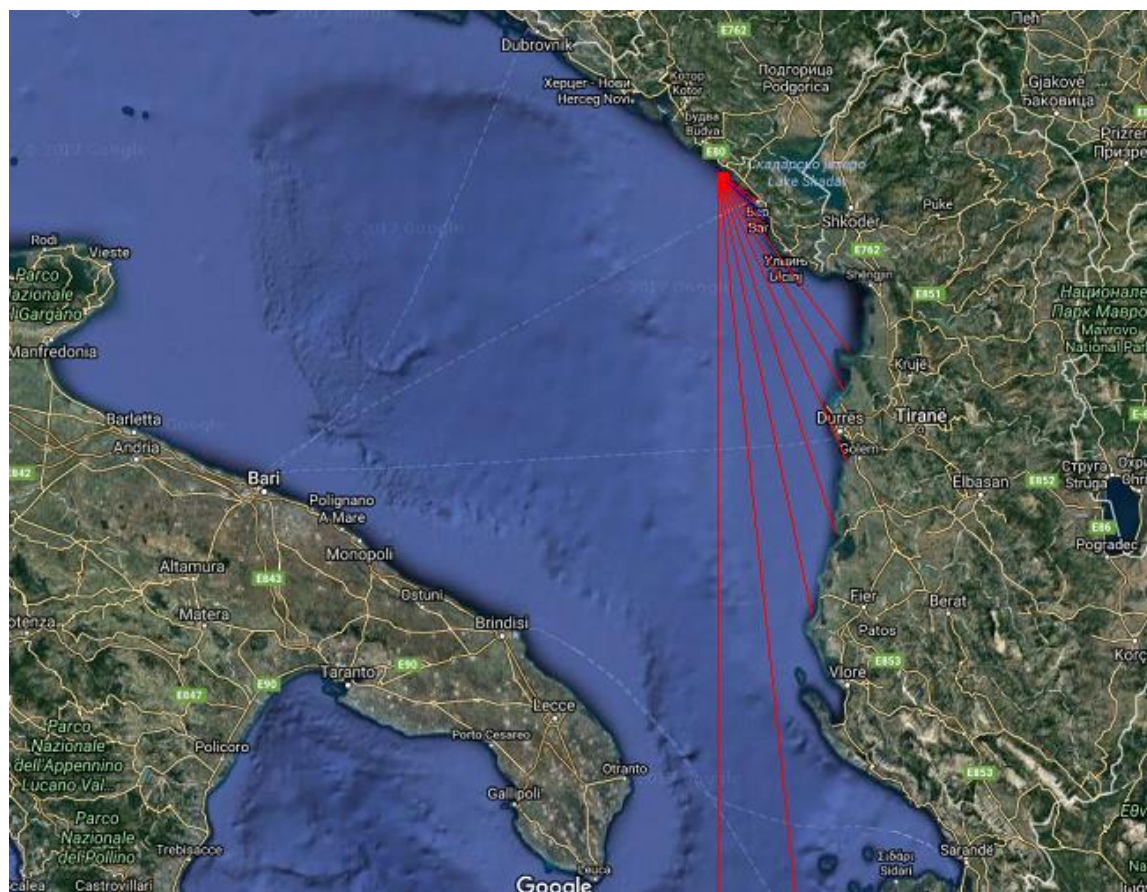
α [°]	f_i [km]	$\cos(\alpha)$	$f_i * \cos^2(\alpha)$
-45	1319,520	0,707	659,760
-39	219,551	0,777	132,599
-33	202,948	0,839	142,747
-27	196,916	0,891	156,330
-21	183,675	0,934	160,086
-15	186,047	0,966	173,584
-9	188,904	0,988	184,281
-3	189,707	0,999	189,187
3	192,023	0,999	191,497
9	202,052	0,988	197,107
15	217,683	0,966	203,101
21	235,108	0,934	204,913
27	254,343	0,891	201,921
33	225,452	0,839	158,576
39	294,963	0,777	178,145
45	342,997	0,707	171,498
F_{EFF} [km]	232,778	14,200	3305,334



Slika 6.3 Smjer S

Tablica 6.3 Smjer S

α [°]	f_i [km]	$\cos(\alpha)$	$f_i * \cos^2(\alpha)$
-45	28,252	0,707	14,126
-39	85,344	0,777	51,544
-33	82,838	0,839	58,265
-27	97,951	0,891	77,763
-21	130,721	0,934	113,933
-15	155,024	0,966	144,639
-9	213,940	0,988	208,705
-3	1239,950	0,999	1236,554
3	1116,790	0,999	1113,731
9	1084,870	0,988	1058,321
15	202,319	0,966	188,766
21	195,522	0,934	170,412
27	189,807	0,891	150,687
33	189,769	0,839	133,478
39	192,370	0,777	116,183
45	194,250	0,707	97,125
F_{EFF} [km]	347,493	14,200	4934,231



Slika 6.4 Smjer SE

Tablica 6.4 Smjer SE

α [°]	f_i [km]	$\cos(\alpha)$	$f_i * \cos^2(\alpha)$
-45	2,678	0,707	1,339
-39	2,932	0,777	1,771
-33	3,255	0,839	2,290
-27	3,717	0,891	2,951
-21	4,410	0,934	3,843
-15	6,256	0,966	5,837
-9	16,992	0,988	16,576
-3	17,661	0,999	17,613
3	26,780	0,999	26,707
9	82,581	0,988	80,560
15	94,009	0,966	87,711
21	120,143	0,934	104,713
27	141,175	0,891	112,077
33	168,740	0,839	118,686
39	1089,770	0,777	658,173
45	1322,960	0,707	661,480
F_{EFF} [km]	133,971	14,200	1902,328

7. ODREĐIVANJE PARAMETARA DUBOKOVODNOG VALA

Za potrebe definiranja mjerodavnih ulaznih podataka (srednje satne brzine vjetra, maksimalne godišnje satne brzine ili maksimalni udar vjetra potrebno je doći do minimalnih vremena trajanja puhanja vjetra za definiranu duljinu privjetrišta, a s ciljem detekcije eventualnog postizanja stanja potpuno razvijenog mora. Za probleme ovog tipa može poslužiti Wilsonov izraz:

$$t_{min} = 43 \cdot \frac{X^{0,73}}{U^{0,46} \cdot g^{0,27}} \quad (7.1)$$

gdje je:

t_{min} - minimalno vrijeme puhanja vjetra (s),

X - duljina privjetrišta (m),

U - brzina vjetra (m/s).

Za rješavanje problema definiranja minimalnog privjetrišta za zadani vjetar i pripadajuću skalu osrednjavanja izraz se preoblikuje:

$$X_{min} = \sqrt[0,73]{\frac{t \cdot U^{0,46} \cdot g^{0,27}}{43}} \quad (7.2)$$

U prethodnom izrazu sve varijable zadržavaju identično značenje i mjerne jedinice kao u izrazu za minimalno vrijeme puhanja vjetra. Za definiranje minimalnog privjetrišta koristit će se brzine vjetra (Tablica 7.1) za pet prethodno odabranih smjerova vjetra sa trajanjem koje odgovara skali osrednjavanja.

Za mjerodavne brzine iz Tablice 7.1 i pripadajuća vremena puhanja vjetra kontrolira se tzv. *fetch limited* i *duration limited* uvjet, tj. ograničenost duljinom privjetrišta, odnosno trajanjem vjetra u pogledu razvoja valne visine do stanja potpune razvijenosti. Oba uvjeta utječu u konačnici na mjerodavnu visinu vala.

Tablica 7.1 Mjerodavne brzine vjetra

U [m/s]	F _{EFF} [km]	Wilson	Goda	Goda						
		t _{MIN} [h]	t _{MIN} [h]	t [h]	F _{MIN} [km]	F [km]	Hs [m]	T[s]	smjer (°)	
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
7.2	208.74	19.88	19.90	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-90	W
7.2	208.74	19.88	19.90	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-90	W
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
0.0	0.00	0.00	0.00	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	208.74	15.04	15.06	8	87.74	87.74	2.08	5.47	-90	W
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
13.2	347.49	21.82	21.85	8	87.74	87.74	2.08	5.47	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW

2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	232.78	33.80	33.84	16	83.45	83.45	0.18	1.91	-135	SW
12.6	232.78	16.64	16.66	16	220.23	220.23	2.60	6.44	-135	SW
12.6	0.00	0.00	0.00	8	85.21	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
19.2	0.00	0.00	0.00	8	111.10	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	208.74	19.88	19.90	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-90	W
2.7	133.97	22.58	22.61	24	145.43	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	24	145.43	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	24	145.43	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	24	269.78	133.97	0.19	2.00	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	24	269.78	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	24	269.78	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	133.97	14.38	14.40	8	59.89	59.89	0.81	3.55	135	SE

2.7	232.78	33.80	33.84	16	83.45	83.45	0.18	1.91	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	16	83.45	83.45	0.18	1.91	-135	SW
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	347.49	45.28	45.34	8	32.28	32.28	0.16	1.68	180	S
12.6	0.00	0.00	0.00	8	85.21	0.00	0.00	0.00	0	n
18.6	0.00	0.00	0.00	8	108.90	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	133.97	10.88	10.90	8	87.74	87.74	2.08	5.47	135	SE
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	232.78	33.80	33.84	24	145.43	145.43	0.19	2.02	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	24	145.43	145.43	0.19	2.02	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	24	145.43	145.43	0.19	2.02	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	347.49	45.28	45.34	8	32.28	32.28	0.16	1.68	180	S
2.7	232.78	33.80	33.84	24	145.43	145.43	0.19	2.02	-135	SW
7.2	232.78	21.52	21.55	24	269.78	232.78	1.12	4.50	-135	SW
2.7	232.78	33.80	33.84	24	145.43	145.43	0.19	2.02	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	347.49	28.84	28.87	16	154.80	154.80	1.03	4.22	180	S
2.7	347.49	45.28	45.34	16	154.80	154.80	0.20	2.03	180	S
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	208.74	19.88	19.90	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-90	W
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	208.74	19.88	19.90	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-90	W
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S

2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
13.2	133.97	10.88	10.90	32	586.16	133.97	2.39	5.99	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
12.6	232.78	16.64	16.66	8	85.21	85.21	1.94	5.29	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	232.78	16.29	16.31	8	87.74	87.74	2.08	5.47	-135	SW
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
0.0	133.97	0.00	0.00	8	0.00	133.97	0.00	0.00	135	SE
6.39	232.78	22.74	22.77	16	143.59	143.59	0.84	3.84	-135	SW
6.39	232.78	22.74	22.77	16	143.59	143.59	0.84	3.84	-135	SW
13.2	347.49	21.82	21.85	8	87.74	87.74	2.08	5.47	180	S
20.1	232.78	13.42	13.44	8	114.35	114.35	3.93	7.28	-135	SW
13.2	347.49	21.82	21.85	16	226.78	226.78	2.80	6.67	180	S
20.1	347.49	17.98	18.01	16	295.57	295.57	5.46	9.03	180	S
20.1	232.78	13.42	13.44	8	114.35	114.35	3.93	7.28	-135	SW
2.7	347.49	45.28	45.34	8	32.28	32.28	0.16	1.68	180	S
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S

2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	16	154.80	154.80	1.03	4.22	180	S
2.7	347.49	45.28	45.34	16	154.80	154.80	0.20	2.03	180	S
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
13.2	133.97	10.88	10.90	32	586.16	133.97	2.39	5.99	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	32	586.16	133.97	0.19	2.00	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	133.97	14.38	14.40	24	395.23	133.97	0.99	4.12	135	SE
13.2	133.97	10.88	10.90	24	395.23	133.97	2.39	5.99	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	24	395.23	133.97	0.99	4.12	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
13.2	232.78	16.29	16.31	8	87.74	87.74	2.08	5.47	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	208.74	15.04	15.06	8	87.74	87.74	2.08	5.47	-90	W
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
13.2	133.97	10.88	10.90	16	226.78	133.97	2.39	5.99	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	133.97	10.88	10.90	16	226.78	133.97	2.39	5.99	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	226.78	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	133.97	14.38	14.40	24	269.78	133.97	0.99	4.12	135	SE

7.2	133.97	14.38	14.40	24	269.78	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	24	269.78	133.97	0.19	2.00	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	8	59.89	59.89	0.81	3.55	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW
2.7	347.49	45.28	45.34	8	32.28	32.28	0.16	1.68	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
12.6	133.97	11.12	11.13	8	85.21	85.21	1.94	5.29	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
12.6	0.00	0.00	0.00	8	85.21	0.00	0.00	0.00	0	n
12.6	0.00	0.00	0.00	8	85.21	0.00	0.00	0.00	0	n
19.2	0.00	0.00	0.00	8	111.10	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n

7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
18.6	133.97	9.29	9.31	8	108.90	108.90	3.50	6.91	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	208.74	19.88	19.90	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-90	W
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
12.6	133.97	11.12	11.13	16	287.16	133.97	2.25	5.83	135	SE
19.2	133.97	9.16	9.17	16	287.16	133.97	3.93	7.38	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
13.2	0.00	0.00	0.00	8	87.74	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	232.78	33.80	33.84	16	154.80	154.80	0.20	2.03	-135	SW
7.2	232.78	21.52	21.55	16	154.80	154.80	1.03	4.22	-135	SW
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW

2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
0.0	0.00	0.00	0.00	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0	n
0.0	0.00	0.00	0.00	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0	n
0.0	0.00	0.00	0.00	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	8	59.89	59.89	0.81	3.55	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	208.74	19.88	19.90	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-90	W
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
7.2	232.78	21.52	21.55	8	59.89	59.89	0.81	3.55	-135	SW
20.1	0.00	0.00	0.00	8	114.35	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	8	59.89	59.89	0.81	3.55	135	SE
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	208.74	31.21	31.25	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-90	W
2.7	232.78	33.80	33.84	8	32.28	32.28	0.16	1.68	-135	SW
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
2.7	133.97	22.58	22.61	16	83.45	83.45	0.18	1.91	135	SE
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	133.97	22.58	22.61	8	32.28	32.28	0.16	1.68	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	347.49	28.84	28.87	8	59.89	59.89	0.81	3.55	180	S
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
7.2	133.97	14.38	14.40	16	154.80	133.97	0.99	4.12	135	SE
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	0.00	0.00	0.00	8	59.89	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
2.7	0.00	0.00	0.00	8	32.28	0.00	0.00	0.00	0	n
7.2	133.97	14.38	14.40	8	59.89	59.89	0.81	3.55	135	SE

Uvjete je moguće provjeriti i prema Godi:

$$t_{min} = X^{0,73} \cdot U^{-0,46} \quad (7.3)$$

$$X_{min} = t^{1,37} \cdot U^{0,63} \quad (7.4)$$

pri čemu je:

t_{min} - minimalno vrijeme puhanja vjetra (h),

X - duljina privjetrišta (km),

U - brzina vjetra (m/s).

Za vrijednosti raspoloživih brzina vjetra definirana su minimalna potrebna trajanja puhanja za postizanje stanja potpuno razvijenog mora. Za slučaj kada je vrijeme puhanja kraće od minimalnog potrebnog, ukupna energija vjetra ne može se prenijeti na površinu mora u duljini efektivnog privjetrišta, pa se za mjerodavnu duljinu privjetrišta do postizanja stanja potpuno razvijenog mora usvaja minimalna potrebna duljina. Za slučaj kada je vrijeme puhanja duže od minimalnog potrebnog, stanje potpuno razvijenog mora nije postignuto jer je efektivna duljina privjetrišta manja od minimalne. Za mjerodavnu duljinu privjetrišta do postizanja stanja potpuno razvijenog mora u ovom slučaju usvaja se efektivna duljina privjetrišta.

Zbog tromosti mora i potrebnog vremena za postizanje stanja razvijenog mora, brzine vjetra koje predstavljaju maksimalne udare zanemaruju se jer su vremena puhanja nekoliko redova veličine manja od minimalnog potrebnog vremena puhanja.

Po definiranju mjerodavnih privjetrišta Goda definira izraze i nomograme za definiranje značajnih valnih visina i pripadajućih perioda:

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0,3 \left\{ 1 - \left[1 + 0,004 \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{1/2} \right]^{-2} \right\} \quad (7.5)$$

$$\frac{gT_s}{2\pi U} = 1,37 \left\{ 1 - \left[1 + 0,008 \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{1/3} \right]^{-5} \right\} \quad (7.6)$$

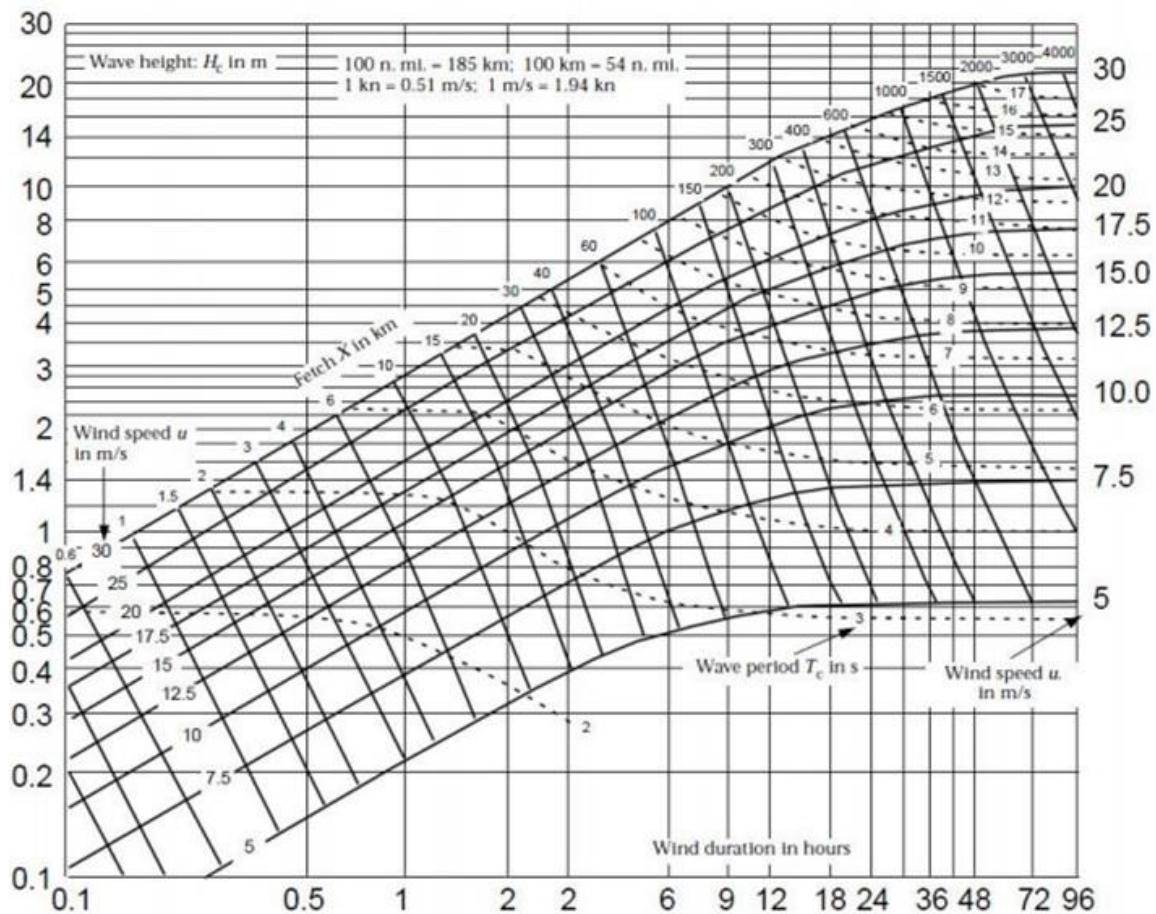
gdje je:

H_s - značajna valna visina [m],

X - duljina privjetrišta [m],

U - brzina vjetra [m/s].

Drugi način definiranja parametara dubokovodnog vala jest temeljem Groen - Dorrenstein nomograma koji su nastali na osnovu mjerenja na području Mediterana. Brzina vjetra, duljina privjetrišta i trajanja vjetra na ovom nomogramu međusobno su povezani.



Slika 7.1 Groen - Dorrenstein nomogram

8. CG WAVE

CG WAVE je dvodimenzionalni model koji služi za predviđanje propagacije i transformacije vala i njegovih parametara kao što su valna visina, brzina i tlakovi. Također modelom je moguće prikazati pojavu valne refrakcije uslijed dubine, difrakciju vala od objekata i dubine, refleksiju vala od objekata i obalne linije, trenje od dna, lom vala i utjecaj plutajućih objekata. Model je primjenjiv za različite vrste domena i za različite rasporede dubina. Ulazni parametri za CG WAVE su smjer incidentnog vala, period vala i valna visina ili spektralna kombinacija ovih parametara.

Model koristi SMS grafičko sučelje, koje je napravljeno kao pomoć pri vizualizaciji zadavanja parametara modela i za pomoć prikaza rezultata. Za proračun difrakcije i refrakcije vala software rješava eliptičnu parcijalnu diferencijalnu jednadžbu blagog nagiba:

$$\nabla \times (CC_g \nabla \emptyset) + k^2 CC_g \emptyset = 0 \quad (8.1)$$

gdje je:

$\emptyset(x, y)$ - funkcija razine mora,

σ - frekvencija vala,

$C(x, y)$ - brzina faze vala:

$$C(x, y) = \left(\frac{\sigma}{k} \right) \quad (8.2)$$

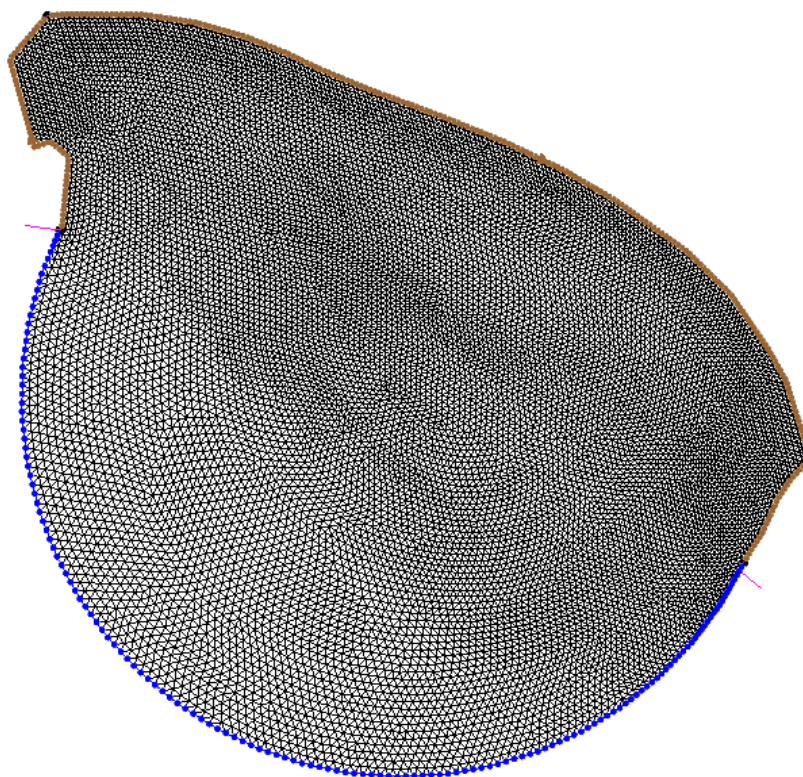
$C_g(x, y)$ - grupna brzina valova:

$$C_g(x, y) = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial k} \right) \quad (8.3)$$

$k(x, y)$ - valni broj.

Prije samog rješavanja jednadžbe potrebno je odabrati područje proračuna i zadati rubne uvjete. Prvi korak je učitavanje geodetske podloge, odnosno batimetrije u kojoj svaka točka mora sadržavati x , y i z koordinatu, te se zatim odredi područje za proračun. Određivanjem područja proračuna definiraju se rubni uvjeti tj. odredi se linija obale (mjesto gdje se spajaju more i kopno) i polukružno se definira otvorena granica mora, te se definiraju koeficijenti refleksije na obali. Software koristi metodu konačnih elemenata za rješavanje jednadžbe blagog nagiba pa je

potrebno promatrano područje diskretizirati. Diskretizacija se vrši tročvornim trokutnim elementima.



Slika 8.1 Diskretizacija područja konačnim elementima

Veličina elemenata ovisi o lokalnoj duljini vala koja ovisi o lokalnoj dubini. Rezolucija elemenata se odabire podjelom valne duljine na određeni broj točaka, preporuča se odabrati 8-12 točaka po valnoj duljini. S obzirom da se valna duljina smanjuje kako se val propagira prema obali, potrebno je definirati i minimalnu veličinu elementa kako bi imali racionalnu rezoluciju elemenata.

Ulazni parametri se mogu zadati preko incidentnog vala (monokromatski val) i preko spektralnog vala. Ukoliko se zadaju preko incidentnog, monokromatskog vala onda se zadaje amplituda vala a , period vala T i smjer vala, a za spektralni se koristi valna visina H_S , period vala T i smjer vala te dodatni parametri odabranog spektra. U ovim primjerima je korišten JONSWAP spektralni val pa su dodatni parametri: spektralni koeficijent disperzije γ i koeficijent direkcijske disperzije nn . Spektralni val se razlaže na više monokromatskih valova po frekvenciji i smjeru. Iterativnim postupkom se dobivaju rješenja za svaki val pojedinačno pa je potrebno zadati kriterij točnosti ili kriterij broja iteracija. Kada je jedan od ta dva kriterija

zadovoljen, proračun se prekida. Proračun se vrši za svaki monokromatski val posebno te se sva rješenja interpoliraju u jedno jedinstveno rješenje za odabrani spektralni val.

8.1. Primjena CG WAVE modela na plažu Petrovac

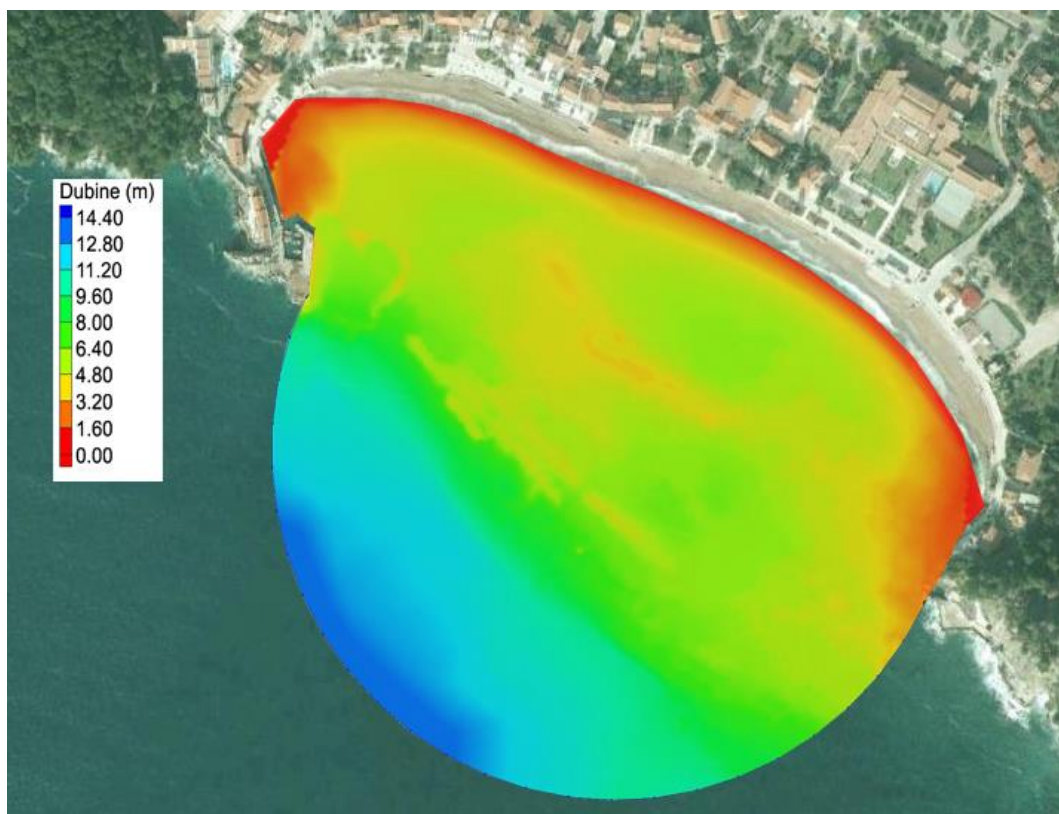
Za plažu Petrovac su odabrana tri incidenta smjera dolaska vala na koje će se vršiti proračun. Korišten je JONSWAP spektralni val.

Tablica 8.1 Ulazni parametri za model

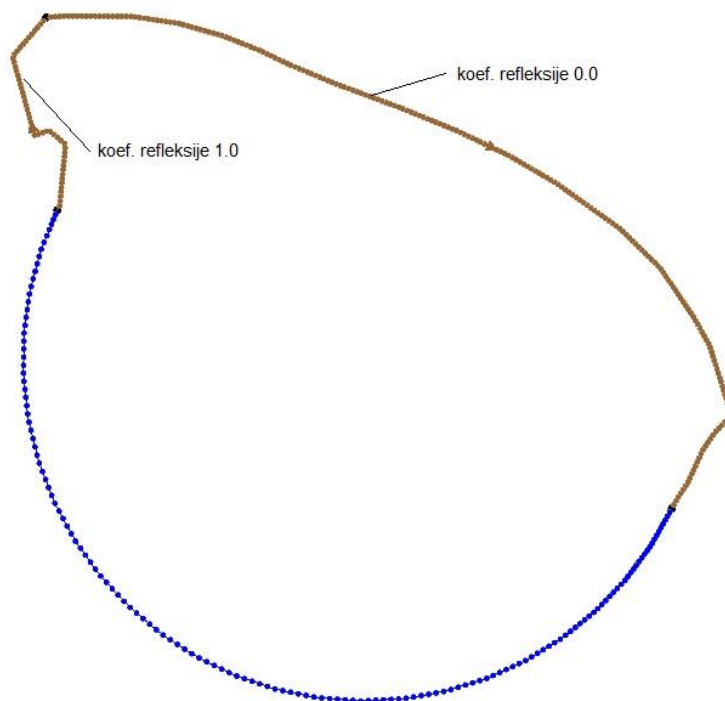
Smjer (meteorološki)	Hs (m)	T (s)	γ	nn
SW (225°)	3.93	7.28	3.3	20
S (180°)	5.46	9.03	3.3	4
SE (135°)	3.93	7.38	3.3	20

Koeficijent γ se uzima 3.3 za sve valove koji imaju period manji od 10 s, a koeficijent nn se uzima 4 za sve valove koji imaju periode manje od 10 s. S obzirom na oblik domene i nemogućnost proračuna valova koji na otvorenoj granici mora svojim smjerom izlaze iz domene i idu od obale prema otvorenom moru potrebno je povećati koeficijent nn kako bi se smanjila direkcijska disperzija.

Za sva tri smjera je odabrana ista domena kao i koeficijenti refleksije na obali.

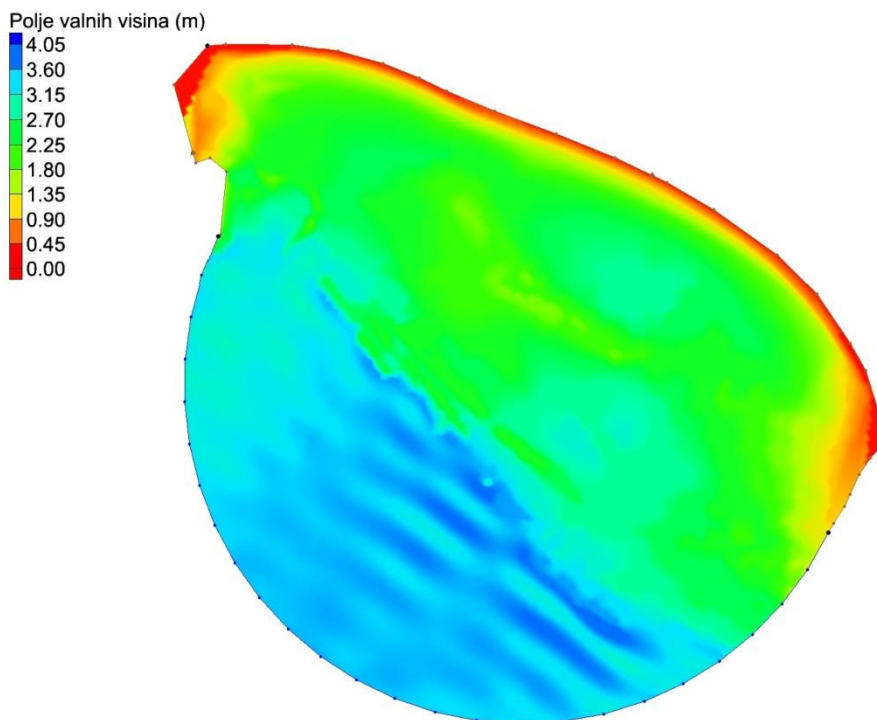


Slika 8.2 Batimetrijski prikaz plaže Petrovac



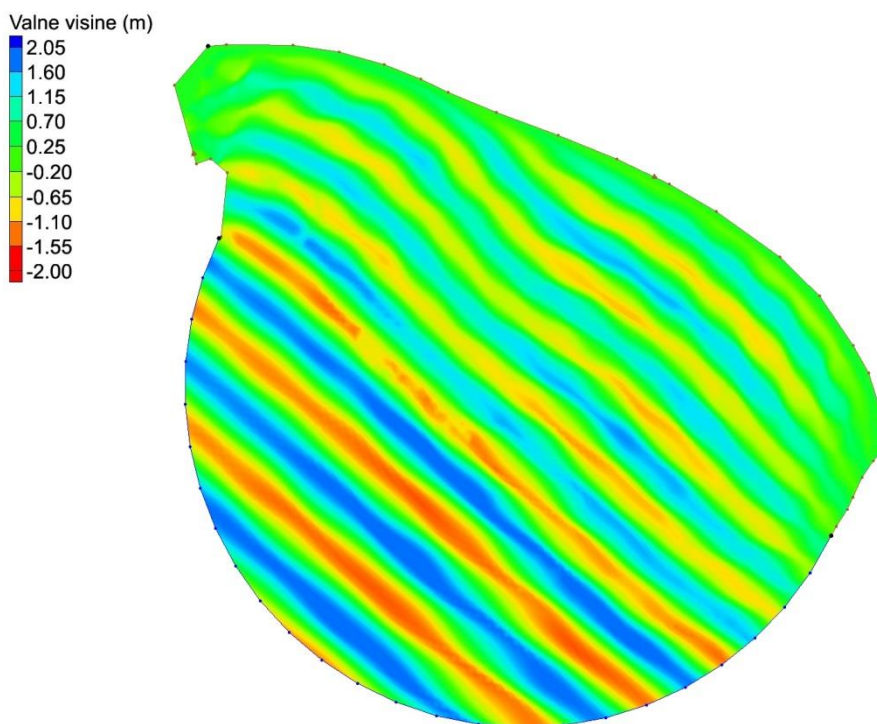
Slika 8.3 Koeficijenti refleksije obale

Rezultati proračuna za smjer SW su dani u nastavku.



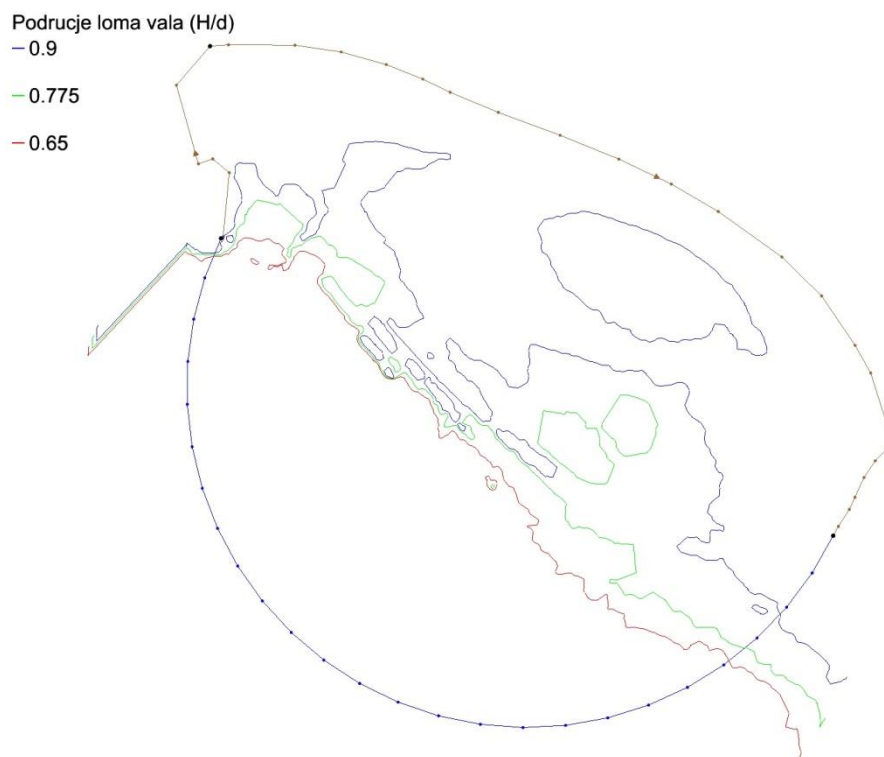
Slika 8.4 Polje valnih visina za smjer SW

Polje valnih visina predstavlja prostorni prikaz maksimalnih valnih visina koje se mogu pojaviti u svakoj točki. Također polje valnih visina predstavlja stacionarno rješenje jednadžbe modela.



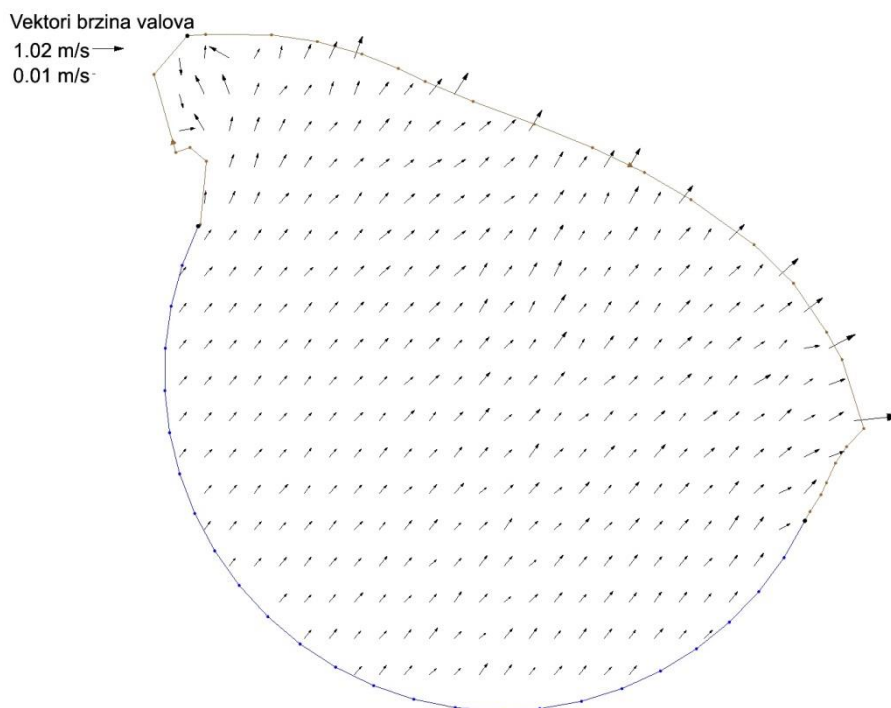
Slika 8.5 Valne visine za smjer SW

Valne visine prikazuju visinu razine mora u zadanom području u ovisnosti o vremenskoj komponenti.



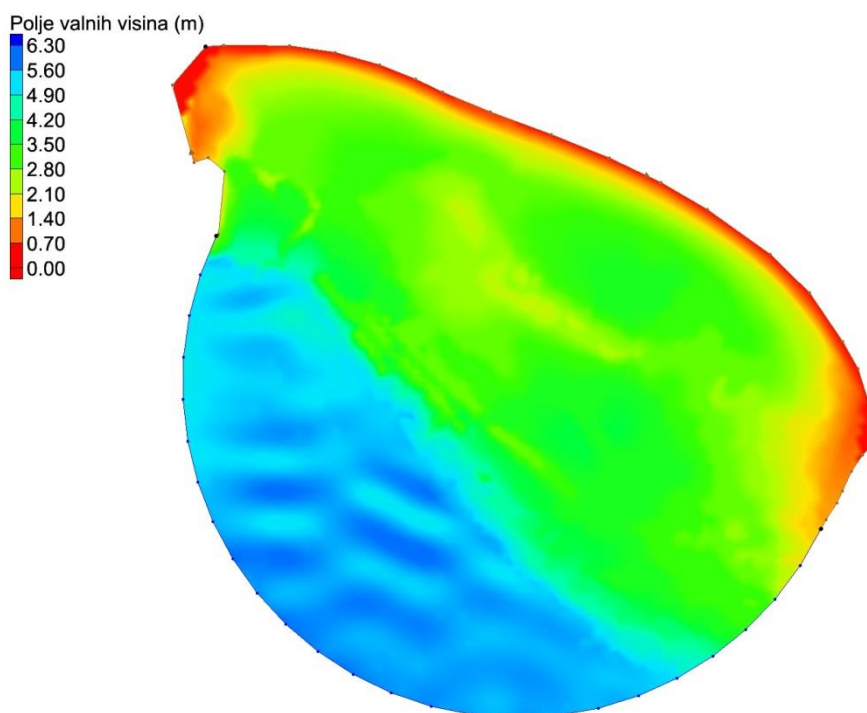
Slika 8.6 Područje loma vala za smjer SW

Područje loma vala se određuje iz kriterija omjera visine vala i dubine. Kriterij loma vala glasi $H/d \approx 0.77$. S obzirom na pogreške procjene parametara i približna rješenja modela odabire se područje od $H/d = 0.65 - 0.90$ te će unutar tog područja doći do loma vala.

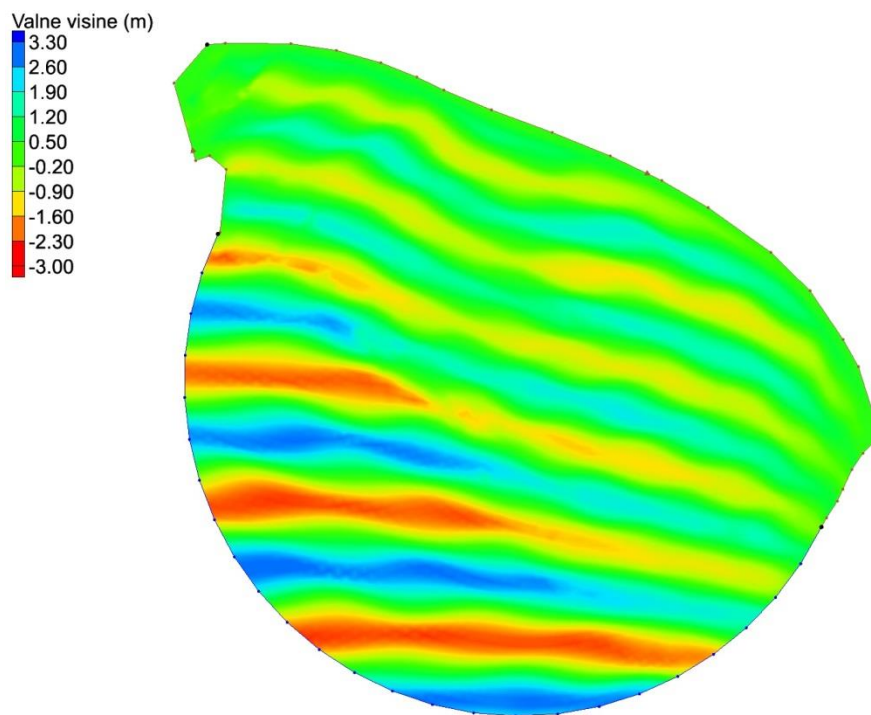


Slika 8.7 Vektori brzina valova za smjer SW

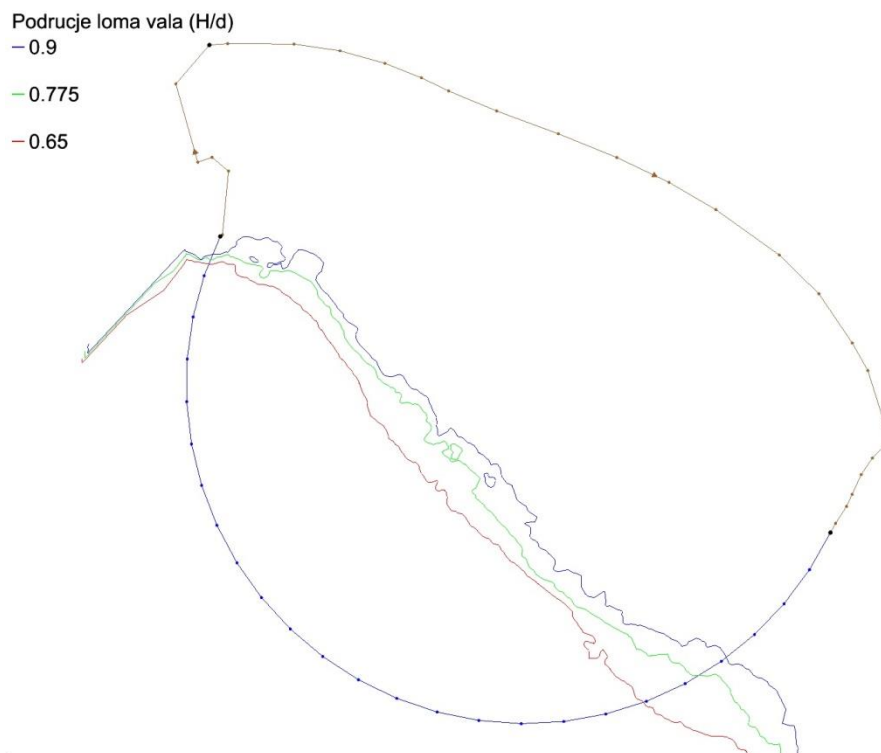
Rezultati proračuna za smjer S su dani u nastavku:



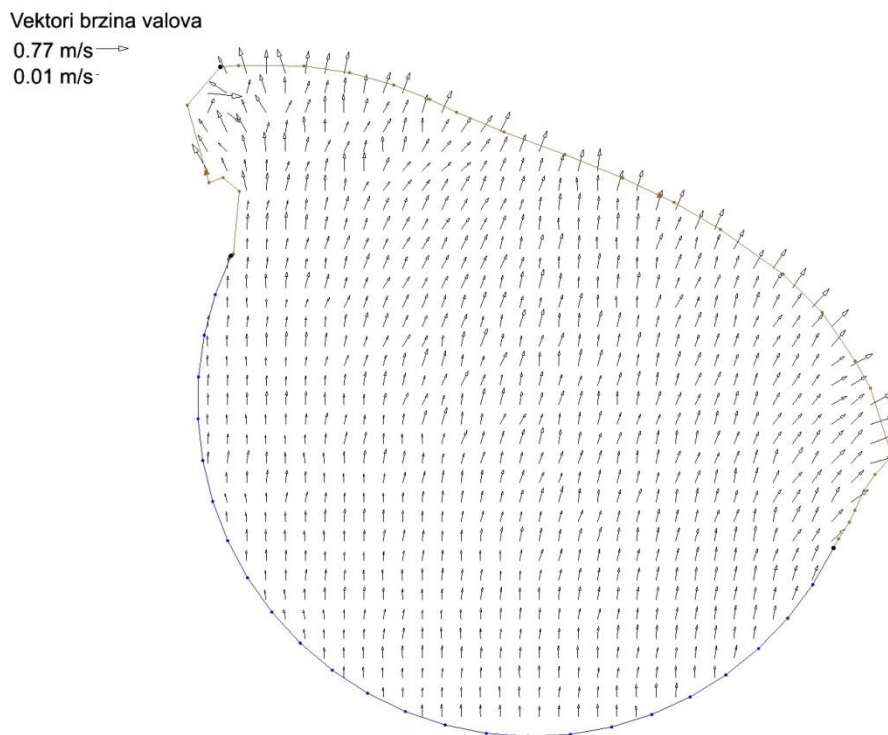
Slika 8.8 Polje valnih visina za smjer S



Slika 8.9 Valne visine za smjer S

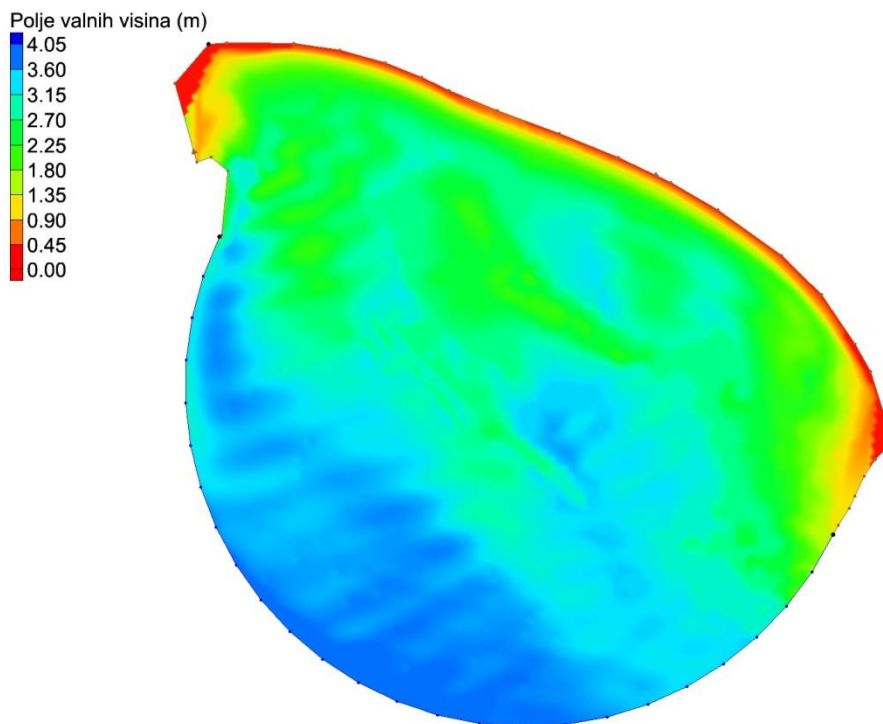


Slika 8.10 Područje loma vala za smjer S

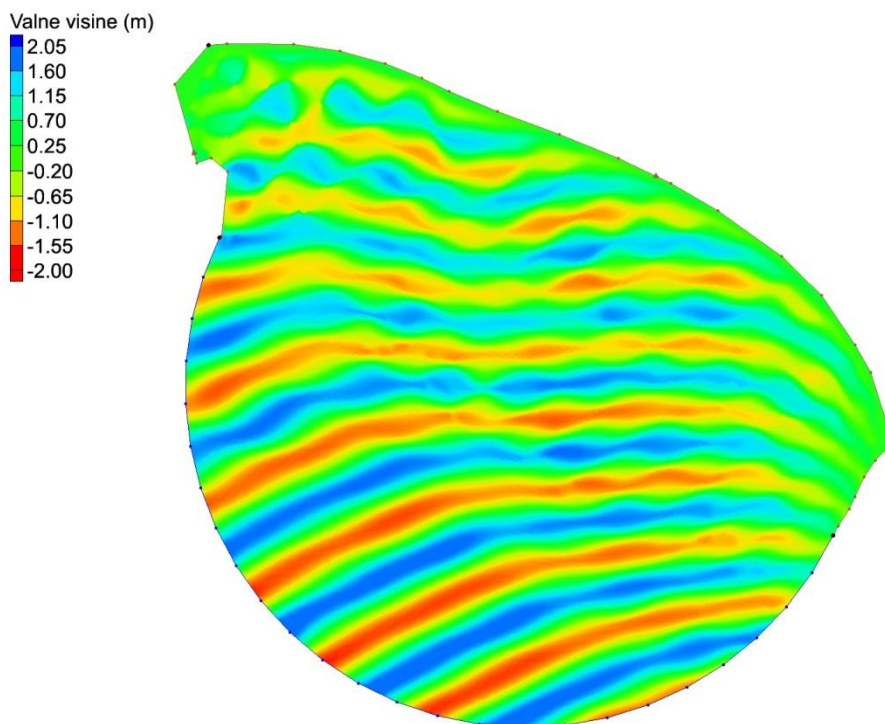


Slika 8.11 Vektori brzina valova za smjer S

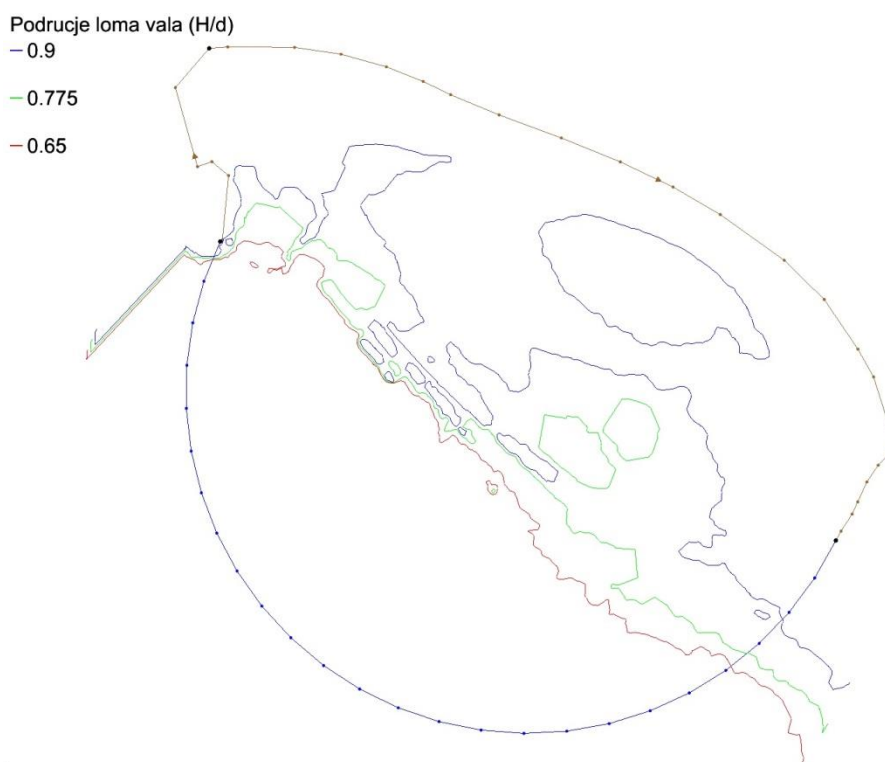
Rezultati proračuna za smjer SE su dani u nastavku:



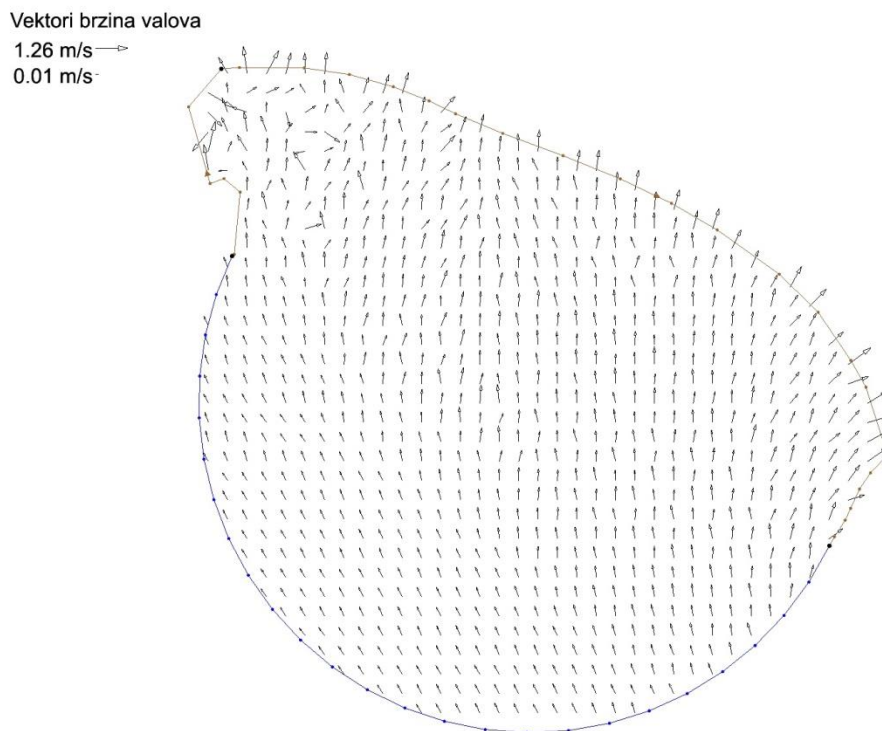
Slika 8.12 Polje valnih visina za smjer SE



Slika 8.13 Valne visine za smjer SE



Slika 8.14 Područje loma vala za smjer SE



Slika 8.15 Vektori brzina valova za smjer SE

Iz prethodnih rezultata za odabrano područje i promatrani vremenski period, vidljivo je da su dominantni valovi iz smjera juga (S), te da oni nose najviše energije. Uočava se iz vektora brzina valova kako valovi iz smjera S uzrokuju transport sedimenta plaže iz sjeveroistočnog dijela plaže prema sjeverozapadnom dijelu. U nastavku diplomskog rada će biti prikazan problem i rješenja procesa transporta sedimenta na plaži.

9. GENCADE

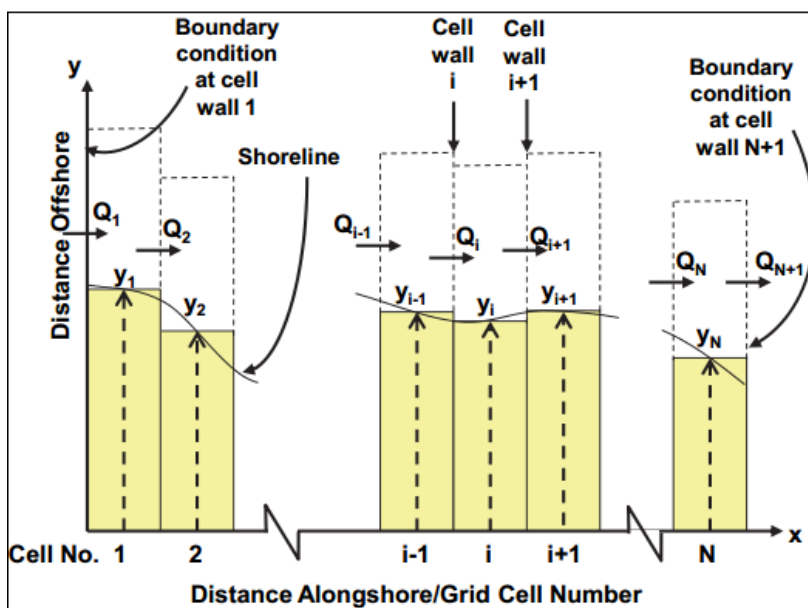
Osnovne pretpostavke na kojima se GenCade zasniva su:

- **profil plaže ostaje konstantan** odnosno prosječnog oblika, izuzev ekstremnih promjena uzrokovanih nevremenima. Iako se linija obale tijekom godine ciklički pomiče duž profila, s pripadajućim promjenama u obliku i prosječnom nagibu profila, odstupanje od prosječnog nagiba plaže duž čitavog aktivnog profila je relativno malo;
- **granice profila su konstantne** - s kopnene strane je određena visinom aktivne berme, a granica prema moru je definirana dubinom točke spoja sedimenta plaže i morskog dna;
- **sediment se uzduž obale prenosi lomljenjem valova i djelovanjem struja paralelnih s obalom;**
- **model ne proračunava struje generirane vjetrom i morskim mijenama**, ali ih je moguće linearno dodati u obliku ulaznih datoteka koje sadrže prosječne struje dobivene pomoću mjerenja ili adekvatnog programskog alata.
- **djelovanje valova na uzdužni transport sedimenta i rubni uvjeti** su glavni faktori koji utječu na dugoročno ponašanje obale. [4]

GenCade je jednodimenzionalni numerički model za izračun sedimentnog transporta i promjenu morfologije obalnog područja uslijed djelovanja valova. Iako je model moguće koristiti za izračun ponašanja obale u relativno kratkom vremenskom periodu, primjerice dana ili mjeseca, tipična simulacija obuhvaća nekoliko godina. Stoga može služiti kao alat za dugoročnu prognozu utjecaja valova na postojeću obalu i u skladu s tim predviđene zahvate u prostoru.

Prilikom diskretizacije obale, za prikaz mreže konačnih razlika koristi se desni koordinatni sustav gdje os x prati trend obale, a y os usmjerena okomito na nju pokazuje smjer prema moru (Slika 9.1 [4]).

Mreža je duž x osi podijeljena na $i = 1, \dots, N$ ćelija definiranih s $i = 1, \dots, N, (N + 1)$ zidova ćelija. Kako je stupanj transporta sedimenta funkcija valnih stanja, sve valne vrijednosti se računaju u zidovima ćelija, nakon čega se dobivaju vrijednosti promjene obale u središtu ćelija u y smjeru. [4]



Slika 9.1 Prikaz mreže konačnih razlika [4]

Problem pronosa sedimenta za potrebe definiranja dinamike geomorfoloških svojstava plaže temelji se na zakonu održanja odnosno matematičkom zapisu istog, tj. jednadžbi kontinuiteta:

$$\text{Ulaz} - \text{Izlaz} = \text{Promjena svojstva u jedinici vremena} \quad (9.35)$$

Pod pretpostavkom da se promatra jednodimenzionalni problem pronosa sedimenta, prema Slici 9.2 moguće je definirati:

$$\text{Ulaz} = Q\Delta t \text{ [m}^3\text{]} \quad (9.36)$$

$$\text{Izlaz} = Q\Delta t + \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t \text{ [m}^3\text{]} \quad (9.37)$$

$$\text{Izvor/ponor} = q \Delta x \Delta t \text{ [m}^3\text{]} \quad (9.38)$$

$$\text{Promjena svojstva} = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t \text{ [m}^3\text{]} \quad (9.39)$$

gdje je:

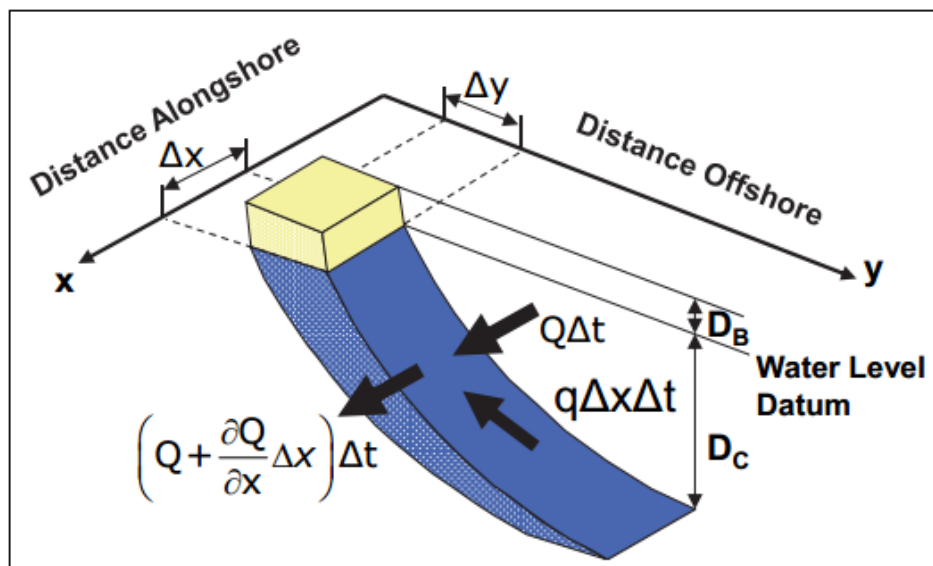
Q - stupanj promjene uzdužnog transporta sedimenta (m^3/s),

Δt - vremenski interval (s),

Δx - duljina segmenta obale u smjeru x osi (m),

q - doprinos koji povećava ili smanjuje volumen po jedinici duljine u smjeru y osi (m^2/s),

V - volumen (m^3).



Slika 9.2 Shematski prikaz ćelije [4]

Za prethodno definirane članove jednadžba kontinuiteta (9.1) je oblika:

$$Q\Delta t - Q\Delta t - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t \quad (9.40)$$

Sređivanjem izraza (9.6) dobije se:

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t = \Delta V \quad (9.41)$$

Ako se promjena volumena iskaže kao:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad (9.42)$$

i uvrsti u izraz (9.7), slijedi:

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad (9.43)$$

gdje je:

Δy - promjena položaja obale u smjeru y osi (m),

D_B - prosječna visina berme (m),

D_C - prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna (m).

Dijeljenjem jednadžbe (9.9) s Δt i uvođenjem $\Delta t \rightarrow 0$ slijedi:

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + q \Delta x = \frac{\partial y}{\partial t} \Delta x (D_B + D_C) \quad (9.44)$$

Sređivanjem prethodnog izraza dobije se:

$$\frac{1}{(D_B + D_C)} \left(-\frac{\partial Q}{\partial x} + q \right) = \frac{\partial y}{\partial t} \quad (9.45)$$

iz čega slijedi jednadžba za definiranje **stupnja promjene položaja obale $\partial y / \partial t$ (m/s)**:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (9.46)$$

Stanje loma vala se računa u svakoj točki mreže i konvertira u brzine struje paralelne s obalom, pomoću kojih se dalje računa pripadajući **stupanj promjene uzdužnog transporta sedimenta Q (m³/s)**:

$$Q = (H^2 C_g)_b \left(a_1 \sin 2\alpha_b + a_2 \frac{\partial H_b}{\partial x} \cos \alpha_b \right) \quad (9.47)$$

gdje je:

H - valna visina (m),

C_g - brzina grupe valova (m/s),

b - oznaka za trenutak loma vala,

α_b - kut koji val zatvara s normalom na obalu u trenutku loma vala (°),

a_1 - bezdimenzionalni parametar:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - p) 1.416^{5/2}} \quad (9.48)$$

a_2 - bezdimenzionalni parametar:

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - p) \tan \beta \cdot 1.416^{5/2}} \quad (9.49)$$

K_1 - koeficijent kalibracije,

K_2 - koeficijent kalibracije, $0.5K_1 < K_2 < 1.5K_1$,

$\tan\beta$ - prosječan nagib dna od obale do maksimalne dubine uzdužnog transporta,

ρ_s - gustoća sedimenta (kg/m^3),

ρ - gustoća vode (kg/m^3),

p - porozitet [4].

Za određivanje prosječnog nagiba dna od linije obale do maksimalne dubine uzdužnog transporta koristi se izraz:

$$\tan\beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT_0}} \right)^{1/2} \quad (9.50)$$

gdje je:

A - parametar koji ovisi o srednjoj veličini zrna ($\text{m}^{1/3}$),

D_{LT_0} - maksimalna dubina transporta sedimenta uzduž obale koju model računa za svaki vremenski korak iz parametara dubokovodnog vala (m):

$$D_{LT_0} = 2.28H_0 - \frac{10.9H_0^2}{L_0} \quad (9.51)$$

H_0 - valna visina u dubokom moru (m),

L_0 - valna duljina u dubokom moru (m):

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi} \quad (9.52)$$

g - gravitacijsko ubrzanje: $g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$,

T - period vala (s).

Radi određivanja lokacije loma valova potreban je izračun prosječnog oblika dna profila koji se dobiva prema izrazu:

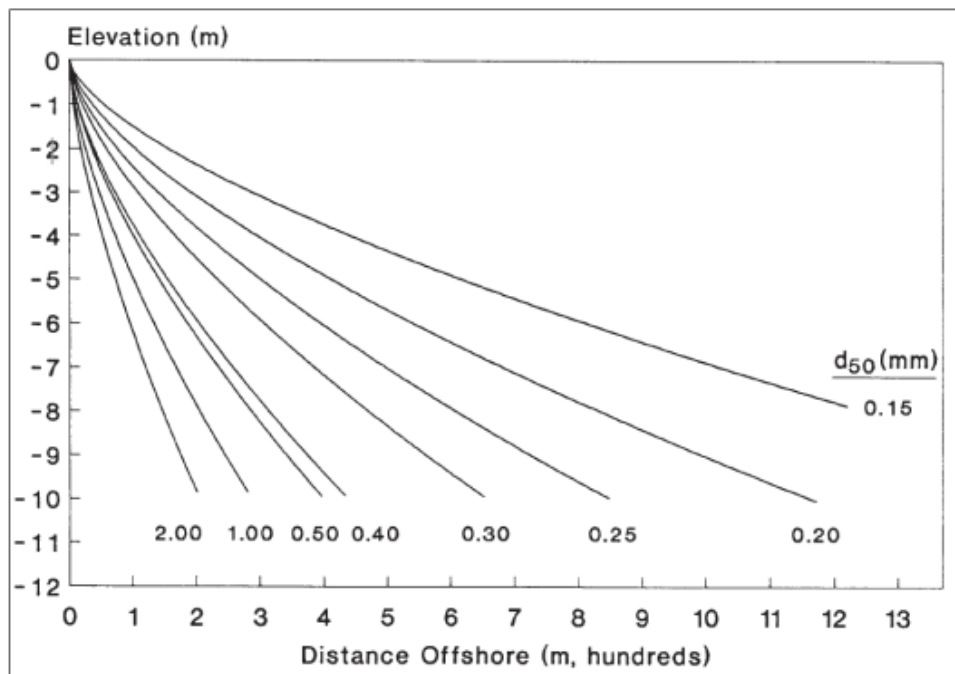
$$D = A \cdot y^{2/3} \quad (9.53)$$

gdje je:

D - dubina na udaljenosti y od obale (m),

A - parametar koji ovisi o srednjoj veličini zrna ($\text{m}^{1/3}$).

Ako su dostupni podaci o poprečnim profilima promatrane plaže, za dobivanje efektivne veličine zrna d_{50} (mm) preporučuje se korištenje krivulja sa Slike 9.3. Ukoliko navedeni podaci nisu dostupni, koristi se srednja veličina zrna za područje djelovanja morskog dna na valove. [4]



Slika 9.3 Dijagram za određivanje efektivne veličine zrna [4]

Parametar A ($m^{1/3}$) se dobije pomoću Tablice 9.1. u ovisnosti o srednjoj veličini zrna i utječe na brzinu čestica w_s (m/s) [4]:

$$A = 2.25 \left(\frac{w_s^2}{g} \right)^{1/3} \quad (9.54)$$

Sređivanjem prethodnog izraza se dobije:

$$w_s = \left(\frac{A \cdot g^{1/3}}{2.25} \right)^{3/2} \quad (9.55)$$

gdje brzina w_s predstavlja maksimalnu brzinu koju pod djelovanjem gravitacije postiže padajuća čestica sedimenta [6].

Tablica 9.1 Preporučene vrijednosti parametra A ($m^{1/3}$) u ovisnosti o srednjoj veličini zrna (Moore, 1982.) [4]

d (mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.0471	0.0515	0.0559	0.0602	0.0646	0.0689	0.0732	0.0775	0.0818	0.0861
0.2	0.0903	0.0946	0.0988	0.1030	0.1072	0.1114	0.1156	0.1197	0.1239	0.1281
0.3	0.1322	0.1364	0.1405	0.1446	0.1487	0.1528	0.1569	0.1610	0.1651	0.1692
0.4	0.1715	0.1729	0.1742	0.1756	0.1769	0.1781	0.1794	0.1806	0.1819	0.1831
0.5	0.1842	0.1854	0.1866	0.1877	0.1888	0.1900	0.1911	0.1921	0.1932	0.1943
0.6	0.1953	0.1964	0.1974	0.1984	0.1994	0.2004	0.2014	0.2023	0.2033	0.2042
0.7	0.2052	0.2061	0.2070	0.2080	0.2089	0.2098	0.2107	0.2115	0.2124	0.2133
0.8	0.2141	0.2150	0.2158	0.2167	0.2175	0.2183	0.2192	0.2200	0.2208	0.2216
0.9	0.2224	0.2232	0.2239	0.2247	0.2255	0.2263	0.2270	0.2278	0.2285	0.2293
1.0	0.2300	0.2307	0.2315	0.2322	0.2329	0.2336	0.2343	0.2350	0.2357	0.2364

9.1. Proračun valnih transformacija

GenCade sadrži podmodel za proračun valnih transformacija koje generiraju transport sedimenta i promjenu lica plaže. Referentni ulazni podaci su valna visina, period, kut nailaska vala i dubina koja se odnosi na navedene značajke. Zadaju se u jednakim intervalima, najčešće u rasponu od tri do 24 sata.

Ako se radi o približno pravilnim i paralelnim konturama dna, ulazni podaci se odnose na parametre dubokovodnog vala. Ukoliko promatrano područje ima značajne promjene u batimetriji, ulazni podaci se dobivaju pomoću drugih programskih alata, primjerice CMS-Wave koji računa valne transformacije iz zone dubokog prema zoni srednje dubokog mora. Rezultati su valne visine i kut nailaska u zoni srednje dubokog mora na dubinama na kojima se još nije ostvario lom, te dalje služe kao ulazni podaci prethodno navedenog podmodela, čiji je princip rada opisan u nastavku.

Za referentne ulazne podatke podmodel vrši proračun valnih transformacija u pogledu refrakcije i uplićavanja i dovodi valove do stanja loma, a potom uzima utjecaj difrakcije i modificira prethodno dobivene rezultate. [4]

Valna visina neposredno prije loma se računa prema:

$$H_b = H_{ref} K_R K_S \quad (9.56)$$

gdje je:

H_{ref} - referentna ulazna valna visina (m),

K_R - koeficijent refrakcije:

$$K_R = \sqrt{\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}} \quad (9.57)$$

K_S - koeficijent uplićavanja:

$$K_S = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \quad (9.58)$$

θ_1 - početni kut koji zraka vala zatvara s normalom na obalu ($^\circ$),

θ_2 - kut koji zraka vala zatvara s normalom na obalu na dubini loma vala d_b ($^\circ$),

C_g - brzina grupe valova (m/s):

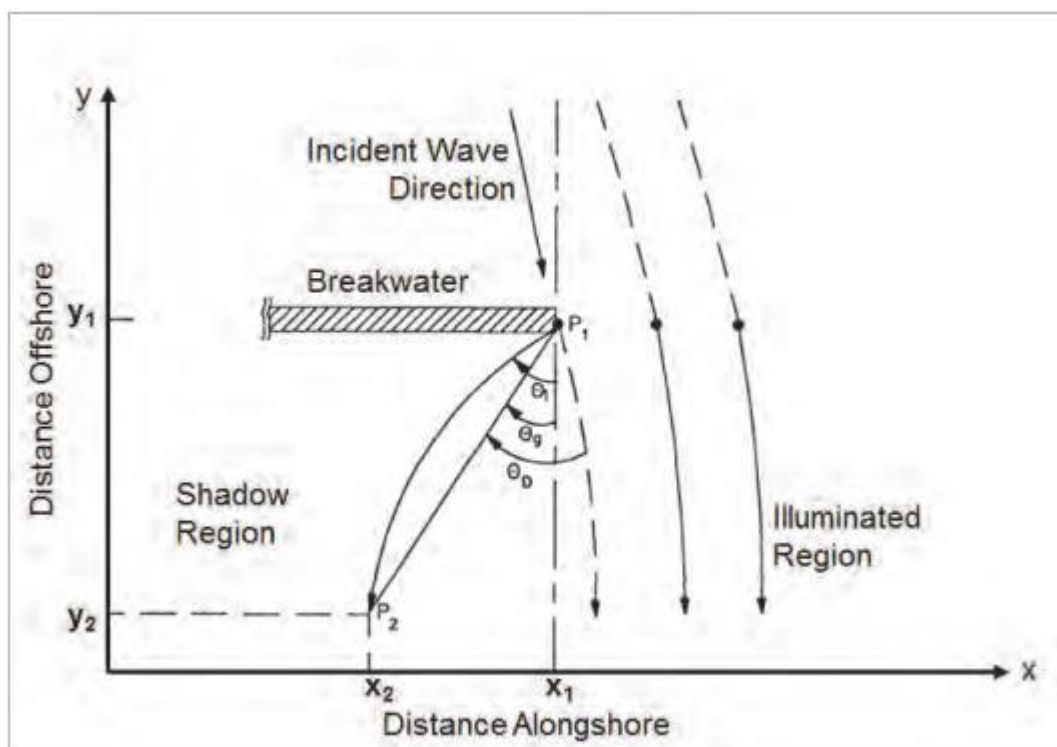
$$C_g = n \cdot C = \frac{1}{2} \frac{L}{T} \left[1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right] \quad (9.59)$$

Kriterij loma vala prema kojem valna visina ovisi o dubini glasi:

$$H_b = 0.78 d_b \quad (9.60)$$

Ako postoje prepreke koje djeluju na difrakciju valova, dobivena rješenja se dalje preračunavaju. Na Slici 9.4 je prikazan utjecaj valobrana na difrakciju gdje je naznačena zona djelovanja incidentnog vala i područje sjene na kojem dolazi do prijenosa energije kao posljedica djelovanja valobrana. Kako bi se odredila valna visina, koeficijent difrakcije se računa za oba područja jer je utjecaj difrakcije prisutan i u zoni djelovanja incidentnog vala.

Zrake vala se ogibaju na vrhu valobrana u točki P_1 i usmjeravaju prema području sjene, gdje se grebeni pod kutom θ_1 kružno rasprostiru prema obali. U zoni sjene valovi pod kutom θ_2 nailaze na točku P_2 u kojoj se lome. Kako kut θ_1 koji je funkcija kriterija loma vala i udaljenosti u smjeru osi x nije poznat, na početku iterativnog postupka za određivanje područja loma prethodno transformiranog vala uslijed refrakcije, uplićavanja i difrakcije koristi se kut θ_G , odnosno kut koji razdjelnica područja sjene i zone djelovanja incidentnog vala zatvara s pravcem određenim točkama P_1 i P_2 . [4]



Slika 9.4 Skica za proračun difrakcije iza valobrana [4]

Dva su uvjeta koja val pri lomu mora ispuniti - prvi se odnosi na kriterij loma vala bez utjecaja difrakcije (9.26), a drugi je dan jednadžbom:

$$H_b = K_D (\theta_D) H_b' \quad (9.61)$$

gdje je:

K_D - koeficijent difrakcije,

θ_D - kut koji incidentna zraka vala koja prolazi kroz točku P_1 zatvara s pravcem određenim točkama P_1 i P_2 ($^\circ$),

H_b' - valna visina izračunata u istoj ćeliji bez utjecaja difrakcije (m).

Kod iterativnog postupka za slučaj nailaska valova na mjesto preklapanja dviju zona sjena se računa prosječan kut θ_G i pripadajući koeficijent za dva sustava difrakcije. Sličan postupak vrijedi za valove na mjestu preklapanja zona djelovanja incidentnih valova, no umjesto kuta θ_G se koristi smjer nailaska valova izračunat bez utjecaja difrakcije. [4]

9.2. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti na bočnim granicama mreže se dijele na *pinned*, *moving* i *gated* rubne uvjete [4]. Koriste se za kalibraciju modela, gdje se usporedbom višegodišnjih mjerenja obalnih promjena mogu dobiti parametri i ulazni podaci za dugoročne prognoze ponašanja obale.

Pinned rubni uvjet definira stanje u kojem se nakon određenog vremenskog perioda neće dogoditi nikakvi značajni pomaci obale u smjeru okomitom na nju. Ovisno o kojoj strani mreže se radi, zadaje se preko stupnja transporta sedimenta:

$$Q_1 = Q_2, \quad (9.62)$$

$$\text{ili } Q_{N+1} = Q_N. \quad (9.63)$$

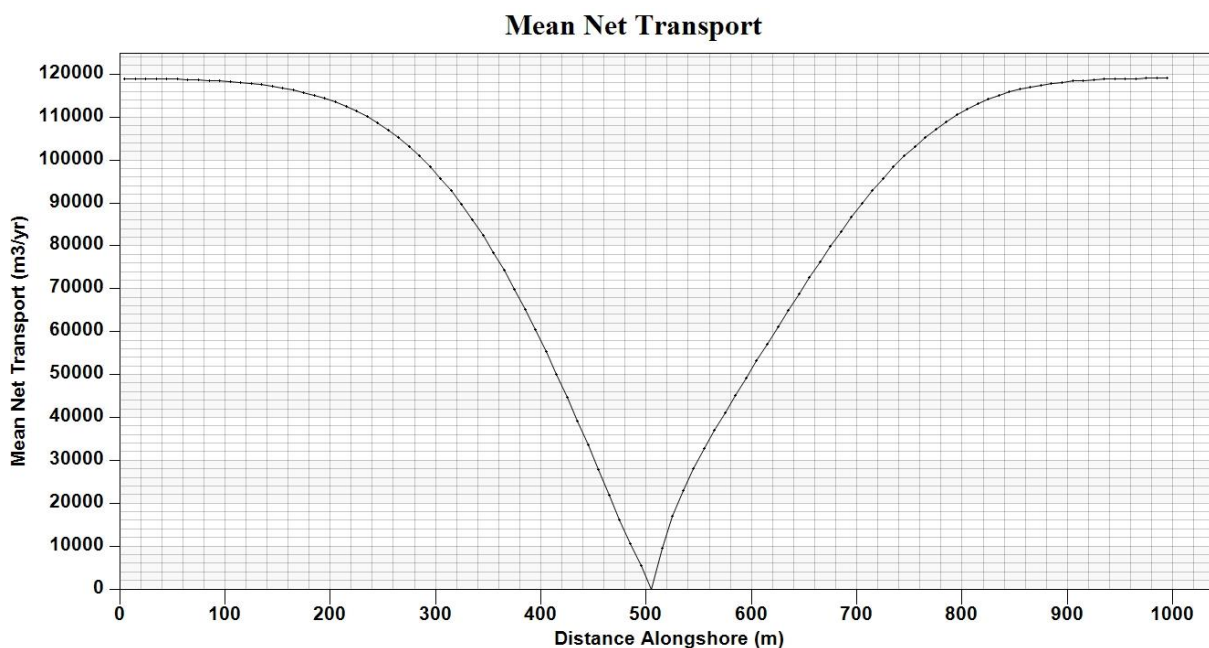
Stupanj promjene pozicije obale u vremenu je jednak nuli:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (9.64)$$

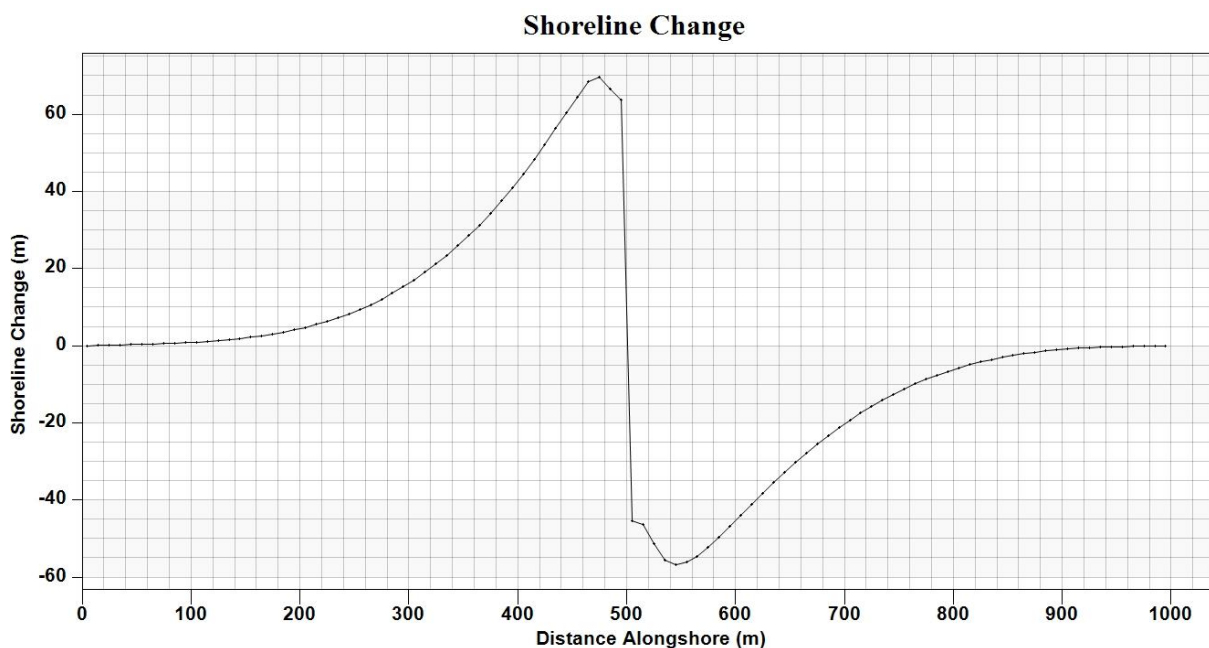
Primjer utjecaja *pinned* rubnih uvjeta na pero smješteno u središtu domene u idealiziranim uvjetima konstantnog djelovanja vala nalazi se na Slici 9.5 i 9.6, a u Tablici 9.2. su navedeni ulazni podaci.

Tablica 9.2 Ulazni podaci za pero s pinned rubnim uvjetima

POSTAVKE DOMENE		
	duljina domene paralelne s x osi	1000 (m)
	duljina pera koje djeluje na difrakciju	150 (m)
	dubina na rubu pera	6 (m)
	koeficijent propusnosti pera	0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.5 Prosječni neto transport sedimenta za pinned rubne uvjete



Slika 9.6 Promjena linije obale za pinned rubne uvjete

Uočava se da je promjena linije obale za vrijednosti $x = 0$ (m) i $x = 1000$ (m) jednaka nuli, što je sukladno rubnim uvjetima. Gibanje sedimenta duž obale se prema zoni utjecaja pera smanjuje pa se materijal zadržava s lijeve strane pera, što je popraćeno pomicanjem linije obale prema moru. S druge strane pera se odvija erozija materijala zbog zaustavljenog prihranjivanja s lijeve strane.

Moving rubnim uvjetom je propisana promjena lica plaže u y smjeru u jedinici vremena. Neka je promjena za potrebe prikaza označena sa A :

$$\frac{\partial y}{\partial t} = A \quad (9.65)$$

odnosno:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{y_N^{t+1} - y_N^t}{\Delta t} = A \quad (9.66)$$

gdje je:

y_N^{t+1} - stupanj promjene položaja obale izračunat u središtu ćelije N za trenutak $(t+1)$ (m),

y_N^t - stupanj promjene položaja obale izračunat u središtu ćelije N za trenutak t (m).

Kako je stupanj promjene položaja obale u vremenskom koraku, danu ili simulaciji jednak:

$$y_{RC} = A \Delta t = y_N^{t+1} - y_N^t \quad (9.67)$$

uvrštavanjem u izraz (9.32) dobije se:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{y_{RC}}{\Delta t} \quad (9.68)$$

Ako se prethodni izraz uvrsti u jednadžbu stupnja promjene položaja obale (9.12), slijedi:

$$\frac{y_{RC}}{\Delta t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{Q_{N+1}^t - Q_N^t}{\Delta x} - q \right) = 0 \quad (9.69)$$

Sređivanjem jednadžbe dobije se rubni uvjet izražen preko stupnja transporta sedimenta:

$$Q_{N+1}^t = Q_N^t - y_{RC} \frac{\Delta x (D_B + D_C)}{\Delta t} + q \Delta x \quad (9.70)$$

gdje je:

Q_N^t - stupanj transporta sedimenta izračunat u zidu ćelije N za trenutak t (m^3/s),

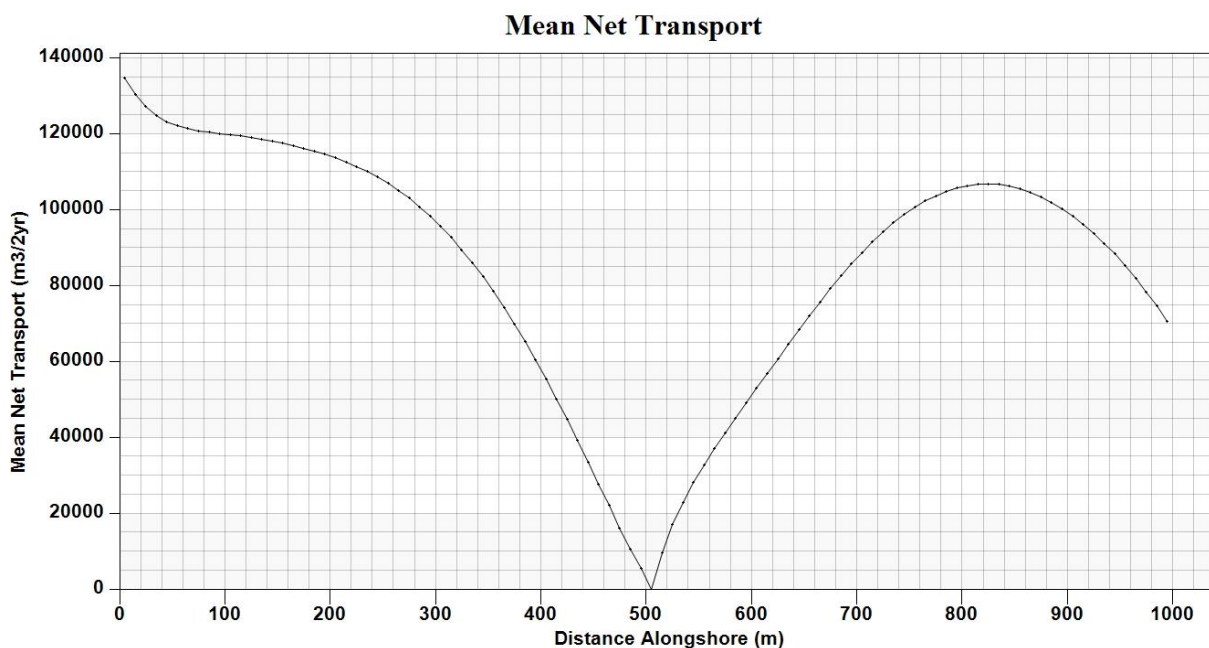
Q_{N+1}^t - stupanj transporta sedimenta u zidu ćelije $(N+1)$ za trenutak t (m^3/s),

q_N^t - doprinos volumena po jedinici duljine u smjeru y osi, u zidu ćelije N za trenutak t (m^3/s).

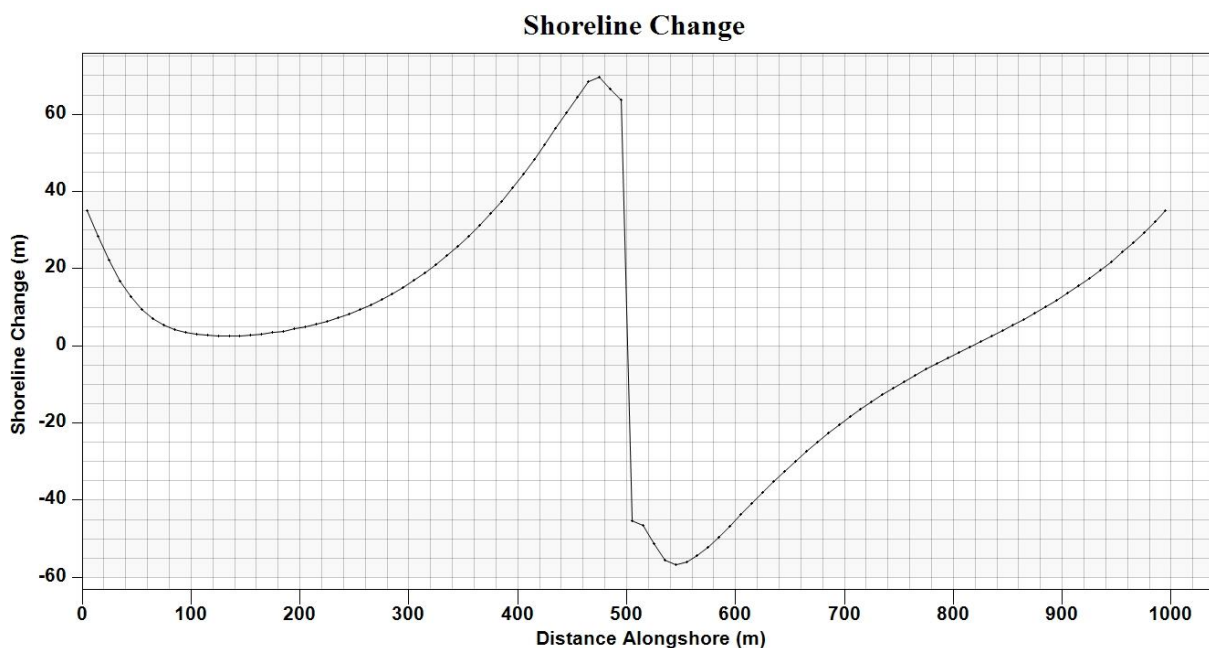
Za iste ulazne podatke kao u prethodnom primjeru testirani su *moving* rubni uvjeti s unaprijed zadanim pomakom obale u iznosu 0.001 (m) po vremenskom koraku, koji za ovaj slučaj iznosi 0.5 sati (Slika 9.7 i 9.8.). Jednaki rezultati su dobiveni za pomak 0.048 (m) zadan po danu ili 35.088 (m) po simulaciji u vremenu trajanja dvije godine. Značajni pomaci su uzeti radi bolje preglednosti utjecaja rubnih uvjeta na model.

Tablica 9.3 Ulazni podaci za pero s *moving* rubnim uvjetima

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.7 Prosječni neto transport sedimenta za moving rubne uvjete



Slika 9.8 Promjena linije obale za moving rubne uvjete

Promjena linije obale za vrijednosti $x = 0$ (m) i $x = 1000$ (m) odgovara prethodno zadanom pomaku 35.088 (m) pa je na lijevom rubu zabilježena veća količina sedimenta nego za prethodni primjer. Na desnom rubu je ta količina značajno manja jer je postavljen uvjet da pomak obale iznosi 35.088 (m), stoga je gubitak materijala spriječen.

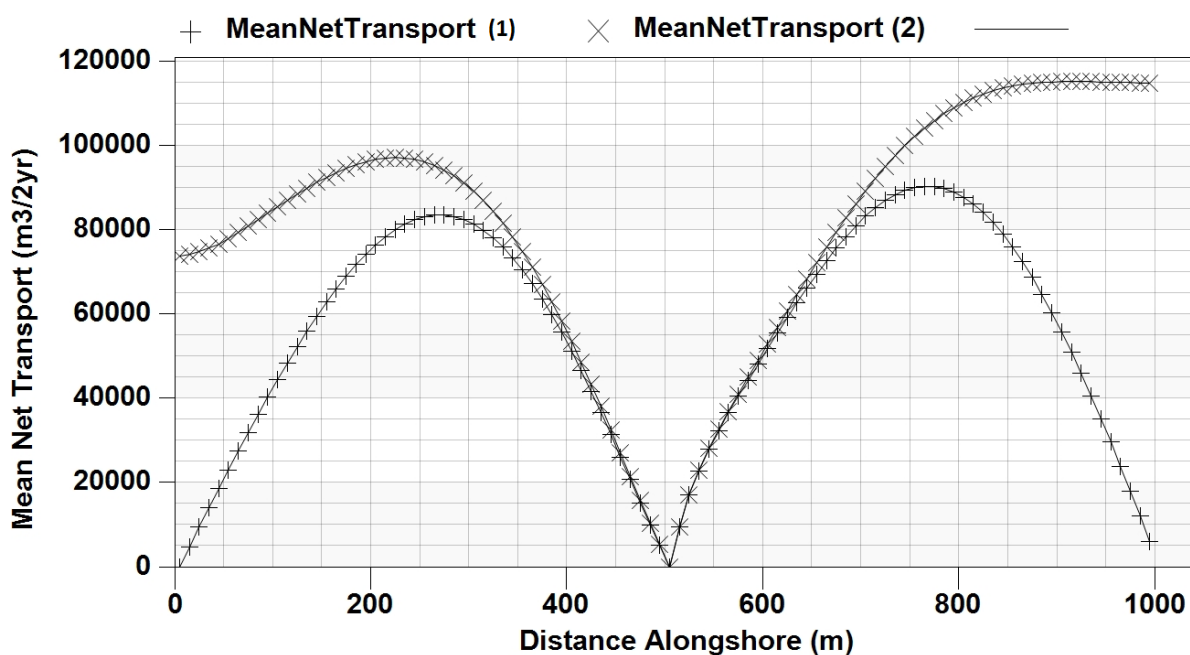
Središnji dio domene zadržava isto ponašanje kao u slučaju *pinned* rubnih uvjeta.

Gated rubni uvjet odgovara stanju u prirodi u kojem je kretanje materijala potpuno ili djelomično ograničeno barijerom primjerice perom, valobranom i sličnim objektima. Modelom se zadaju raspon, dubina i propusnost odabranih rubnih objekata mreže smještenih u prvoj i/ili zadnjoj (N+1) ćeliji.

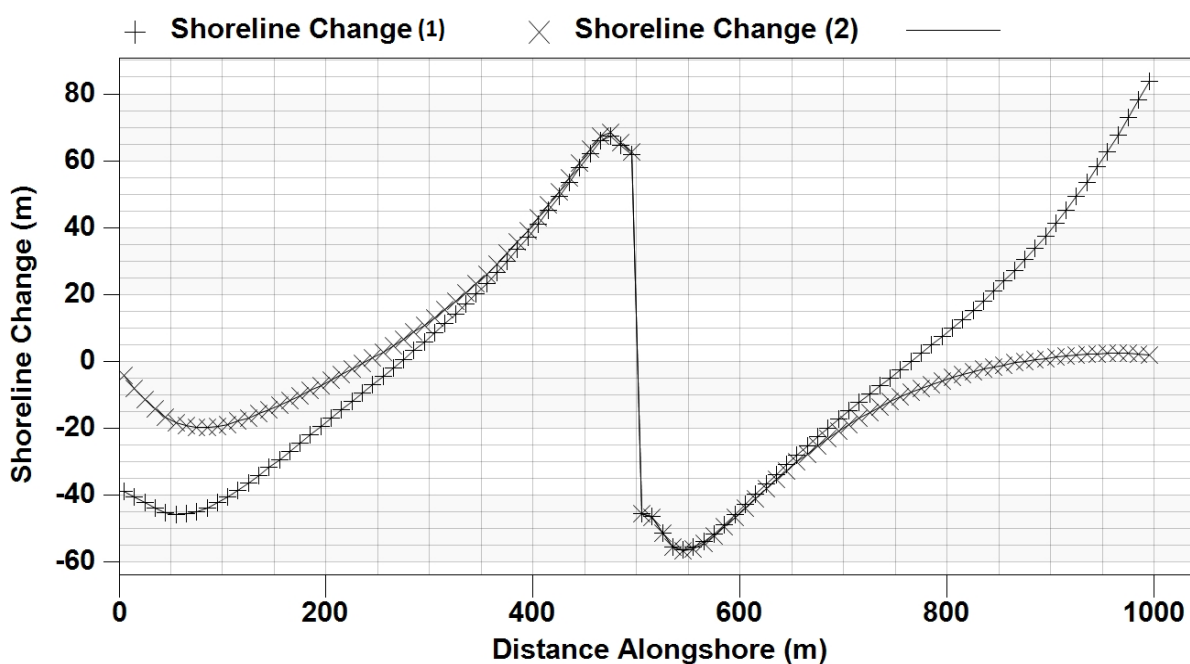
Rezultati testiranih *gated* rubnih uvjeta za ulazne podatke iz Tablice 9.4 prikazani su na Slikama 9.9 i 9.10.

Tablica 9.4 Ulazni podaci za pero s *gated* rubnim uvjetima

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>gated</i> , određeni perima:		
(1)	koeficijent propusnosti pera	0.0
(2)	koeficijent propusnosti pera	0.5
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.9 Prosječni neto transport sedimenta za gated rubne uvjete zadane s nepropusnim perima (1) i perima s koeficijentom propusnosti 0.5 (2)

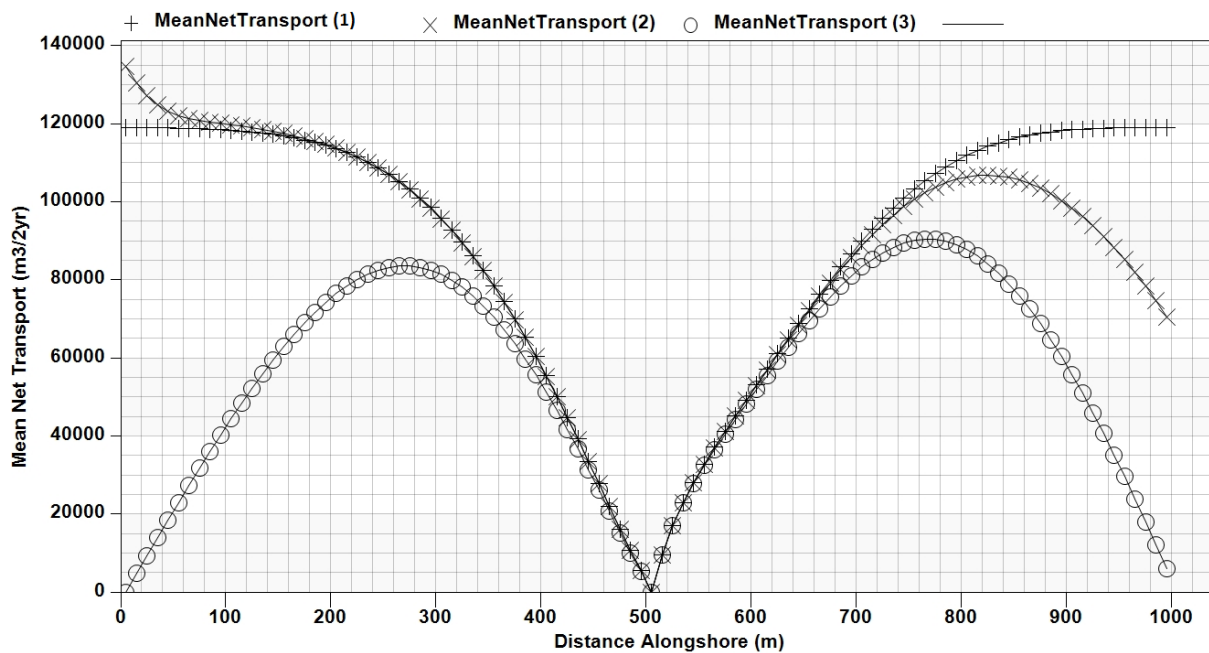


Slika 9.10 Promjena linije obale za gated rubne uvjete zadane s nepropusnim perima (1) i perima s koeficijentom propusnosti 0.5 (2)

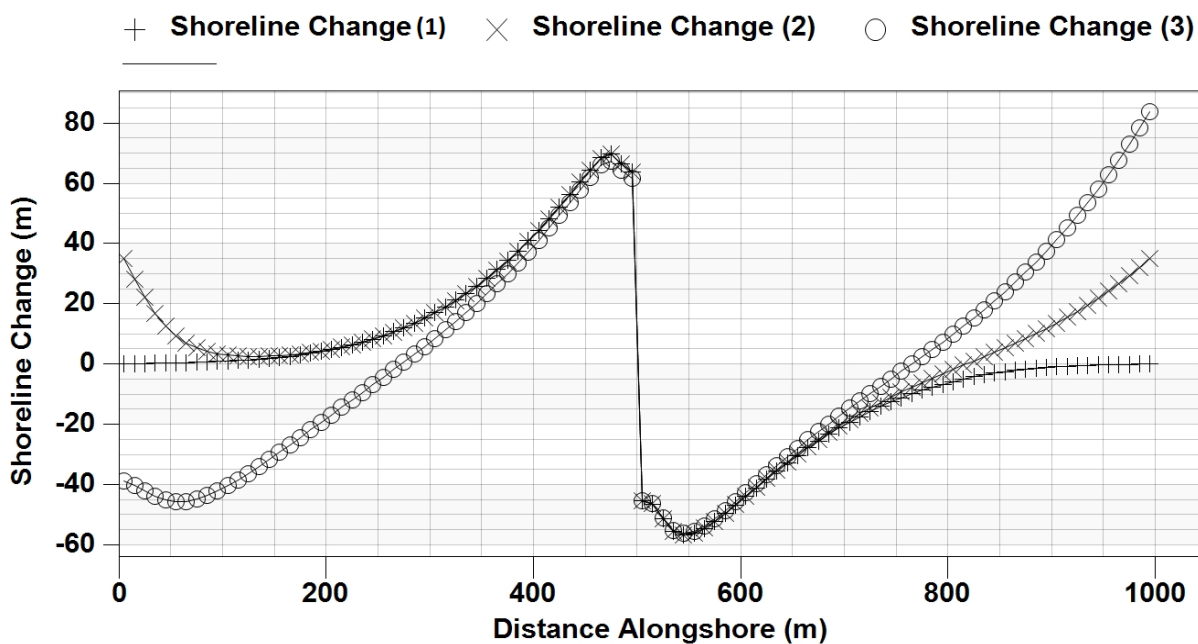
Za vrijednost $x = 0$ (m) erozija obale je veća kod *gated* rubnog uvjeta s nepropusnim perom nego s propusnim jer je u toj točki spriječen dotok sedimenta s lijeve strane. Rubni uvjet zadan propusnim perom dozvoljava djelomičan prijenos sedimenta, pa je erozija plaže na tom području manja.

Na desnom rubu za vrijednost $x = 1000$ (m) nepropusno pero zaustavlja sediment i tu je vrijednost transporta jednaka nuli, što za posljedicu ima njegovo taloženje i pomicanje linije obale prema moru.

Pregledan utjecaj rubnih uvjeta na rezultate modela prikazan je na slici 9.11 i 9.12, gdje su dani rezultati za *pinned* (1), *moving* (2) i *gated* rubne uvjete određene nepropusnim perima (3).



Slika 9.11 Utjecaj rubnih uvjeta na prosječni neto transport sedimenta



Slika 9.12 Utjecaj rubnih uvjeta na promjenu linije obale

Ispitivanja rubnih uvjeta su odrađena na ekvidistantnoj mreži s nedostatnom širinom ćelija pa su na područjima značajnijih promjena obalne linije uočene manje nepravilnosti u rješenjima. Potrebna širina ćelija u pogledu stabilnosti rješenja i numeričke disperzije je ispitana u sljedećem poglavlju.

9.3. Numerička stabilnost

Proračun stupnja transporta sedimenta i pozicije obale vrši se metodom konačnih razlika eksplicitnom shemom rješenja, prema kojoj se svaka nova vrijednost Q i y u novom trenutku ($t + \Delta t$) računa pomoću vrijednosti Q i y iz prethodnog trenutka t .

Prednosti ovakvog tipa rješenja su lakše programiranje, kraće vrijeme proračuna i jednostavniji izrazi za rubne uvjete. Nedostatak je stabilnost rješenja jer su često potrebni manji vremenski koraci i stoga njihov veći broj.

Aproksimativni kriterij stabilnosti se može dobiti linearizacijom jednadžbe (9.12) s obzirom na y , tako da se pretpostavi dovoljno mali kut α_{bs} koji val u trenutku loma zatvara s normalom na lokalnu orijentaciju obale pa vrijedi:

$$\sin 2\alpha_{bs} \approx 2\alpha_{bs} \quad (9.71)$$

iz čega proizlazi:

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \operatorname{atg}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \approx \alpha_b - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (9.72)$$

gdje je:

α_b - kut koji val zatvara s x osi ($^\circ$),

α_{bs} - kut koji val u trenutku loma zatvara s normalom na lokalnu orijentaciju obale ($^\circ$),

$\frac{\partial y}{\partial x}$ - lokalna orijentacija obale.

Ako se pretpostavi $\partial q / \partial x \approx 0$, jednadžba (9.12) postane difuzijskog tipa:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (9.73)$$

gdje su ε_1 i ε_2 (m^2/s) koeficijenti difuzije:

$$\varepsilon_1 = \frac{2(H^2 C_g)_b a_1}{D_B + D_C} \quad (9.74)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(H^2 C_g)_b a_2 \sin \alpha_b}{D_B + D_C} \frac{\partial H_b}{\partial x} \quad (9.75)$$

Uvjet stabilnosti eksplisitne sheme rješavanja jednadžbe (9.39) je:

$$\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \leq 0.5 \quad (9.76)$$

koji sprječava da se rješenje rasprši predaleko tijekom zadanog vremenskog koraka ili predugo za zadanu širinu ćelija.

Difuzijska jednadžba (9.39) u formi konačnih razlika glasi:

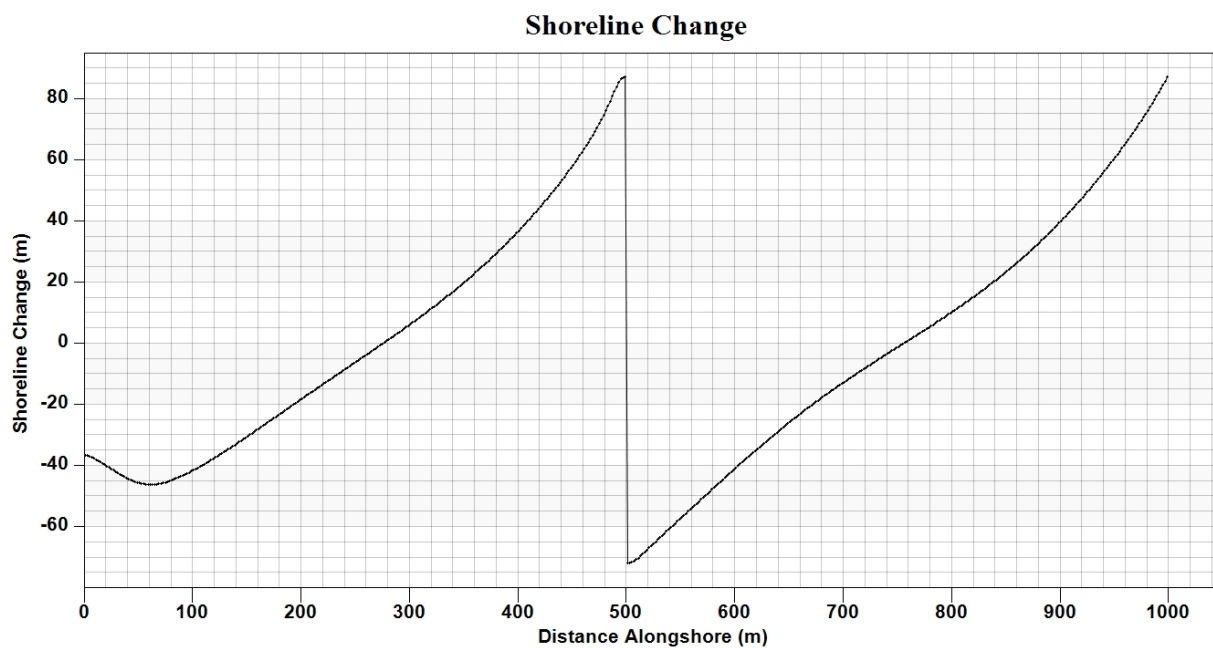
$$\Delta y \sim \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (9.77)$$

Kako bi dobili što realnije rješenje na području prepreka gdje su prisutne najveće promjene u položaju obale, potrebno je progustiti mrežu smanjenjem širine ćelija Δx . Ako uvjet (9.43) nije zadovoljen, model javlja da je rješenje nestabilno pa je pri smanjenju širine ćelija nužno smanjiti vremenski korak Δt .

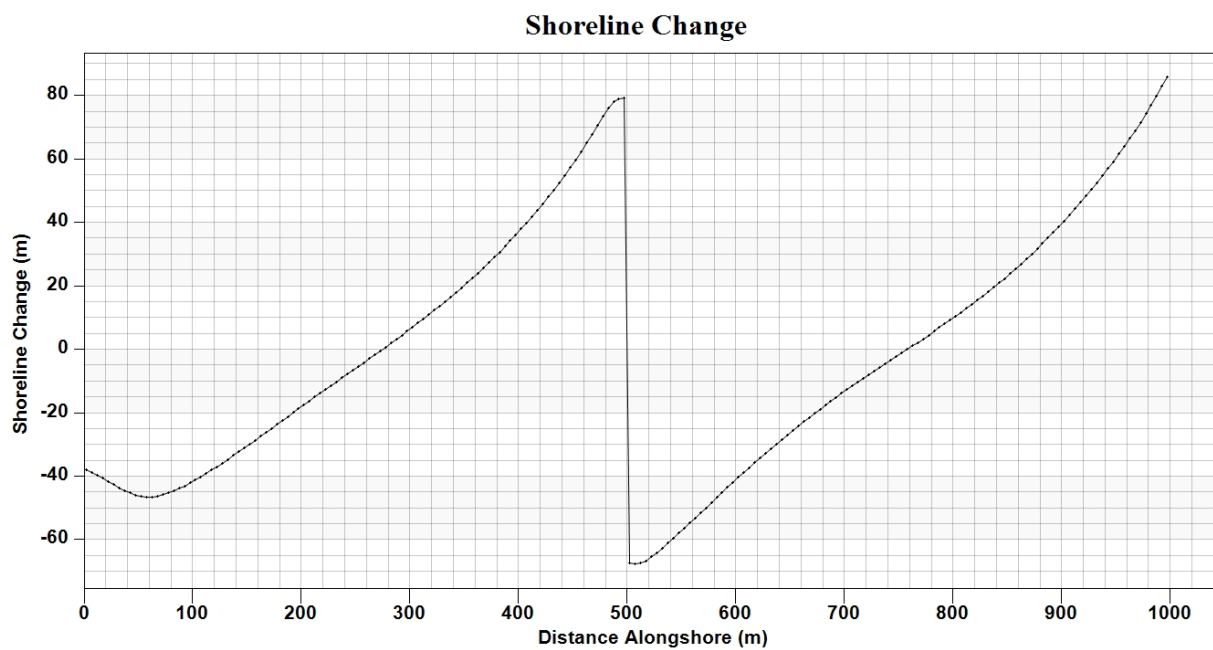
U nastavku je prema ulaznim podacima iz Tablice 9.5 ispitana preglednost rješenja promjene linije obale za različite širine ćelija ekvidistantne mreže. Vremenski korak je smanjen radi očuvanja numeričke stabilnosti.

Tablica 9.5 Ulazni podaci za slučaj različite širine Δx

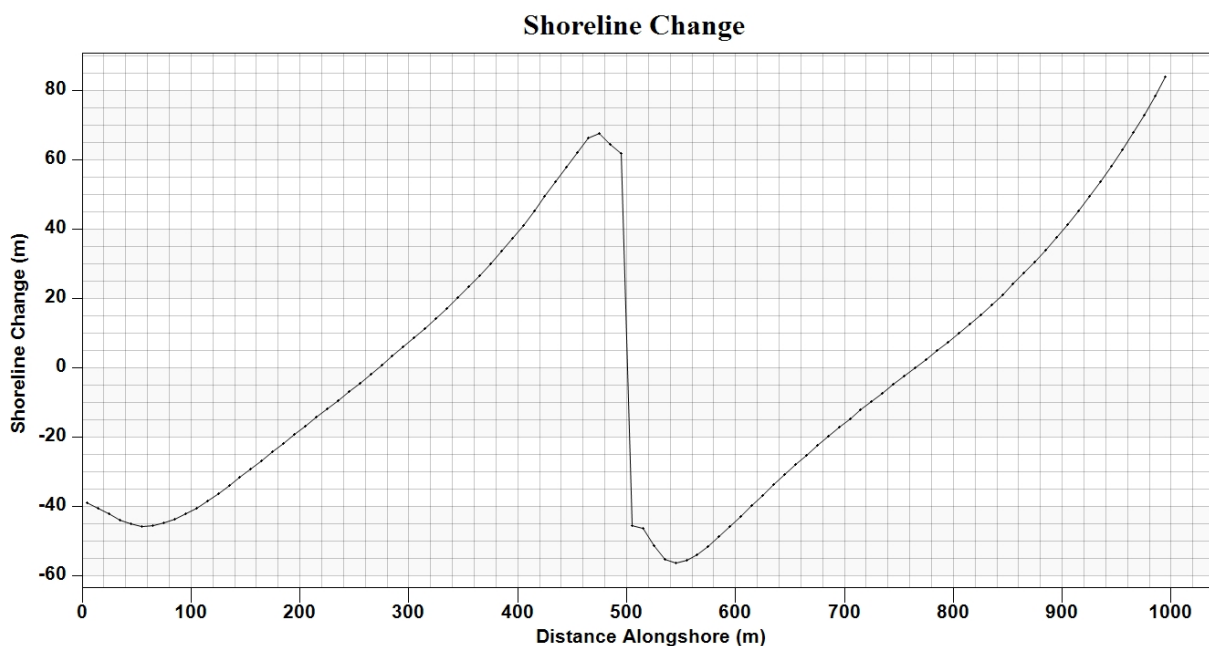
POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
POSTAVKE MREŽE		
konstantna širina ćelija / vremenski korak		(m) / (h)
(2)	$\Delta x / \Delta t$	2 / 0.1
(3)	$\Delta x / \Delta t$	5 / 0.1
(4)	$\Delta x / \Delta t$	10 / 0.5
POSTAVKE MODELA		
vrijeme trajanja simulacije		2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>gated</i> , određeni perima s koeficijentom propusnosti 0.0		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.13 Promjena linije obale za konstantnu širinu $\Delta x=2$ (m) (2)



Slika 9.14 Promjena linije obale za konstantnu širinu $\Delta x=5$ (m) (3)



Slika 9.15 Promjena linije obale za konstantnu širinu $\Delta x=10$ (m) (4)

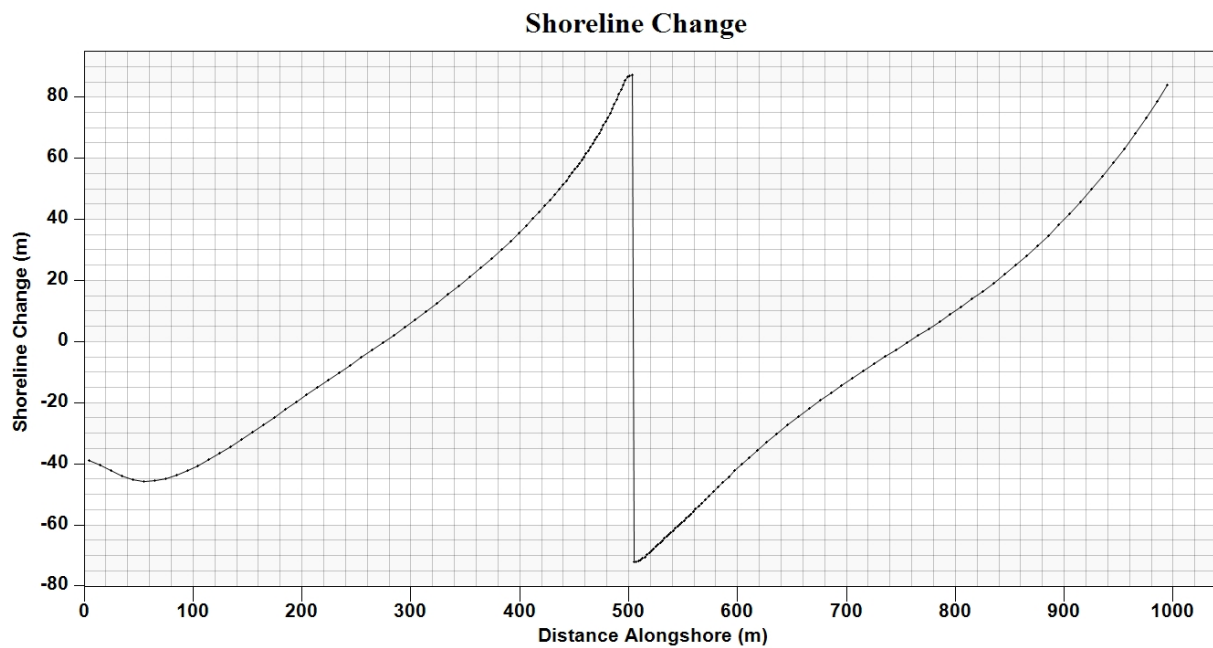
Zaključuje se da je širina ćelije $\Delta x=2$ (m) dovoljno dobra za prikaz rezultata. Međutim, vrijeme trajanja proračuna je drastično uvećan pa se preporučuje korištenje varijabilnog razmaka ćelija, gdje se gušća mreža koristi samo na mjestima lokalnih, najvećih promjena u položaju obale.

Prikaz promjene linije obale za ulazne podatke iz Tablice 9.5, a za postavke nepravilne mreže iz Tablice 9.6, nalazi se na Slici 9.16.

Veća rezolucija sa širinom ćelija 2 (m) korištena je samo u neposrednoj blizini pera, a na ostatku mreže se postupno smanjivala dok širina ćelija nije dosegla unaprijed zadanu maksimalnu vrijednost 10 (m). Kako bi se izbjegao nagli skok u rezultatima, prijelaz s manje širine ćelija na veću se zadaje prirastom. U ovom primjeru prirast iznosi 1.1, što znači da će svaka sljedeća ćelija biti deset posto veća od prethodne dok ne postigne vrijednost maksimalne zadane. Preporučuje se da barem osam ćelija prije i nakon prepreke ima veću rezoluciju za što bolji prikaz rješenja.

Tablica 9.6 Postavke nepravilne mreže

POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)



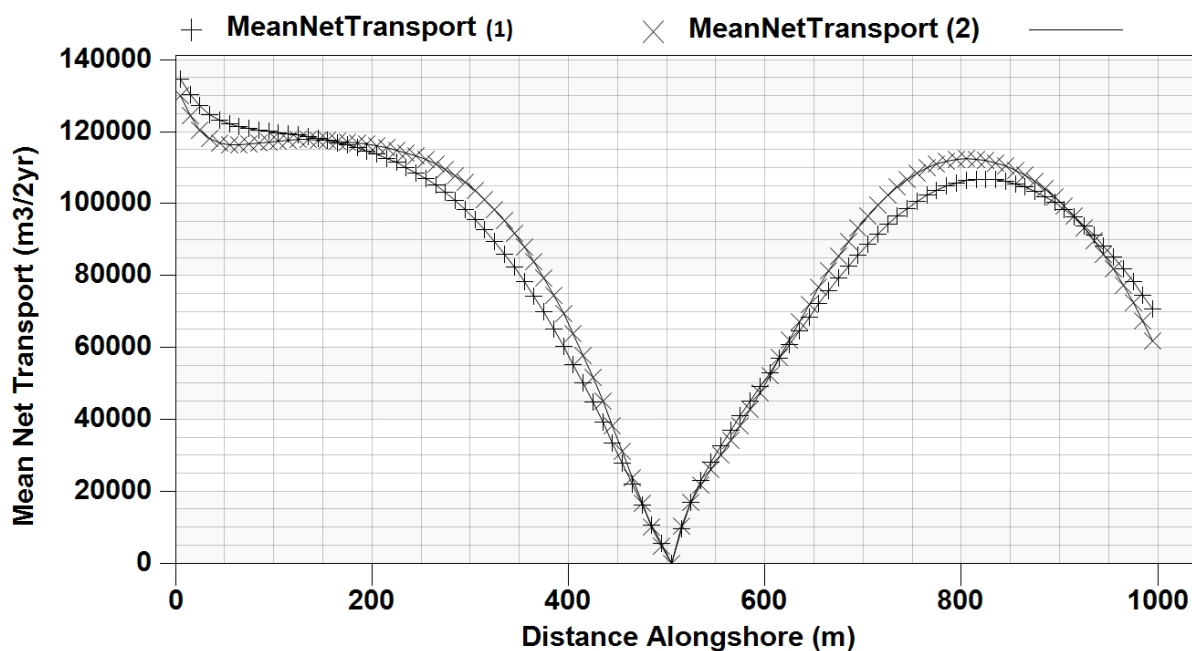
Slika 9.16 Promjena linije obale za nepravilnu mrežu

9.4. Utjecaj promjene ulaznih podataka na rezultate modela

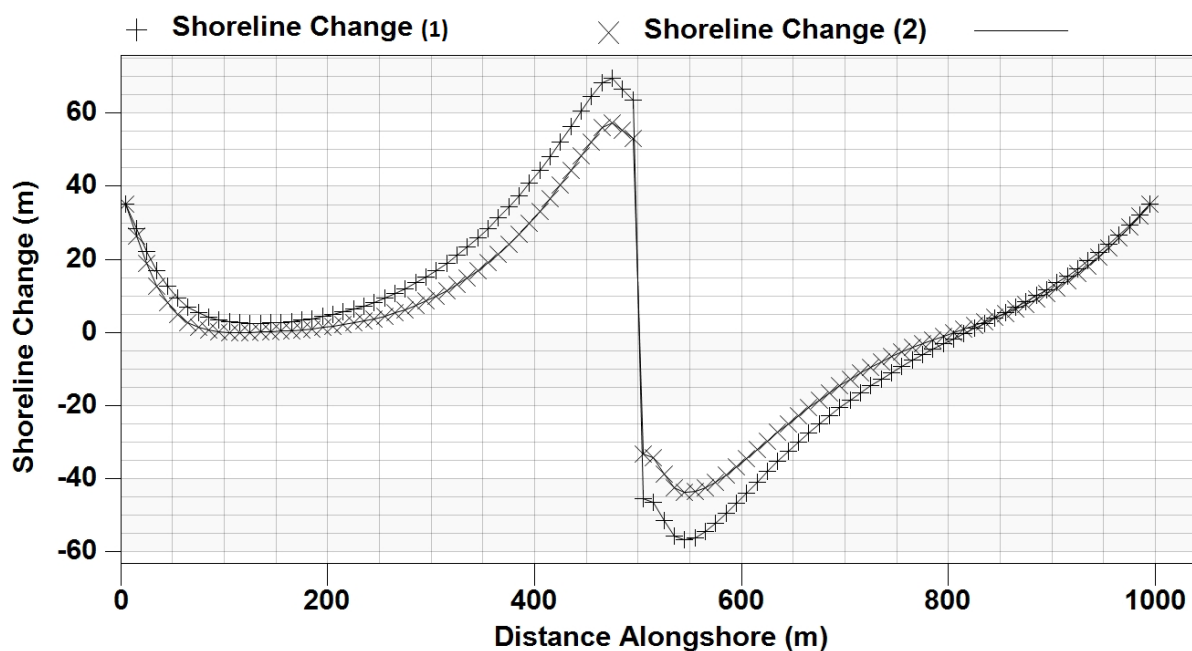
Za lakše predviđanje ponašanja obale kompleksnijih slučajeva i kalibriranje modela potrebno je testirati pojedinačan utjecaj određenih ulaznih parametara na model, na način da svi ostali ostanu isti. U nastavku su testirani utjecaji promjene prosječne visine berme, prosječne dubine točke spoja sedimenta plaže i morskog dna, prosječne veličine zrna, valne visine, smjera nailaska vala i ISMOOTH parametra - broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici.

Tablica 9.7 Ulazni podaci za slučaj različite visine D_B

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
vrijeme trajanja simulacije		2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1/10 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.17 Prosječni neto transport sedimenta za $D_B=1$ (m) (1) i $D_B=10$ (m) (2)

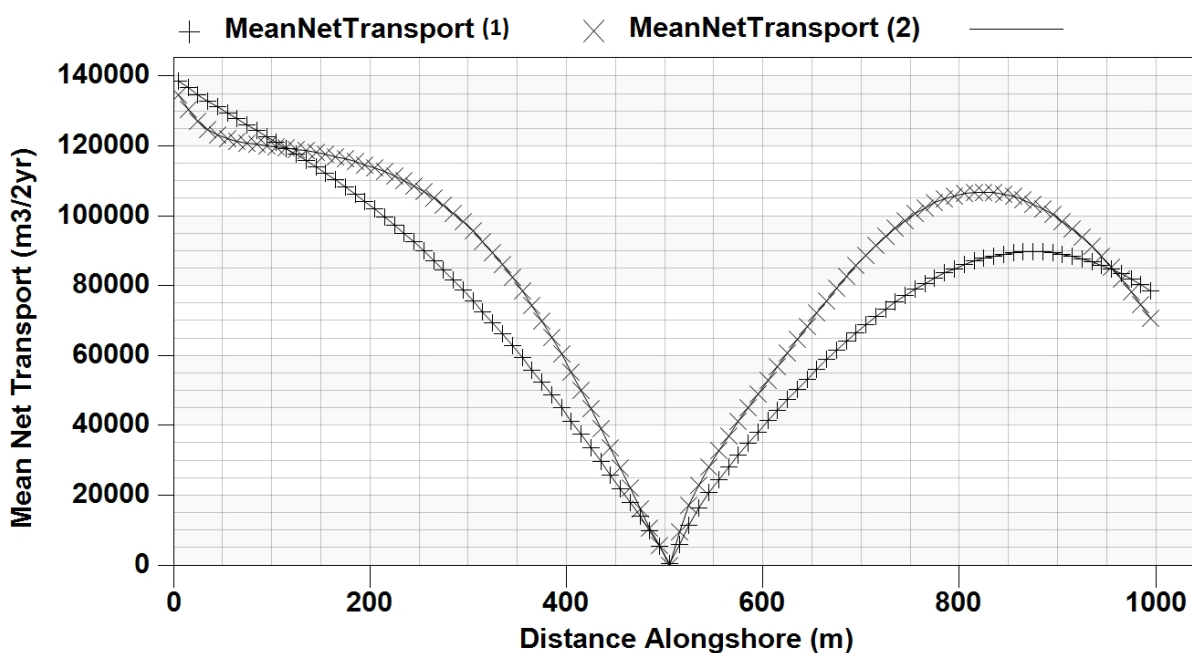


Slika 9.18 Promjena linije obale za $D_B=1$ (m) (1) i $D_B=10$ (m) (2)

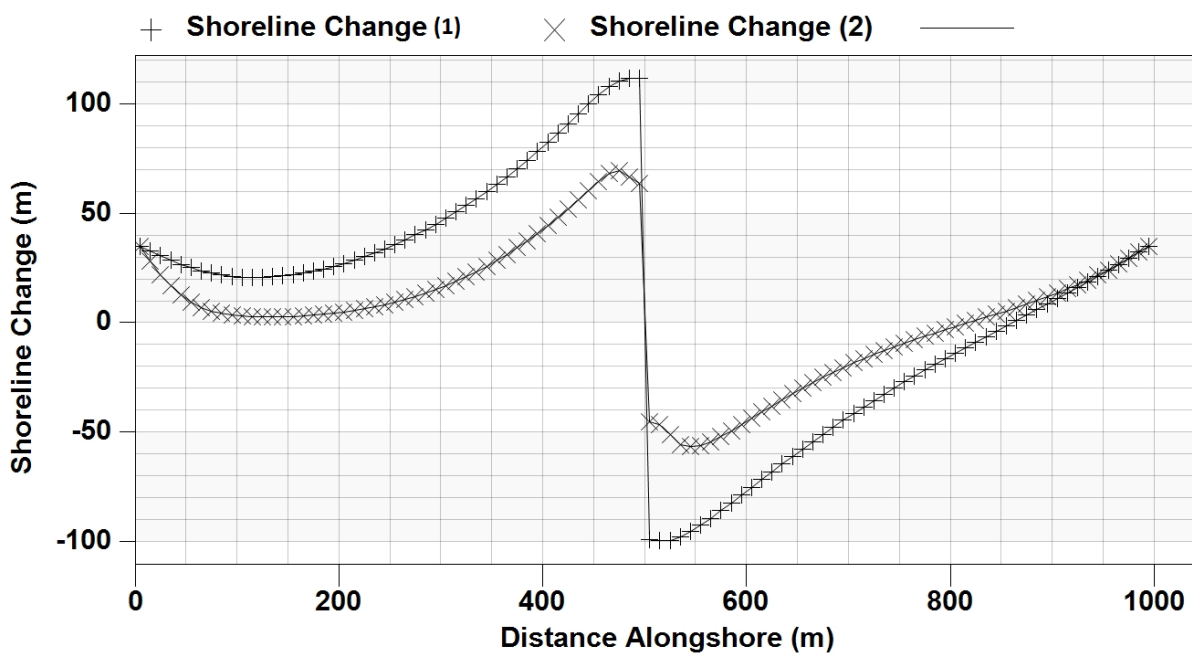
Prema jednadžbi (9.12), povećanjem visine aktivnog profila smanjuje se promjena položaja obale, što je upravo u ovom primjeru vidljivo. Povećanjem visine berme se povećava visina aktivnog profila i područje kretanja sedimenta, što se manifestira kao manja promjena linije obale nego što je to za slučaj manje berme.

Tablica 9.8 Ulazni podaci za slučaj različite dubine D_c

POSTAVKE DOMENE		
	duljina domene paralelne s x osi	1000 (m)
	duljina pera koje djeluje na difrakciju	150 (m)
	dubina na rubu pera	6 (m)
	koeficijent propusnosti pera	0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	10 / 23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.19 Prosječni neto transport sedimenta za $D_C=10$ (m) (1) i $D_C=23$ (m) (2)



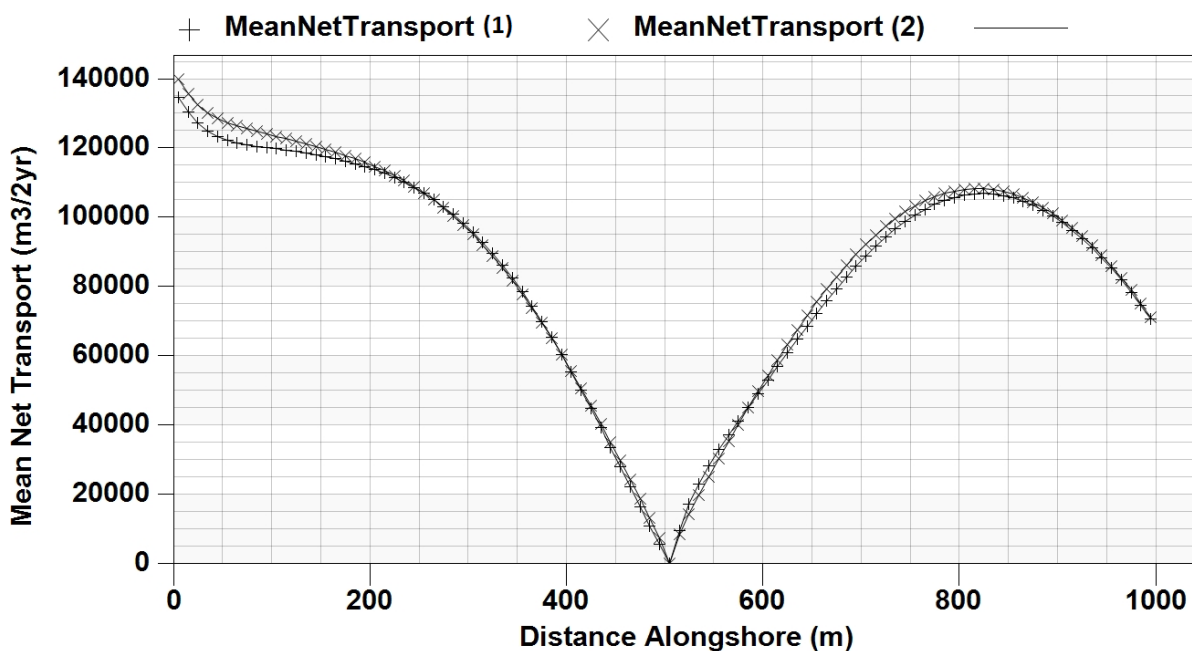
Slika 9.20 Promjena linije obale za $D_C=10$ (m) (1) i $D_C=23$ (m) (2)

Smanjenjem prosječne dubine točke spoja sedimenta plaže i morskog dna skraćuje se visina aktivnog profila i područje kretanja sedimenta. Međutim, s obzirom da ostali parametri modela ostaju isti, javlja se značajno veće taloženje s lijeve strane pera i shodno tome pomicanje linije obale otprilike 40 (m) prema moru. S desne strane pera je istovremeno prisutna značajna erozija.

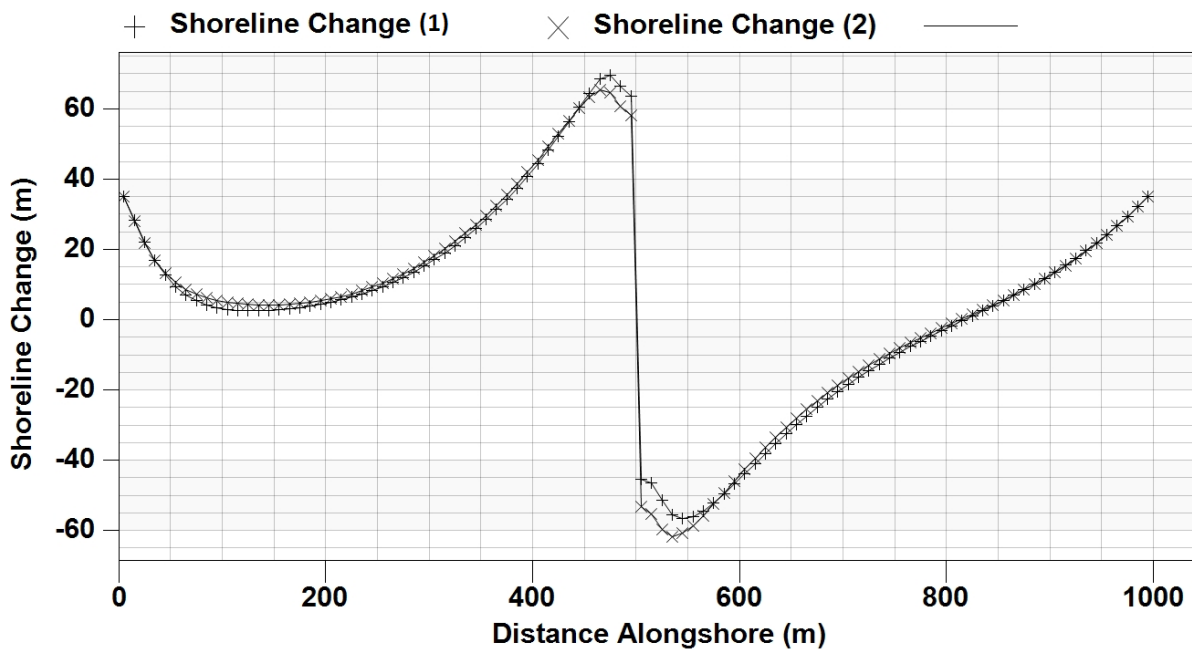
Tablica 9.9 Ulazni podaci za slučaj različitog veličine d_{50}

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
vrijeme trajanja simulacije		2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 /2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		

Najveći utjecaj promjene prosječne veličine zrna je vidljiv na promjeni obale netom prije i iza pera. Taloženje prije pera je veće za slučaj manje veličine zrna i linija obale se pomiče otprilike 5 (m) prema moru, što rezultira većom erozijom na desnoj strani pera.



Slika 9.21 Prosječni neto transport sedimenta za $d_{50}=0.2$ (mm) (1) i $d_{50}=2$ (mm) (2)



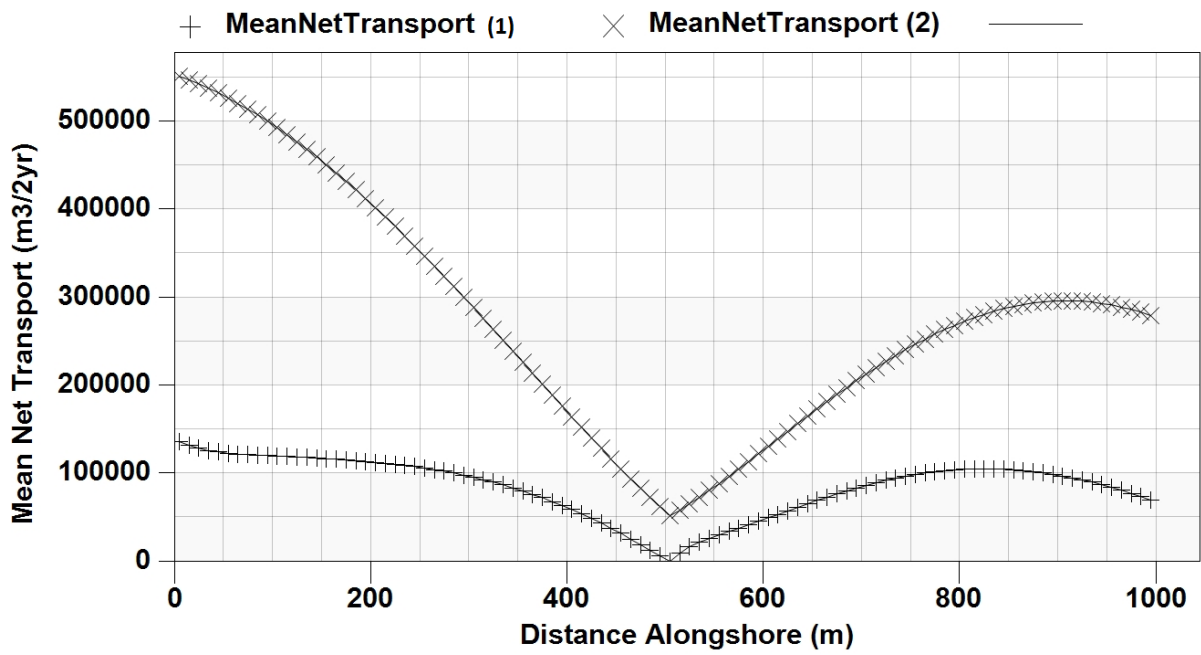
Slika 9.22 Promjena linije obale za $d_{50}=0.2$ (mm) (1) i $d_{50}=2$ (mm) (2)

Tablica 9.10 Ulazni podaci za slučaj različite valne visine

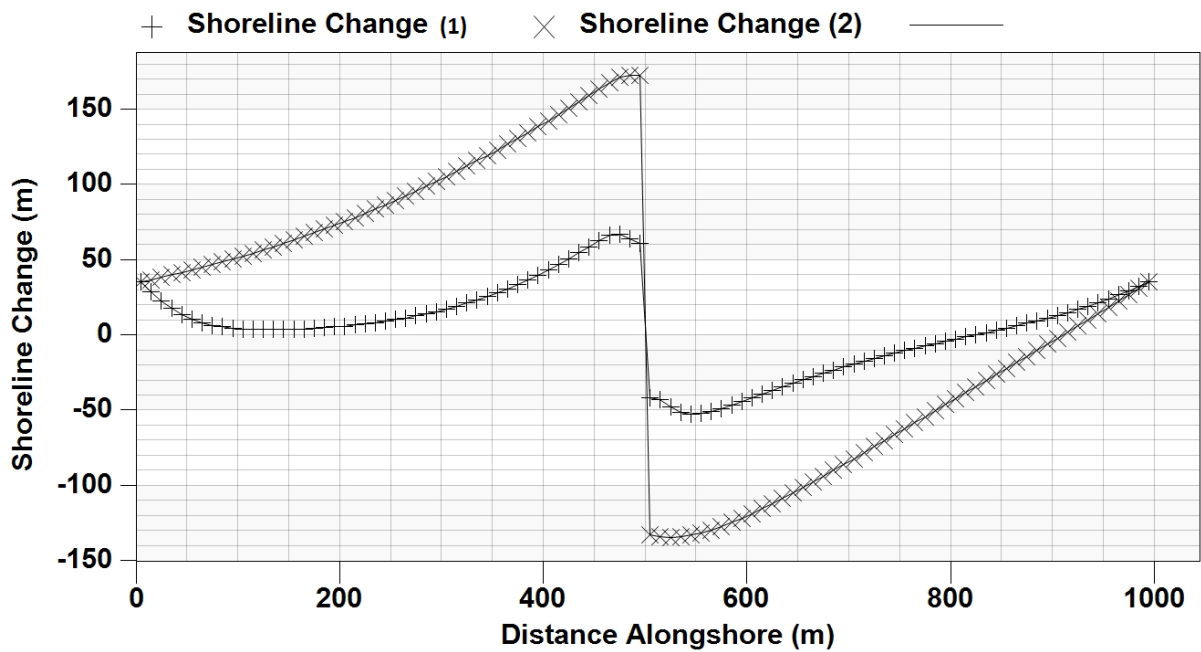
POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje djeluje na difrakciju		250 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
dubina na rubu pera		6 (m)
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
vrijeme trajanja simulacije		2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5/1 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		

Pri povećanju valne visine uočava se izrazita promjena u rezultatima modela. Raspon pera je bilo potrebno uvećati na 250 (m) jer za slučaj veće valne visine sediment prelazi pero.

Prosječan transport sedimenta je drastično uvećan, što je očekivano ako se u obzir uzme jednadžba (9.13) kojom ga model računa, gdje se uzima kvadrat valne visine pri lomu vala. Javlja se značajno veće taloženje s lijeve strane pera i pomicanje linije obale za 100 (m) prema moru. S desne strane pera je prisutna značajna erozija.



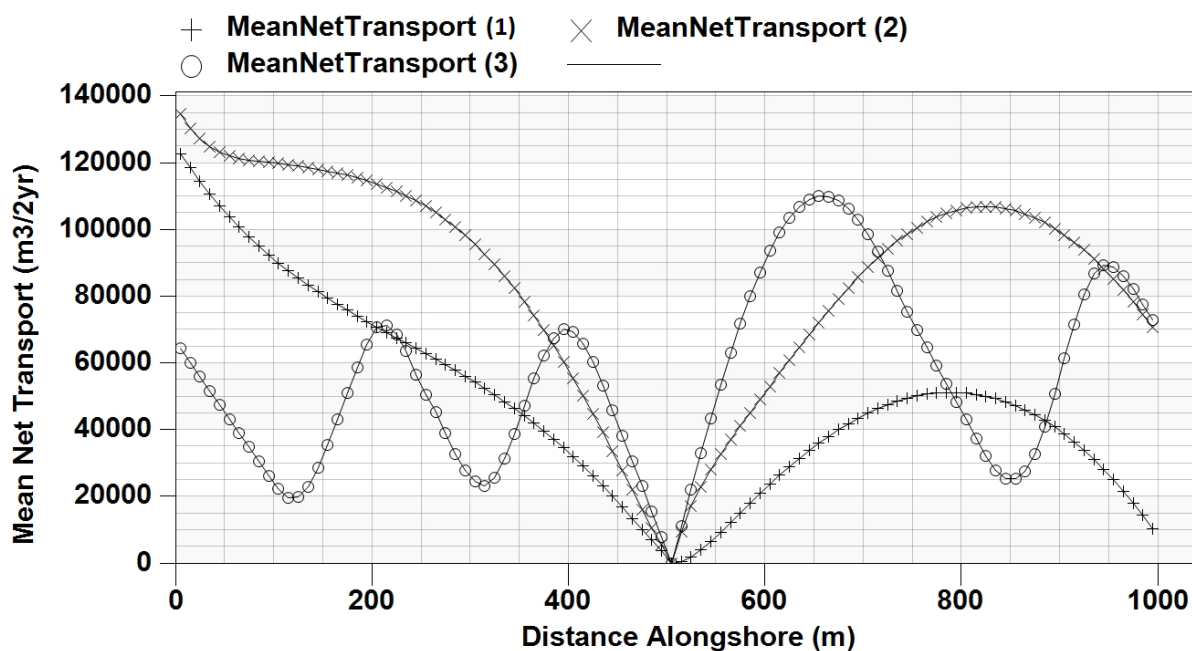
Slika 9.23 Prosječni neto transport sedimenta za $H=0.5$ (m) (1) i $H=1$ (m) (2)



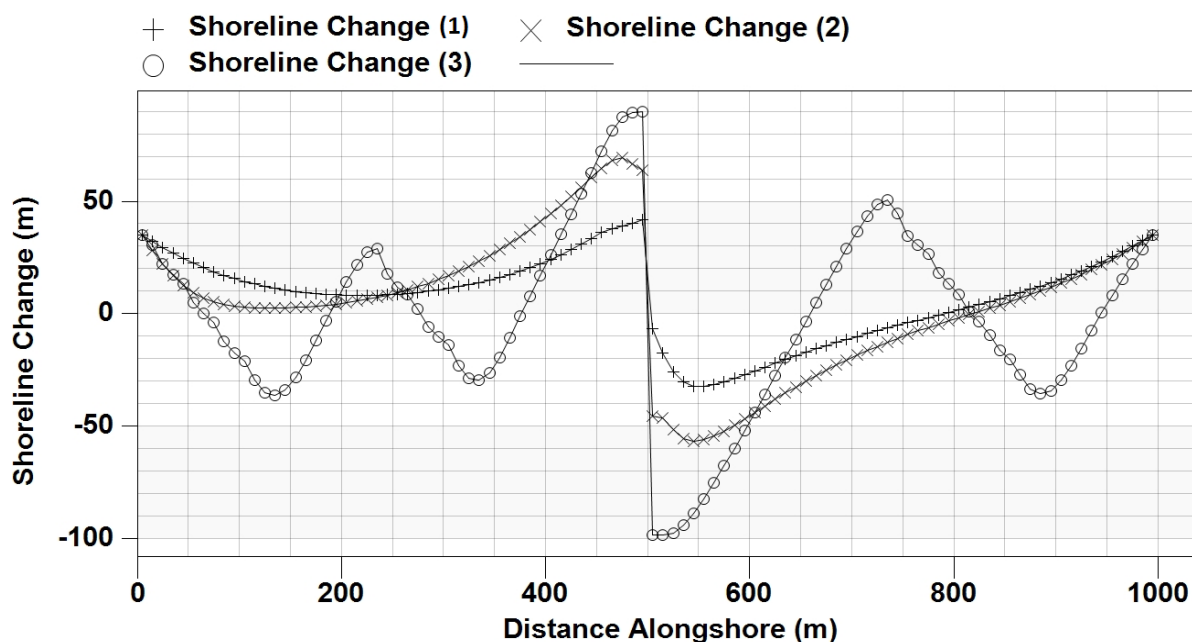
Slika 9.24 Promjena linije obale za $H=0.5$ (m) (1) i $H=1$ (m) (2)

Tablica 9.11 Ulazni podaci za slučaj različitog kuta α

POSTAVKE DOMENE		
	duljina domene paralelne s x osi	1000 (m)
	duljina pera koje djeluje na difrakciju	250 (m)
	dubina na rubu pera	6 (m)
	koeficijent propusnosti pera	0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+15°/+30°/ +60° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.25 Prosječni neto transport sedimenta za $\alpha=15^\circ$ (1), $\alpha=30^\circ$ (2) i $\alpha=60^\circ$ (3)



Slika 9.26 Promjena linije obale za $\alpha=15^\circ$ (1), $\alpha=30^\circ$ (2) i $\alpha=60^\circ$ (3)

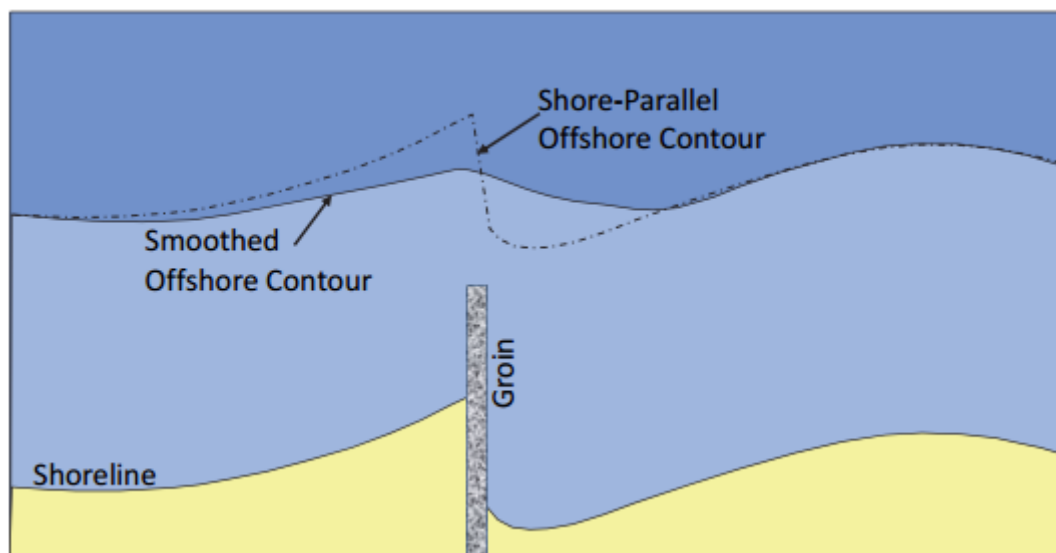
Povećanjem kuta nailaska incidentnog vala na obalu povećava se taloženje materijala prije pera i erozija obale iza pera u središtu domene. Kada je $\alpha=60^\circ$, plaža puno prije izgubi sediment s početka obale, formirajući nataloženu masu na mjestu $x = 200$ (m), odakle se postupak erozije ponavlja. Jednak proces se javlja na desnoj strani pera.

GenCade uzima pretpostavku da se poprečni profil giba paralelno sa samim sobom, što bi značilo da su izobate paralelne s linijom obale. Kako to u stvarnosti nije slučaj, za što vjerniji prikaz batimetrije u dubokom moru i shodno tome realnija rješenja položaja obale i transporta sedimenta, program nudi mogućnost promjene dna pomoću ISMOOTH parametra.

ISMOOTH parametar predstavlja uvijek pozitivan, neparan broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici modela, pomoću kojeg se računa blago zakrivljena kontura morskog dna kao reprezentativna za sve konture dna između dubine za koju se unose referentni ulazni valni parametri i dubine na kojoj se val lomi bez difrakcije.

Oblik reprezentativne konture dna se konstantno računa koristeći položaj obale u tom trenutku i preporuča se da korisnik varira ISMOOTH parametar kako bi rezultirajuće ponašanje obale bilo što realnije.

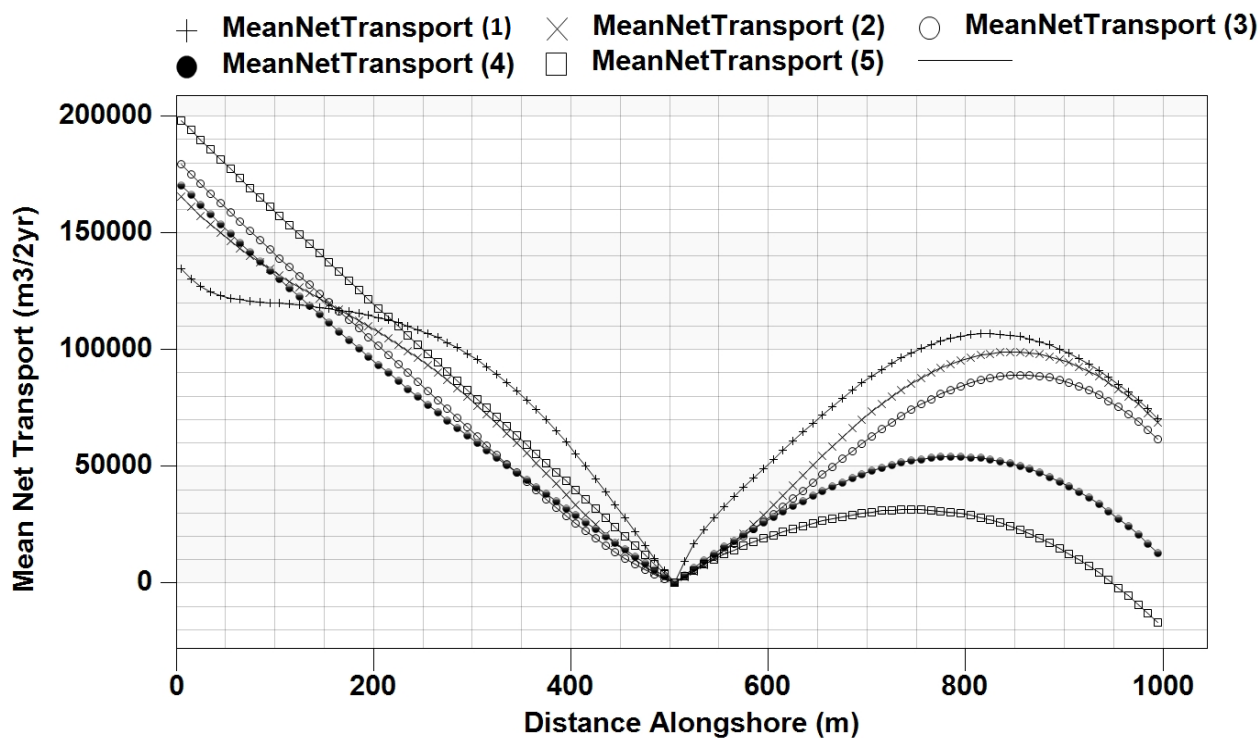
Za najmanju moguću vrijednost $ISMOOTH=1$, kontura dna je paralelna s linijom obale, što je prikazano crtkanom linijom na slici 9.28. [4]. Povećavajući vrijednost parametra kontura morskog dna u dubokom moru je sve manje zakrivljena i za vrijednost $ISMOOTH=N$ postaje ravna linija paralelna s x osi.



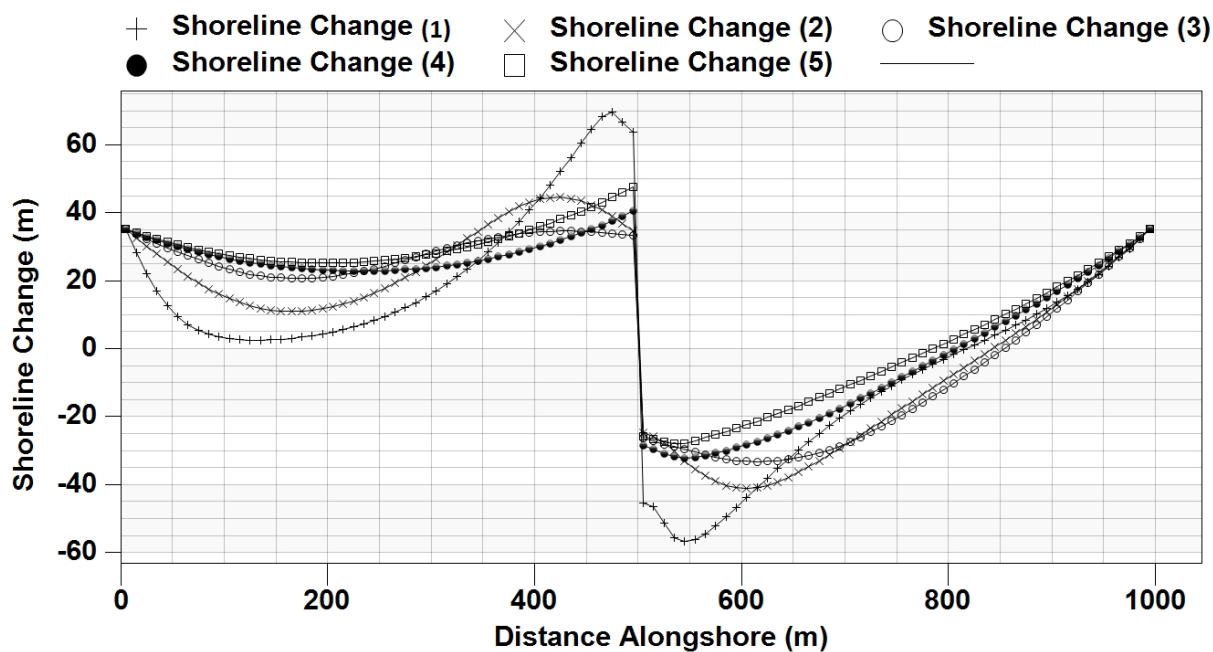
Slika 9.27 Prikaz utjecaja ISMOOTH parametra na konturu na morskoj granici [4]

Tablica 9.12 Ulazni podaci za slučaj različitog ISMOOTH parametra

POSTAVKE DOMENE		
	duljina domene paralelne s x osi	1000 (m)
	duljina pera koje djeluje na difrakciju	150 (m)
	dubina na rubu pera	6 (m)
	koeficijent propusnosti pera	0.0
POSTAVKE MREŽE		
Δx	konstantna širina ćelija	10 (m)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
Δt	vremenski korak	0.5 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.5
K_2	empirijski koeficijent	0.25
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	3/ 13/ 23/ 63/ 101
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>moving</i> s pomakom 0.001 (m) po vremenskom koraku, odnosno 0.048 (m) po danu ili 35.088 (m) po simulaciji		
PARAMETRI VALA		
H	valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.28 Prosječni neto transport sedimenta za ISMOOTH=3 (1), ISMOOTH=13 (2), ISMOOTH=23 (3), ISMOOTH=63 (4) i ISMOOTH=101 (5)



Slika 9.29 Promjena linije obale za ISMOOTH=3 (1), ISMOOTH=13 (2), ISMOOTH=23 (3), ISMOOTH=63 (4) i ISMOOTH=101 (5)

9.5. Objekti

Svi objekti u GenCadeu utječu na transport sedimenta, a općenito se dijele na one koji uzrokuju difrakciju i objekte koji nemaju utjecaj na istu.

Postoji mogućnost zadavanja pera, lukobrana vezanih uz obalu, slobodnostojećih valobrana, podmorskih pragova, obalnih zidova, prihranjivanja plaže, izvora i ponora sedimenta, te raznih kompleksnijih konstrukcija kombiniranjem navedenih osnovnih. U nastavku su opisana i ispitana osnovna svojstva objekata korištenih u radu za simulaciju plaže Petrovac.

9.5.1. Pero

Simulacija obuhvaća dva pomaka sedimenta vezana za pero:

- zaobilaženje oko morskog ruba pera,
- transmisiju kroz pero, oko njegovog kopnenog dijela ili preko pera.

Zaobilaženje sedimenta oko ruba pera se definira koeficijentom zaobilaženja koji se računa za svaki vremenski korak:

$$BYP = 1 - \frac{D_G}{D_{LT}} \quad (9.78)$$

a ono će se ostvariti ako je zadovoljen uvjet:

$$D_G \leq D_{LT} \quad (9.79)$$

gdje je :

D_G - dubina na rubu pera (m),

D_{LT} - dubina aktivnog transporta sedimenta uzduž obale, koja je jednaka dubini na kojoj se srednja vrijednost gornje desetine valnih visina $H_{1/10}$ lomi na uzvodnoj strani objekta (m). Uglavnom je značajno manja od prosječne dubine točke spoja sedimenta plaže i morskog dna D_C , osim kod iznimno visokih valnih visina.

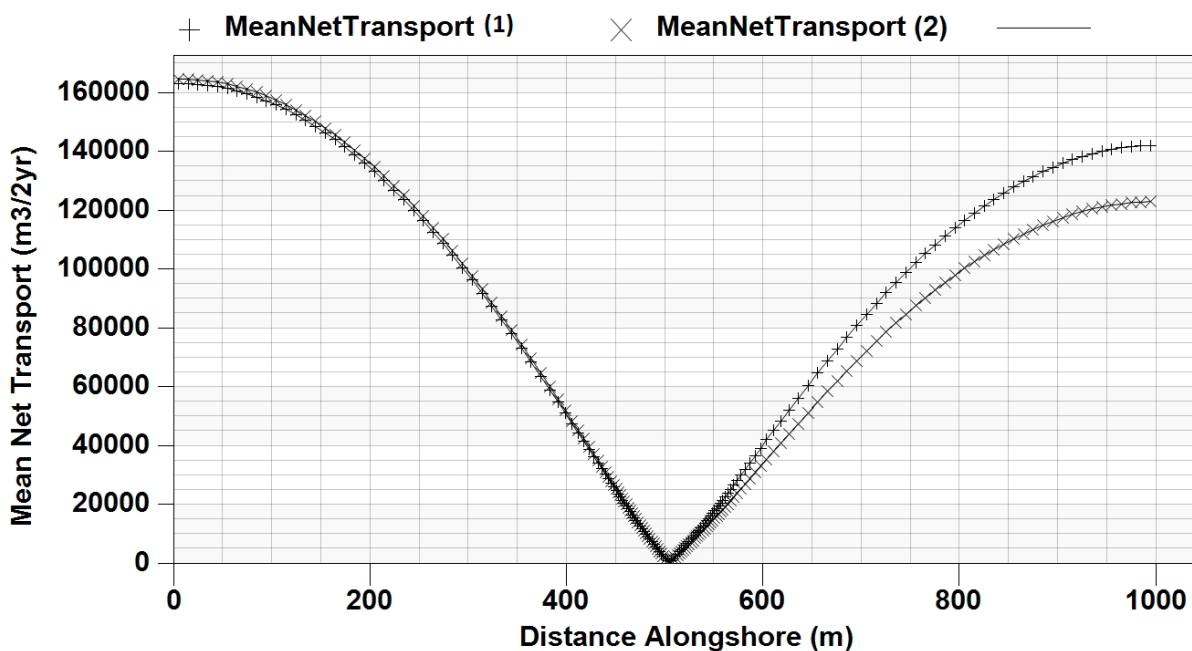
Za korištenje značajne valne visine, odnosno srednje visine trećine najviših valova, izraz se množi s 1.27 što predstavlja faktor pretvorbe značajne valne visine u $H_{1/10}$ [4]:

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma} H_b \quad (9.80)$$

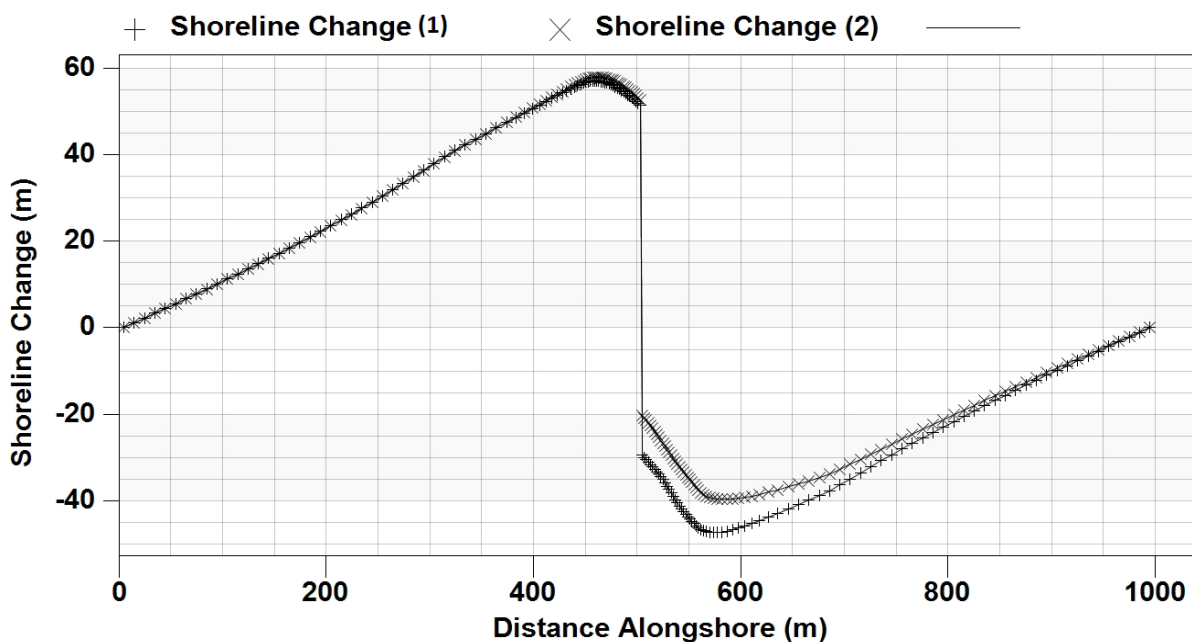
U nastavku je ispitan utjecaj promjene dubine na rubu pera za ulazne podatke iz Tablice 9.13.

Tablica 9.13 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja dubine D_G

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje utječe na difrakciju		150 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
(1)	dubina na rubu pera	6 (m)
(2)	dubina na rubu pera	12 (m)
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.30 Prosječni neto transport sedimenta za $D_G=6$ (m) (1) i $D_G=12$ (m) (2)



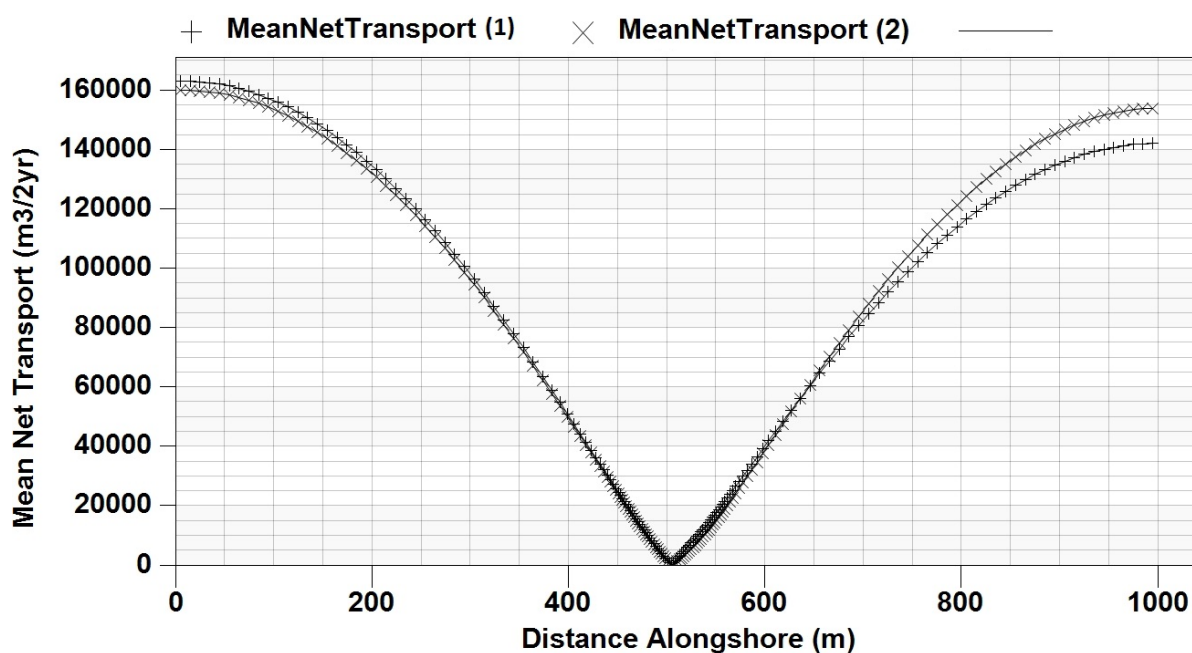
Slika 9.31 Promjena linije obale za $D_G=6$ (m) (1) i $D_G=12$ (m) (2)

Kod pera s manjom dubinom na vrhu se uočava veći prosječni neto transport sedimenta za vrijednost $x = 1000$ (m) i veća erozija na desnoj strani pera, dok je taloženje sedimenta na lijevoj strani nešto veća kod pera sa većom dubinom D_G jer je veći i transport sedimenta na početku domene.

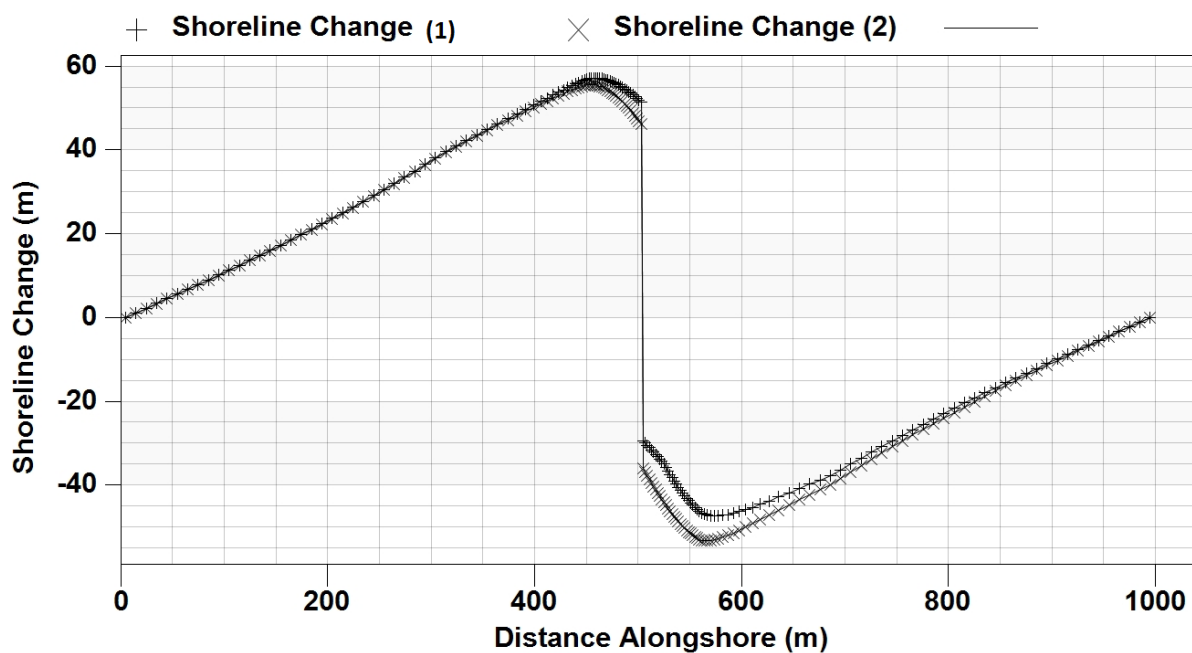
Iako u stvarnosti svi objekti u određenom stupnju imaju efekt na valove, korisniku se pruža mogućnost zadavanja pera kao objekta koji utječe na difrakciju ili nema utjecaja na istu, a razlike u rješenjima su prikazane na Slikama 9.33. i 9.34.

Tablica 9.14 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja pera na difrakciju

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera		150 (m)
koeficijent propusnosti pera		0.0
(1)	pero koje utječe na difrakciju	
	dubina na rubu pera	6 (m)
(2)	pero koje ne utječe na difrakciju	
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.32 Prosječni neto transport sedimenta za pero koje utječe na difrakciju (1) i pero koje ne utječe na difrakciju (2)



Slika 9.33 Promjena linije obale za pero koje utječe na difrakciju (1) i pero koje ne utječe na difrakciju (2)

Za $x = 0$ (m) neto transport sedimenta je nešto veći kod pera koje utječe na difrakciju pa je veće i taloženje na lijevoj strani objekta. Kod pera koje ne utječe na ogib i smanjenje valnih parametara, neto transport sedimenta za $x = 1000$ (m) i erozija na desnoj strani pera su veći.

Transmisija sedimenta kroz pero, oko njegovog kopnenog dijela ili preko pera određena je koeficijentom propusnosti:

$$0 \leq PERM \leq 1 \quad (9.81)$$

koji za razliku od koeficijenta zaobilaženja korisnik unosi kao ulazni podatak, ocjenjujući ga na osnovu konstrukcijskih karakteristika, visine pera, kontrolom na licu mjesta, itd. Za vrijednost $PERM = 0$ riječ je o nepropusnom peru, a kada je $PERM = 1$ pero je potpuno propusno. [4]

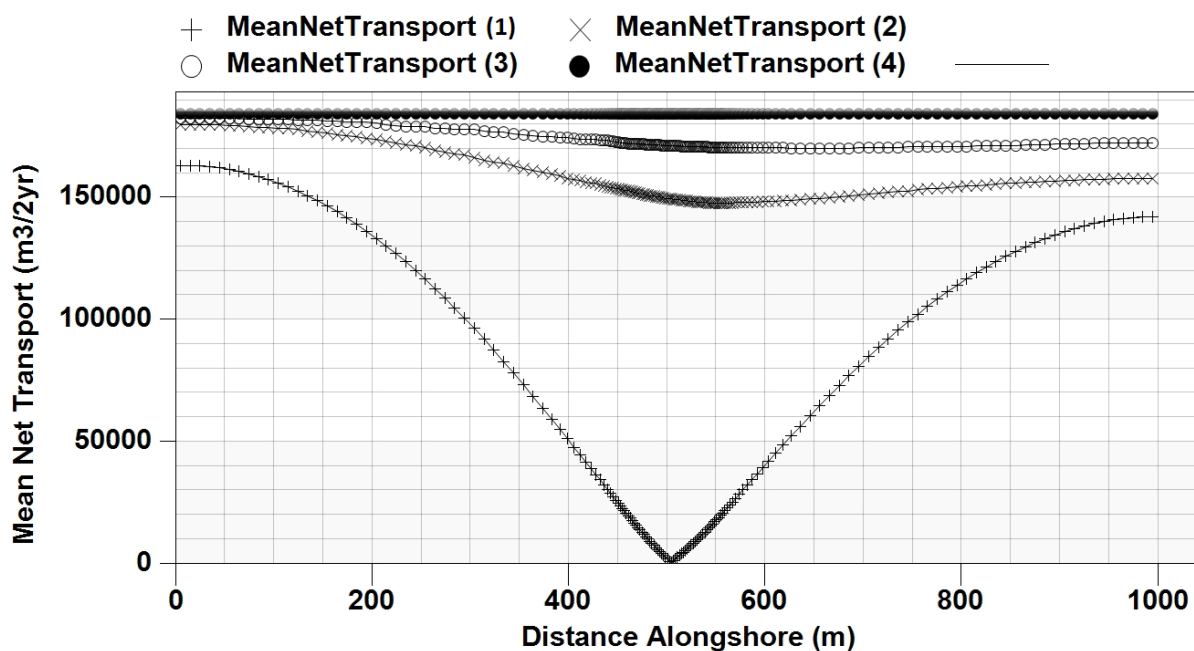
Nakon što su određene vrijednosti koeficijenata zaobilaženja i propusnosti, za svaki vremenski korak se računa ukupni prijenos sedimenta preko pera, oko kopnenog i morskog dijela i kroz samu konstrukciju pera prema izrazu [4]:

$$F = PERM (1 - BYP) + BYP \quad (9.82)$$

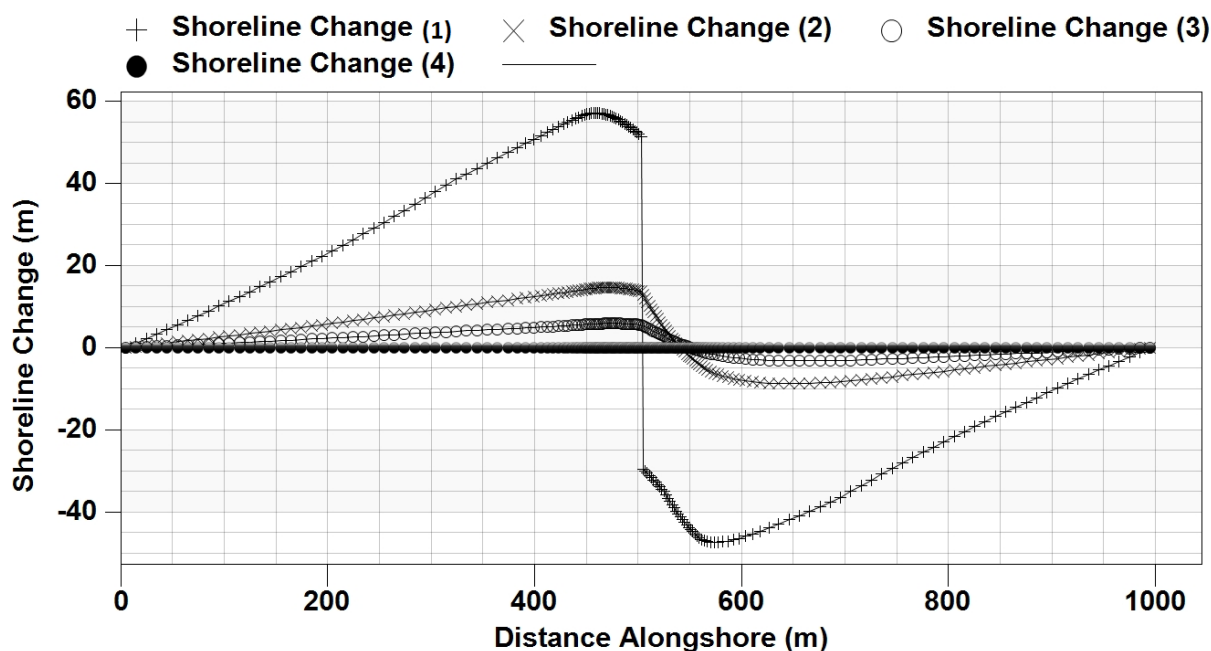
U nastavku je ispitan utjecaj propusnosti pera na rezultate modela za ulazne podatke iz tablice 9.15. Rezultati su prikazani na Slikama 9.35. i 9.36.

Tablica 9.15 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja propusnosti pera

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina pera koje utječe na difrakciju		150 (m)
dubina na rubu pera		6 (m)
(1)	koeficijent propusnosti pera	0.0
(2)	koeficijent propusnosti pera	0.4
(3)	koeficijent propusnosti pera	0.7
(4)	koeficijent propusnosti pera	1
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.34 Prosječni neto transport sedimenta za PERM=0.0 (1), PERM=0.4 (2), PERM=0.7 (3), PERM=1.0 (4)



Slika 9.35 Promjena linije obale za PERM=0.0 (1), PERM=0.4 (2), PERM=0.7 (3), PERM=1.0 (4)

Povećanjem koeficijenta propusnosti smanjuje se transport sedimenta, a taloženje i erozija jačaju u blizini pera i najveće područje obuhvata postižu u slučaju nepropusnog pera, koje u cijelosti zaustavlja nanese sediment. Kod potpuno propusnog pera nema promjene na obali, a transport sedimenta poprima najveće vrijednosti.

9.5.2. Valobran

Valobrani i svi objekti koji se u programu dobiju pomoću njih djeluju na difrakciju valova. Vodeći ulazni podatak koji utječe na odgovor obale je **koeficijent transmisije**, definiran kao omjer visine incidentnog vala neposredno prije valobrana na unutarnjoj strani i neposredno iza valobrana na vanjskoj strani, raspona:

$$0 \leq K_t \leq 1 \quad (9.83)$$

gdje je za $K_t = 0$ transmisija vala spriječena, a u slučaju $K_t = 1$ radi se o potpuno propusnom valobranu. [4]

Koeficijent transmisije se može zadati kao konstantna ili varijabilna vrijednost, pri čemu program računa prikladni koeficijent transmisije ovisno o karakteristikama konstrukcije te vremenski promjenjivim razinama vode i valnim visinama. U tom slučaju se kao ulazni podaci zadaju vrijednosti visine i širine krune, nagibi vanjskog i unutarnjeg pokosa valobrana i srednja veličina stijena koje grade valobran.

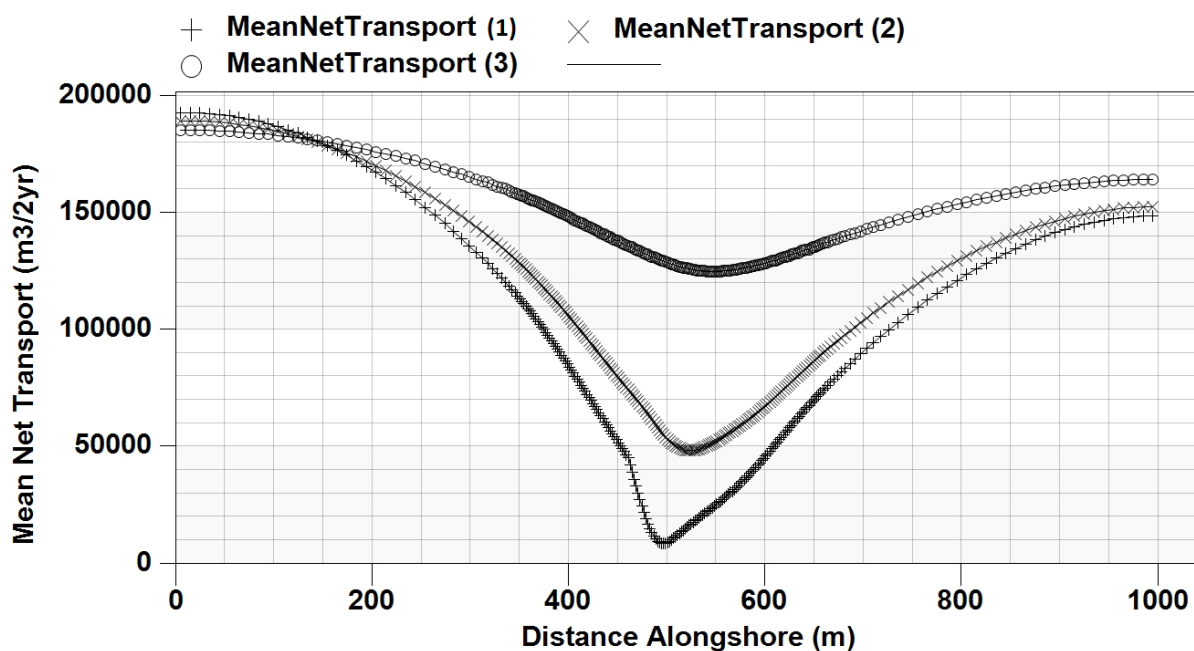
Izbor metode proračuna varijabilnog koeficijenta transmisije ovisi o tipu konstrukcije pa su dane sljedeće metode:

- Seabrook i Hall (1998.) - najprikladnija za potopljene konstrukcije, a za nepotopljene se njeno korištenje ne preporučuje;
- d'Angremond et al. (1996.) - služi za nasute i čvrste konstrukcije te potopljene konstrukcije relativne potopljenosti od -0.75 do 0.5. Ne preporučuje se kod značajno potopljenih i relativno visokih konstrukcija;
- Ahrens (2001.) - jedina od metoda koja daje razumne rezultate za visoke konstrukcije i nema ograničenja u primjeni no, kako je zasnovana prvenstveno na podmorskim pragovima, postoji mogućnost da kod standardnih konstrukcija izračuna preveliki koeficijent transmisije. [4]

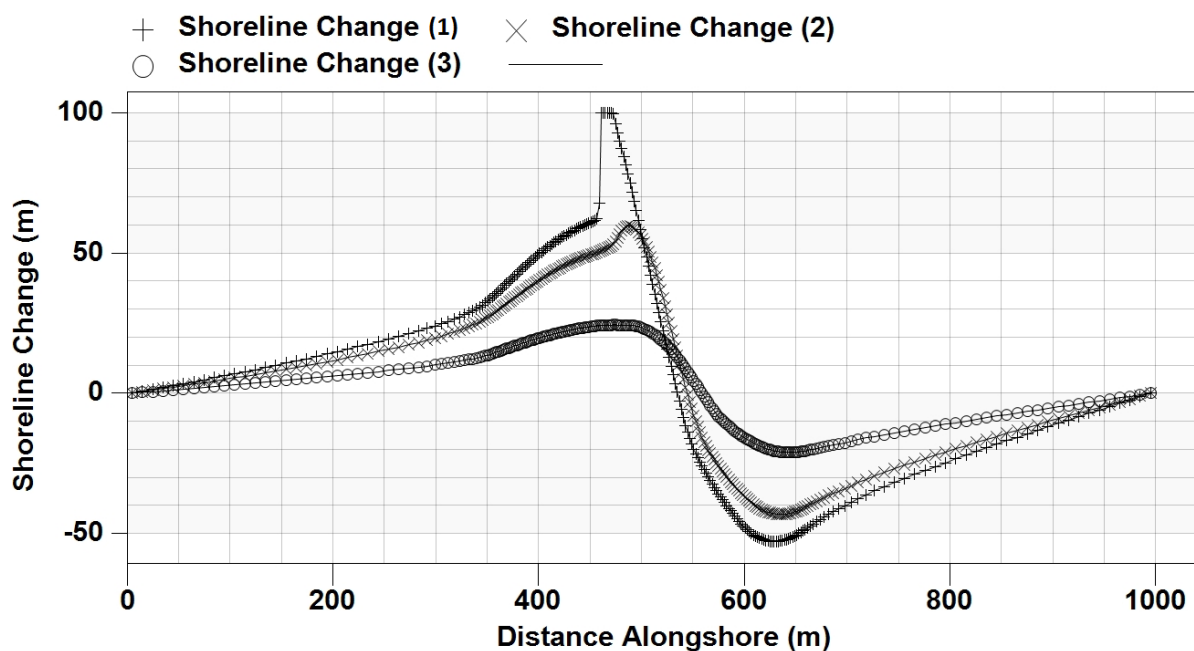
U nastavku je prema ulaznim podacima iz Tablice 9.16 ispitan utjecaj konstantnog koeficijenta transmisije za slobodnostojeći lukobran.

Tablica 9.16 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja transmisije lukobrana

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina slobodnostojećeg lukobrana		90 (m)
dubina na rubovima lukobrana		6 (m)
(1)	konstantan koef. transmisije	0.0
(2)	konstantan koef. transmisije	0.4
(3)	konstantan koef. transmisije	0.7
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.36 Prosječni neto transport sedimenta za $K_t=0.0$ (1), $K_t=0.4$ (2) i $K_t=0.7$ (3)



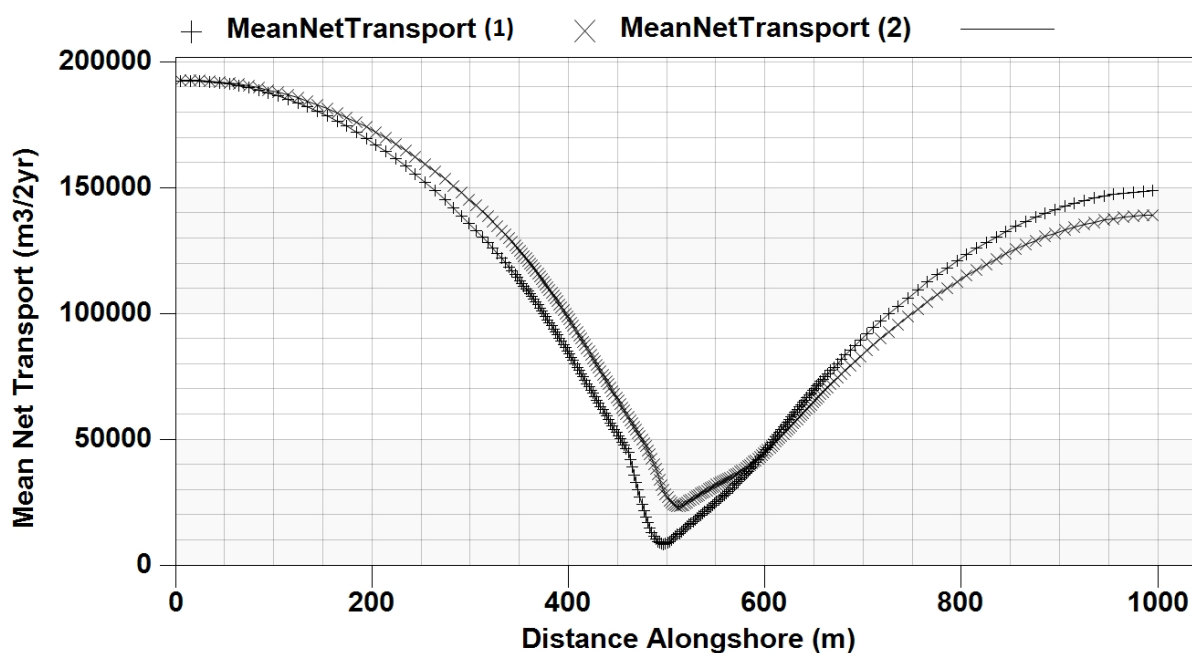
Slika 9.37 Promjena linije obale za $K_t=0.0$ (1), $K_t=0.4$ (2) i $K_t=0.7$ (3)

Smanjenjem koeficijenta transmisije incidentnih valova smanjuje se i prosječni neto transport sedimenta na području lukobrana koji se na početku taloži, pomičući liniju obale prema moru. Dio plaže koji odgovara desnom rubu lukobrana je u većem deficitu za sedimentom za manji koeficijent transmisije.

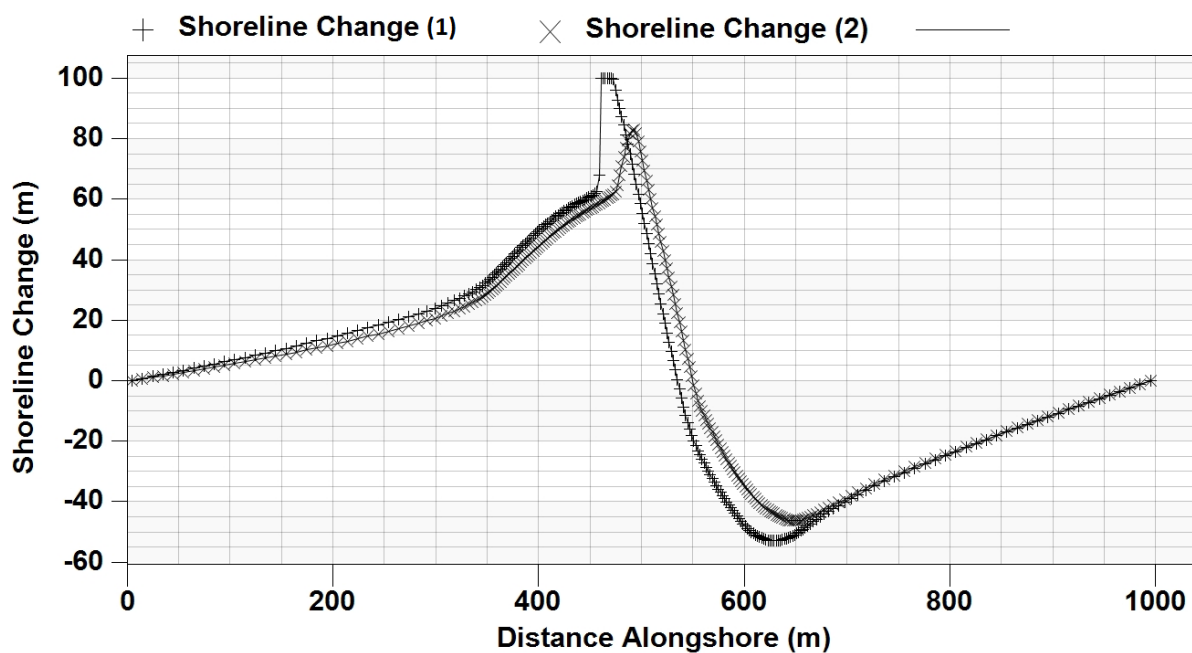
Prema ulaznim podacima iz Tablice 9.17 ispitan je utjecaj promjene dubine na rubovima lukobrana.

Tablica 9.17 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja dubine na rubovima lukobrana

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina slobodnostojećeg lukobrana		90 (m)
konstantan koeficijent transmisije		0.0
(1)	dubina na rubovima lukobrana	6 (m)
(2)	dubina na rubovima lukobrana	12 (m)
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.38 Prosječni neto transport sedimenta za dubinu na rubu lukobrana u iznosu 6 (m) (1) i 12 (m) (2)



Slika 9.39 Promjena linije obale za dubinu na rubu lukobrana u iznosu 6 (m) (1) i 12 (m) (2)

Prosječni neto transport sedimenta je na lijevom rubu lukobrana manji za manju dubinu na tom mjestu, što rezultira većim taloženjem i pomicanjem linije obale prema lukobranu. Na desnoj strani domene je neto transport manji za slučaj veće dubine na rubu lukobrana.

9.5.3. Prihranjivanje plaže

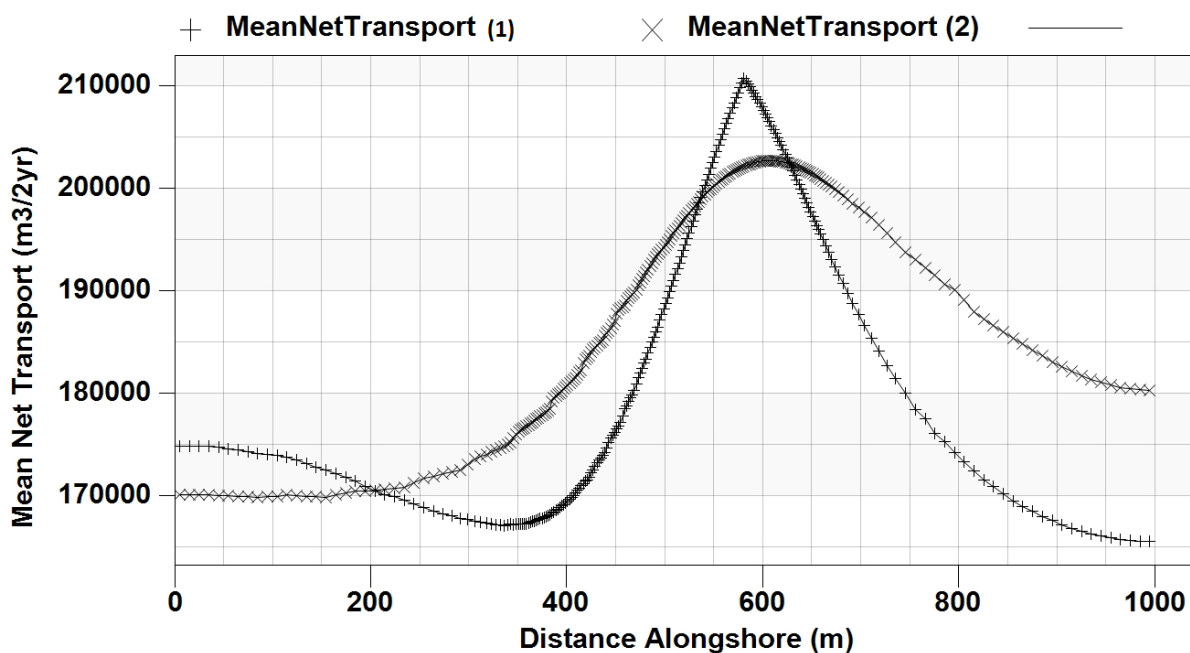
Pri zadavanju prihranjivanja plaže GenCade uzima sljedeće pretpostavke:

- materijal prihranjivanja ima istu veličinu zrna kao i ostatak plaže,
- ravnotežni oblik poprečnog profila prihranjenog dijela plaže ovisi o veličini zrna. Zadano proširenje berme odgovara očekivanoj širini berme koju će prihranjeni dio plaže razviti, nakon što se uravnoteži pod djelovanjem valova i struja,
- visina berme prihranjenog dijela plaže je jednaka visini berme ostatka plaže.

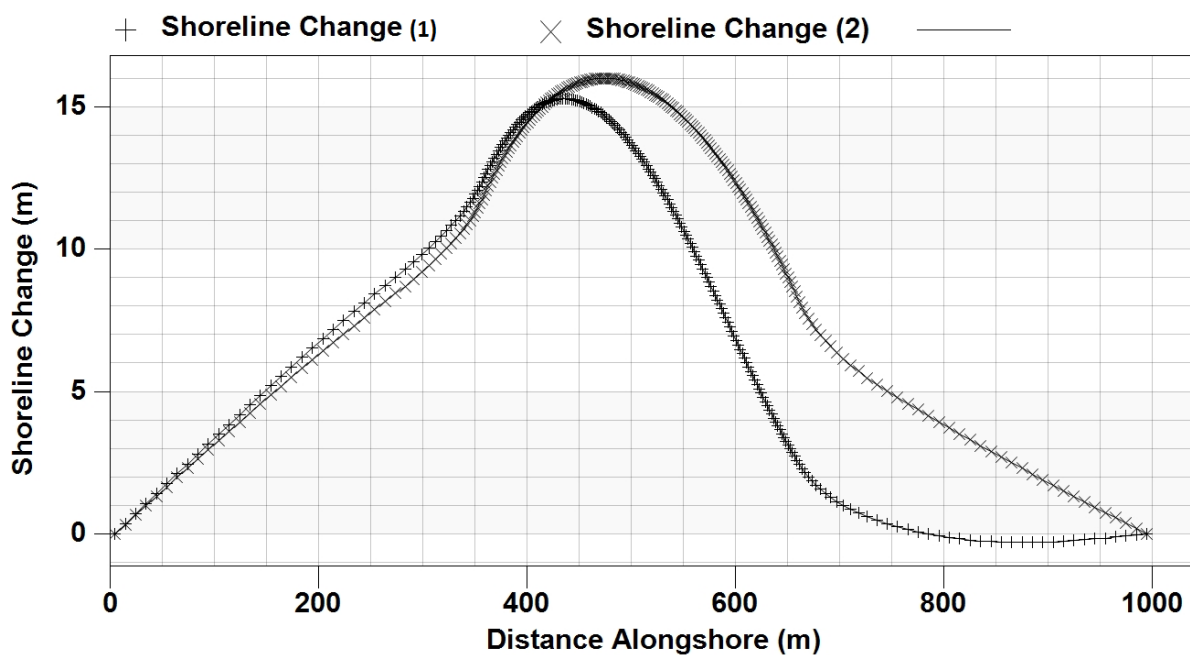
Za ulazne podatke u tablici 9.18 ispitan je utjecaj promjene očekivane širine berme.

Tablica 9.18 Ulazni podaci za ispitivanje utjecaja prihranjivanja plaže

POSTAVKE DOMENE		
duljina domene paralelne s x osi		1000 (m)
duljina područja prihranjivanja		150 (m)
datum početka prihranjivanja		07.08.2015.
datum kraja prihranjivanja		07.10.2015.
(1)	proširenje berme	20 (m)
(2)	proširenje berme	30 (m)
POSTAVKE MREŽE		
Δx_{min}	minimalna širina ćelija	2 (m)
Δx_{max}	maksimalna širina ćelija	10 (m)
	prirast	1.1
Δt	vremenski korak	0.05 (h)
POSTAVKE MODELA		
	vrijeme trajanja simulacije	2 (god)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	0.2 (mm)
D_B	prosječna visina berme	1 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	23 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.77
K_2	empirijski koeficijent	0.77
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	63
RUBNI UVJETI NA BOČNIM GRANICAMA MREŽE		
<i>pinned</i>		
PARAMETRI VALA		
H	značajna valna visina	0.5 (m)
T	period	6 (s)
α	kut koji dubokovodni val zatvara s normalom na obalu	+30° *
*pozitivan predznak znači da valovi djeluju na obalu s lijeve na desnu stranu		



Slika 9.40 Prosječni neto transport sedimenta za proširenje berme u iznosu 20 (m) (1) i 30 (m) (2)



Slika 9.41 Promjena linije obale za proširenje berme u iznosu 20 (m) (1) i 30 (m) (2)

Transport sedimenta uglavnom je veći pri većem proširenju berme, dok je na početku i u središtu domene prosječni transport ipak veći za manju širinu berme. Linija obale ima veći pomak za širu bermu.

10. PRIMJENA GENCADE MODELA NA PLAŽI PETROVAC

10.1. Kalibracija modela

Prvi korak u prikazu dugoročnog ponašanja obale u uvjetima djelovanja vjetrovnih valova je kalibracija modela. Za postavljanje domene promatrane plaže koriste se postojeći podaci o stacionažama, visinskim kotama referentnih točaka te udaljenosti točaka spoja kopna i mora do referentnih točaka za profile A, B, C i D iz Monitoringa [8], a položaj obalnog zida je preuzet iz [9]. Projekcija plaže je u modelu postavljena prema [9] sa geodetskim datumom i kartografskom projekcijom koja vrijedi za prostor Crne Gore: WGS84 UTM zone 34N (Slika 10.1).

Postupak se vrši na način da se iz prethodno navedenih podataka i *Google Earth* povijesnih podloga odredi obalna linija na datum 18.09.2010. i 13.01.2011. kao referentno razdoblje djelovanja najrazornijih zimskih valova i shodno tome značajnih promjena na licu plaže. Na Slici 10.1 zelenom linijom je prikazano početno stanje, a crnom linijom konačno stanje obalne linije. Plava linija označava položaj obalnog zida.



Slika 10.1 Prikaz modela plaže Petrovac

Cilj kalibracije je postizanje konačne obalne linije na datum 13.01.2011. podešavanjem najosjetljivijih parametara modela, što je postignuto ulaznim podacima iz Tablice 10.1. Ulazni podaci za značajnu valnu visinu i period te smjer djelovanja valova dobiveni su u Tablici 7.1. Uzete su u obzir morske mijene, izračunate kao periodične funkcije s otklonom 10 (cm) od srednje razine mora, amplitude 0.5 (m) i perioda 745 (s).

Tablica 10.1 Ulazni podaci za kalibraciju modela

POSTAVKE MODELA		
početak simulacije		18.09.2010. u 14:00 sati
kraj simulacije		13.01.2011. u 14:00 sati
vrijeme trajanja simulacije		118 dana
Δt	vremenski korak	0.02 (h)
DTSAVE	sačuvani vremenski korak	30 (h)
POSTAVKE MREŽE		
	ukupna duljina mreže	520 (m)
Δx	konstantna širina ćelija	8 (m)
POSTAVKE PLAŽE		
d_{50}	prosječna veličina zrna	5 (mm)
D_B	visina berme 18.09.2010. [8]	
	profil A	0.83 (m)
	profil B	1.27 (m)
	profil C	0.66 (m)
	profil D	0.85 (m)
D_C	prosječna dubina točke spoja sedimenta plaže i morskog dna	7 (m)
K_1	empirijski koeficijent	0.35
K_2	empirijski koeficijent	0.3
RUBNI UVJETI NA MORSKOJ GRANICI		
ISMOOTH	broj ćelija za ublažavanje kontura na morskoj granici	53
RUBNI UVJET NA ISTOČNOJ GRANICI MREŽE		
<i>moving s pomakom -25.57 (m) po simulaciji</i>		
RUBNI UVJET NA ZAPADNOJ GRANICI MREŽE		
<i>pinned</i>		

U zapadnoj zoni plaže bilježi se postojanje bujica kao prirodnih dotoka sedimenta. Dijeljenjem podataka o količini godišnjeg dotoka materijala sa brojem kišnih dana u periodu trajanja simulacije procjenjuje se da količina materijala koja je prihranila područje u periodu 118 dana iznosi 74851.2 m³. Navedeni iznos se modelom raspoređuje na dva izvora sedimenta, i to 70% iznosa na područje profila C i D, a 30% na područje profila E zbog broja i rasporeda bujičnih kanala. Vrijednosti prihranjivanja su navedene u Tablici 10.2, a zone obuhvata su prikazane narančastom bojom na Slici 10.2.

Tablica 10.2 Prihranjivanje iz bujičnih kanala

Prihranjivanje		profil C i D (m ³ /h)	profil E (m ³ /h)
Početak	Kraj		
18.09.2010.	30.09.2010.	16.1010	6.8940
01.10.2010.	31.10.2010.	18.8280	8.0730
01.11.2010.	30.11.2010.	22.1400	9.4860
01.12.2010.	31.12.2010.	14.2830	6.1200
01.01.2011.	13.01.2011.	21.7530	9.3240



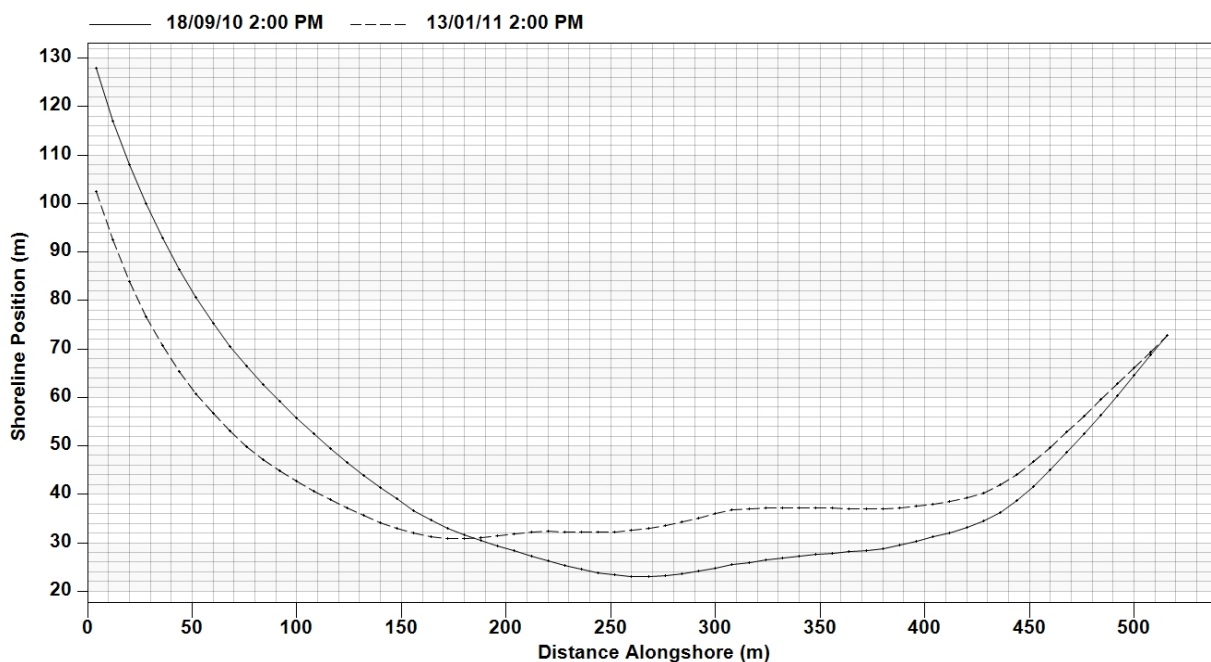
Slika 10.2 Zone prihranjivanja iz bujičnih kanala

Rezultati za promatrano razdoblje i navedene ulazne podatke su prikazani na Slici 10.3. Zelena linija prikazuje početno mjereno stanje obale, crna prikazuje krajnje mjereno stanje, a smeđa linija označava rezultat dobiven proračunom modela. Jasno se vidi kako krajnje mjereno, odnosno potrebno stanje na datum 13.01.2011. koincidira s rješenjem dobivenim modelom, uz lokalna odstupanja od prosječno cca 1 (m). Zaključuje se da parametri korišteni u kalibraciji modela zadovoljavaju formu stvarnog stanja i usvajaju se kao referentni ulazni podaci u daljnjem ispitivanju rješenja u pogledu stabilizacije plaže.



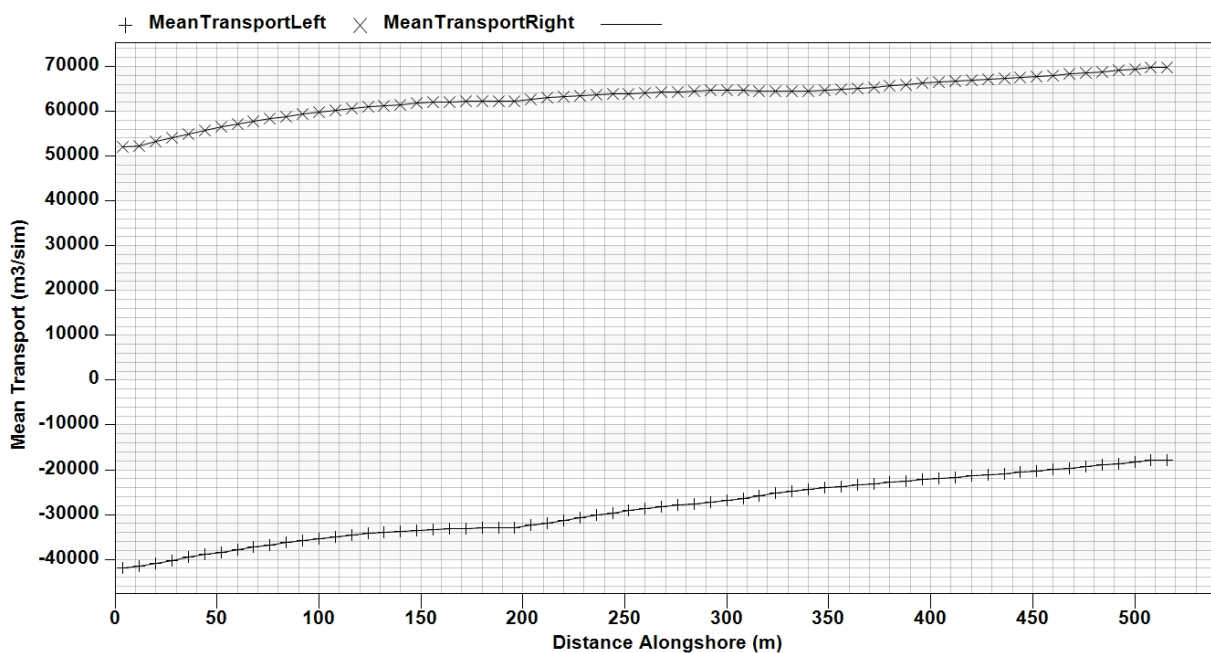
Slika 10.3 Rezultati modela

Grafički prikaz položaja početne i konačne, modelom dobivene obalne linije nalazi se na Slici 10.4 gdje puna linija označava početno, a crtkana linija konačno stanje. Lijeva strana predstavlja istočni rub plaže i odgovara *moving* rubnom uvjetu s pomakom -25.57 (m), a desna strana označava zapadni rub plaže sa rubnim uvjetom *pinned*.



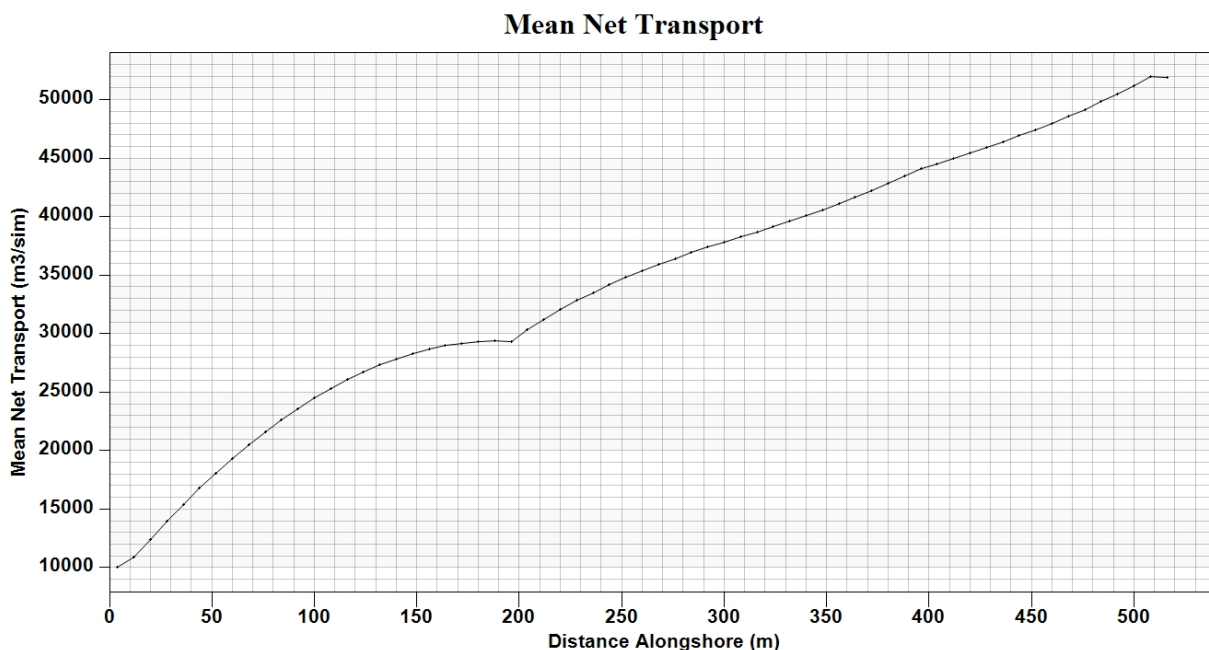
Slika 10.4 Položaj linije obale na početku i na kraju simulacije

Transport sedimenta u lijevom i desnom smjeru je prikazan na Slici 10.5. S obzirom na desni koordinatni sustav mreže modela, desni transport sedimenta usmjeren prema zapadu je pozitivan, a lijevi transport usmjeren prema istoku je negativan.



Slika 10.5 Transport sedimenta u lijevom i desnom smjeru

Suma lijevog i desnog transporta sedimenta predstavlja prosječni neto transport sedimenta, gdje se radi zahtjeva o povlačenju obalne linije na lijevoj strani domene bilježi smanjeni transport sedimenta i iznosi 10042 (m³), koji se postupno povećava prema zapadnom rubu plaže na kojem iznosi 51928 (m³) (Slika 10.6).



Slika 10.6 Prosječni neto transport sedimenta

Tablica 10.3 Udio energije vala svakog smjera za kalibraciju

smjer (met.)		energija	energija (%)
W	-90	17954.20	5.94
SW	-135	94051.35	31.12
S	180	76817.16	25.42
SE	135	113355.39	37.51
suma		302178.10	100.00

Uvidom u raspodjelu energije s obzirom na smjer incidentnog vala dolazi se do zaključka kako je glavnina gibanja nanosa usmjerena prema zapadnom rubu plaže što je rezultatima i utvrđeno. Iz smjera S i SE potječe ukupno 63 % energije vala pristiglog do zone dubokog mora neposredno ispred lokacije zahvata.

10.2. Varijantna rješenja stabilizacije plaže Petrovac

Jedno od rješenja stabilizacije plaže i povećanja lica plaže iznad razine mora za uvjete valovanja iz kalibracijskog modela je izgradnja dvaju pera udaljenih 5-10 (m) od obalnog zida, okomito položenih na isti, na međusobnoj udaljenosti 165 (m). Dubina na rubu pera ukupne duljine 50 (m) iznosi 4 (m). Rezultati takvog tipa rješenja za skaliranu maksimalnu valnu visinu smjera S na vrijednost 3.93 (m) i period na 7.28 (s) su dani na Slici 10.7. Rubni uvjet na istočnoj strani domene je *gated* s nepropusnim perom duljine 50 (m) s vrhom na dubini 2(m).



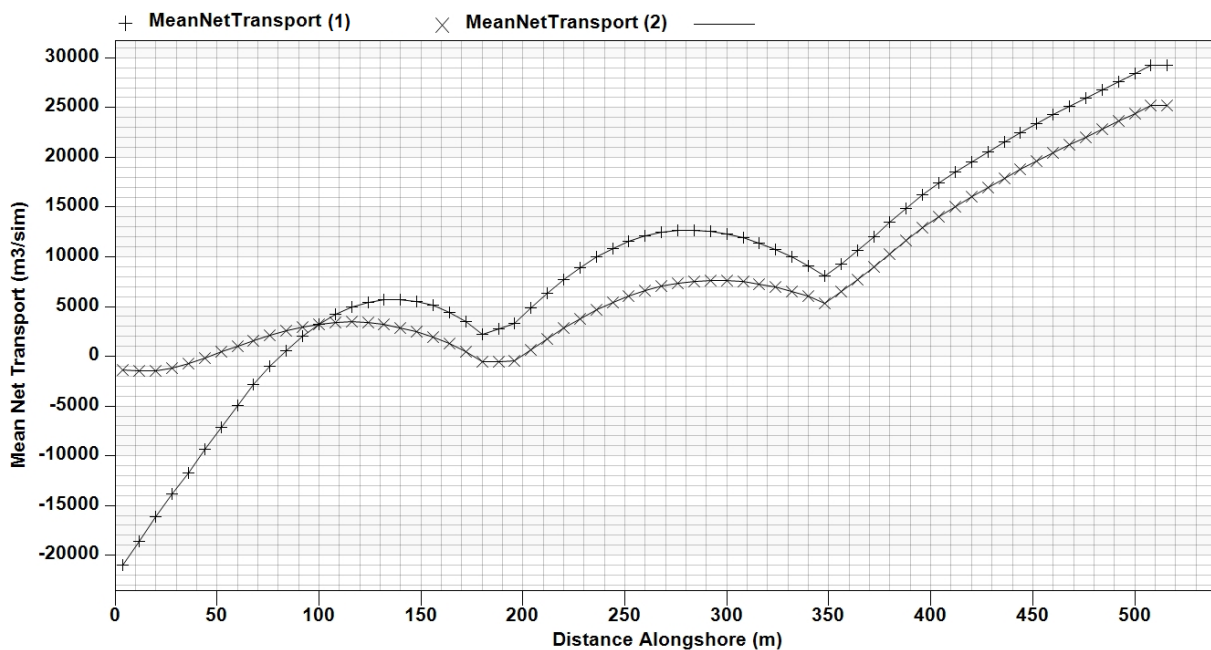
Slika 10.7 Rješenje s istočnim rubnim uvjetom - nepropusno pero 50 (m) i 2 (m) dubine

Primjer rješenja s perima na središnjem dijelu domene s istim ulaznim podacima, ali s nepropusnim istočnim rubnim uvjetom u vidu pera duljine 120 (m) i vrhom na 5 (m) dubine prikazan je na Slici 10.8. Dobivenim rezultatima se potvrđuje potreba stabilizacije istočnog ruba plaže za ovakav tip rješenja zbog nepovoljnog djelovanja vjetrovnih valova na taj dio obale.



Slika 10.8 Rješenje s istočnim rubnim uvjetom - nepropusno pero 120 (m) i 5 (m) dubine

Očekivano je prosječni neto transport na istočnom dijelu plaže veći kod rubnog uvjeta s dužim pera. (Slika 10.9)



Slika 10.9 Prosječni neto transport sedimenta za kraće (1) i duže (2) rubno pero

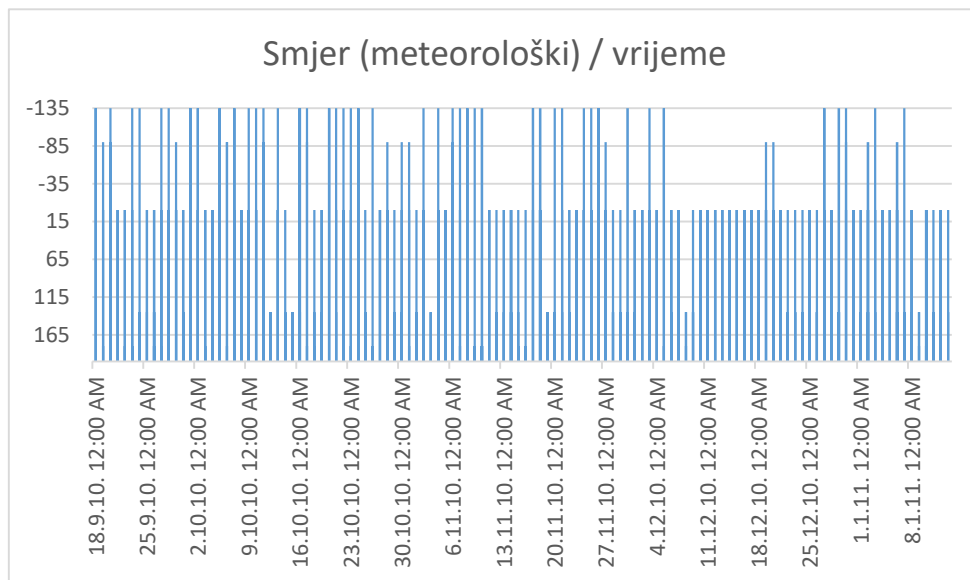
U nastavku je pregled rezultata s rješenjem problema stabilizacije postavljanjem podmorskog praga na 100 (m) od središta domene, dok udaljenost rubova praga od obale na kojima je dubina 3 (m) iznosi cca 70 (m) radi nesmetanog prolaza brodova do obližnje lučice. Korišteni su jednaki ulazni podaci kao u prethodnom slučaju stabilizacije perima s nepropusnim rubnim uvjetom i variranjem širine krune praga 20 - 150 (m), s nagibima unutarnjeg i vanjskog pokosa 1:2 i srednjom veličinom promjera gradiva praga 1.5 (m).



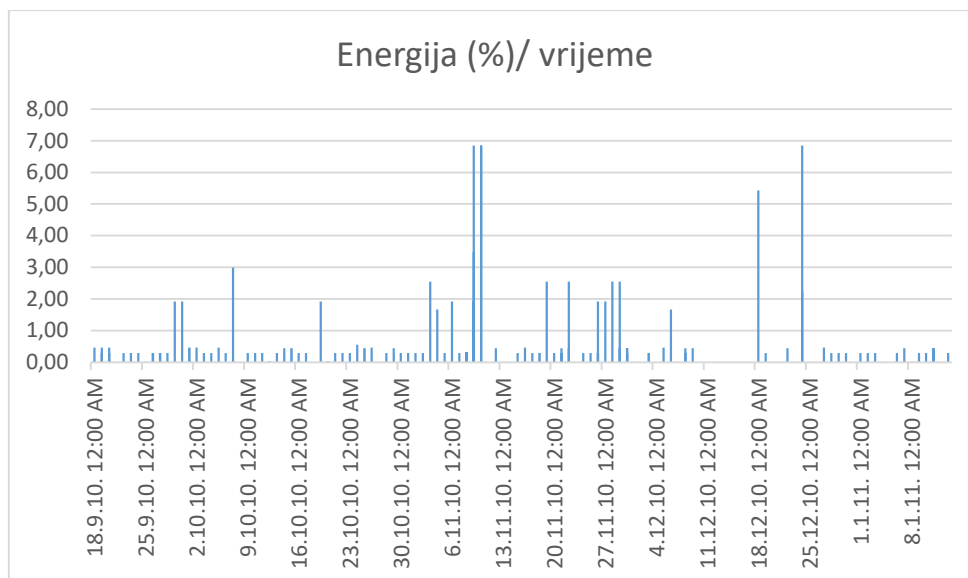
Slika 10.10 Prag širine 20 m sa skaliranim maksimalnim parametrima vala smjera S



Slika 10.11 Prag širine 150 m sa skaliranim maksimalnim parametrima vala smjera S



Slika 10.12 Prikaz promjene smjera u promatranom vremenu



Slika 10.13 Udio energije za svaki vremenski korak sa skaliranim maksimalnim parametrima vala smjera S

Tablica 10.4 Udio energije vala svakog smjera sa skaliranim maksimalnim parametrima vala smjera S

smjer (met.)		energija	energija (%)
W	-90	17954.20	6.32
SW	-135	94051.35	33.11
S	180	58678.99	20.66
SE	135	113355.39	39.91
	suma	284039.93	100.00

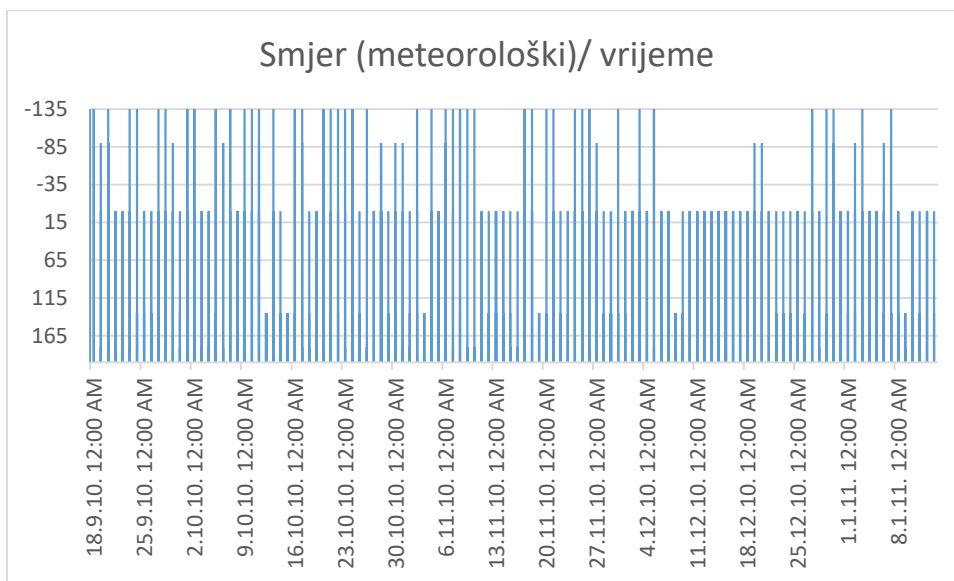
Prema rezultatima se može zaključiti da u prisustvu ekstremnih valnih događaja, valnih visina iznosa 3.93 (s) i perioda 7.28 (s), drastično povećanje širine krune praga na 150 (m) nema značajan utjecaj na stabilizaciju plaže. Stoga se pristupilo ispitivanju djelovanja skaliranih valnih visina ekstremnih valnih događaja na vrijednosti 1 (m) i perioda na 4.5 (m). Rezultati su prikazani na Slikama 10.14 i 10.15.



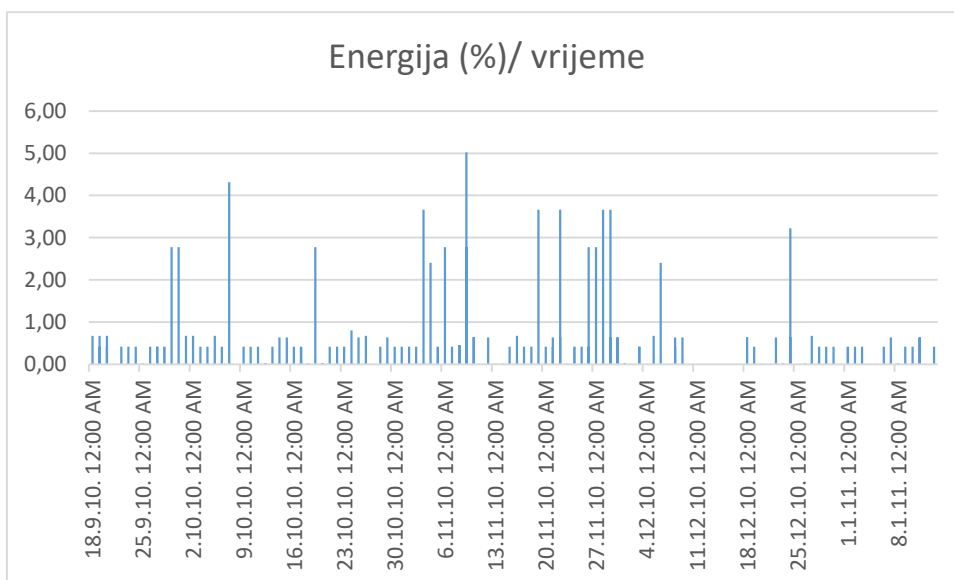
Slika 10.14 Prag širine 20 m sa skaliranim maksimalnim parametrima vala



Slika 10.15 Prag širine 150 m sa skaliranim maksimalnim parametrima vala



Slika 10.16 Prikaz promjene smjera u promatranom vremenu



Slika 10.17 Prikaz udjela energije u promatranom razdoblju sa skaliranim maksimalnim parametrima vala

Tablica 10.5 Udio energije vala svakog smjera skaliranim maksimalnim parametrima vala

smjer (met.)	energija	energija (%)	
W	-90	17954.20	9.11
SW	-135	57688.74	29.26
S	180	40497.69	20.54
SE	135	81003.47	41.09
	suma	197144.10	100.00

Također su ispitani nepropusni rubni uvjeti na obje granice domene. Zapadna strana je određena rubnim uvjetom *gated* s nepropusnim perom duljine 130 (m), a istočna s nepropusnim perom duljine 120 (m). Dubina na vrhu pera kod oba slučaja je 5 (m). Parametri vala su kod ekstremnih valnih događaja smanjeni na valnu visinu 1 (m) i period 4.5 (s).

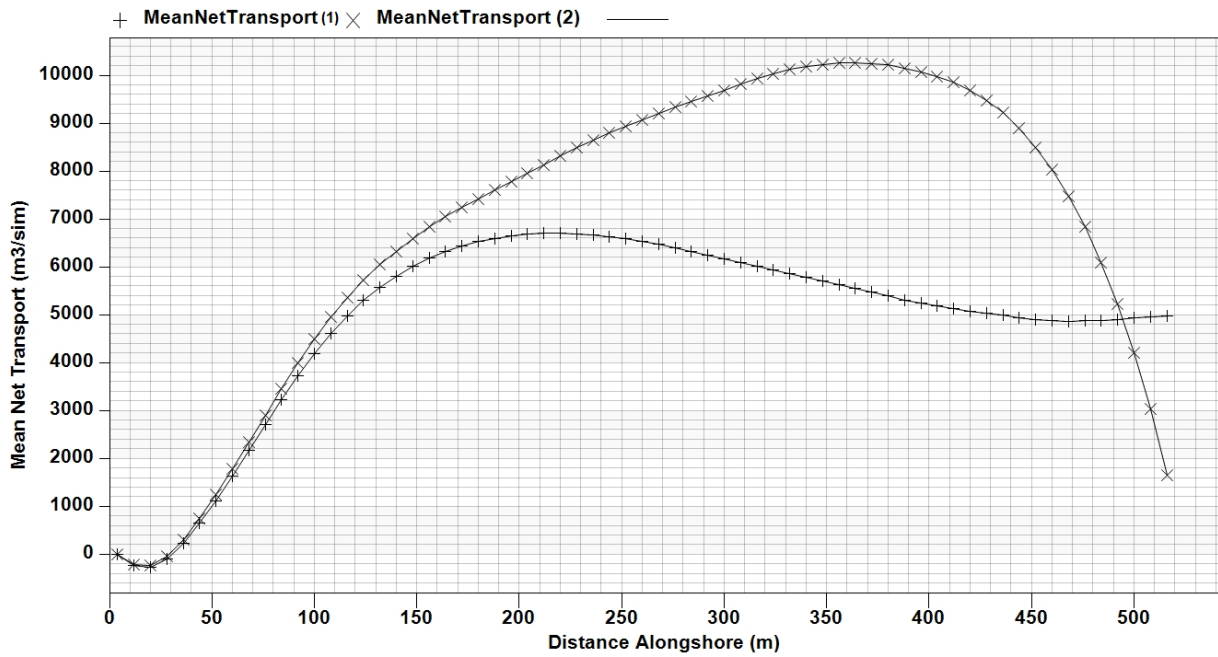


Slika 10.18 Prag širine 20 m sa *gated* nepropusnim rubnim uvjetima

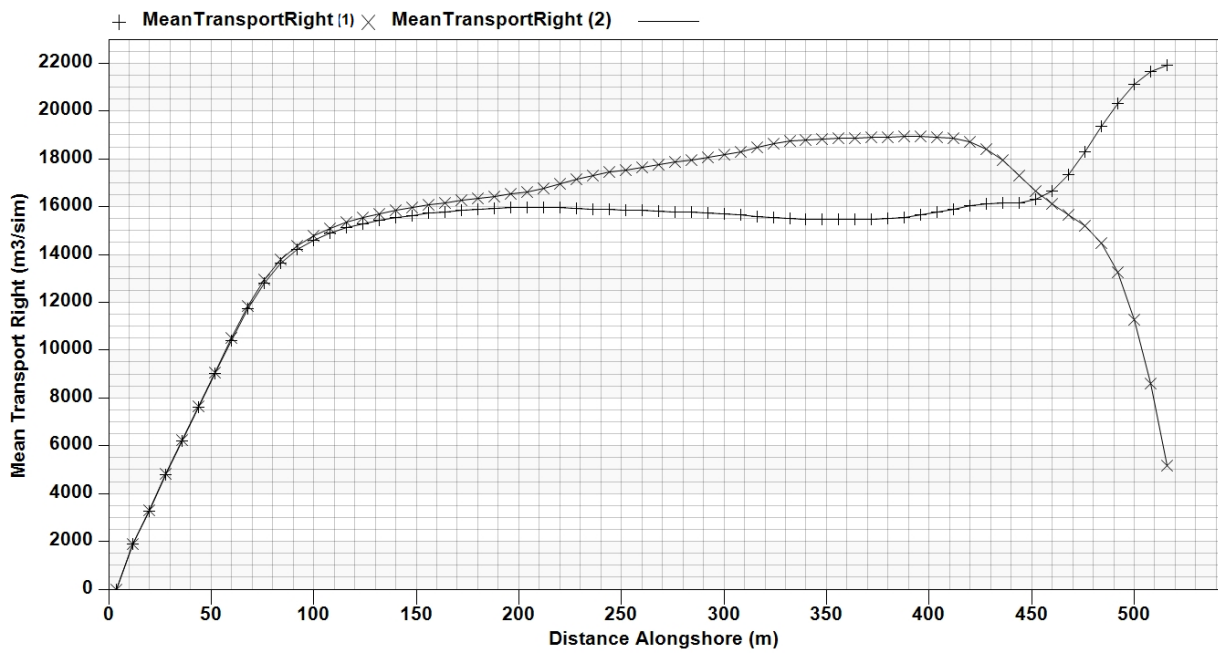


Slika 10.19 Prag širine 150 m sa gated nepropusnim rubnim uvjetima

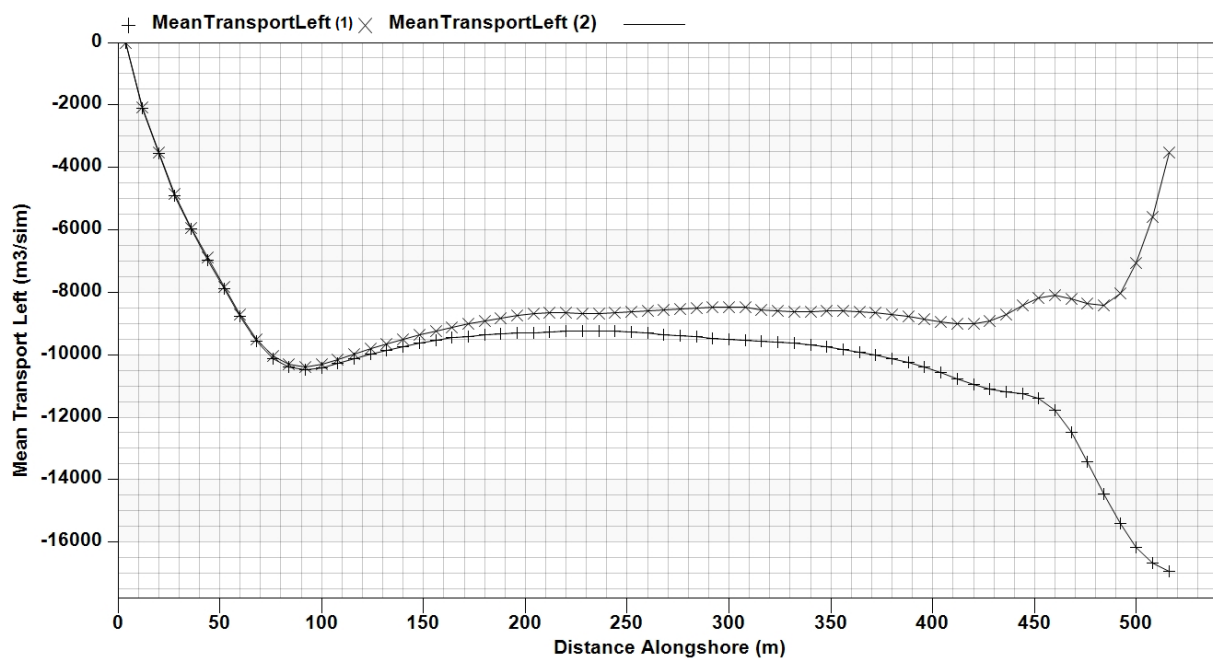
U nastavku su dane usporedbe rezultata prosječnog neto transporta sedimenta, te transporta s lijeve i s desne strane za slučaj različitog zapadnog (desnog) rubnog uvjeta praga s krunom širine 20 (m): *pinned* (1) i *gated* (2) s nepropusnim perom duljine 130 (m).



Slika 10.20 Prosječni neto transport sedimenta za pinned (1) i gated (2) rubne uvjete



Slika 10.21 Transport sedimenta u desno za pinned (1) i gated (2) rubne uvjete



Slika 10.22 Transport sedimenta u lijevo za pinned (1) i gated (2) rubne uvjete

11. ZAKLJUČAK

Provedene analize valnog polja za odabrano razdoblje ukazuju na dominaciju učestalosti valova trećeg i četvrtog kvadranta. S obzirom na apsolutni položaj plaže, uočeno je dominantno gibanje materijala u smjeru sjeverozapadnog ruba plaže. Valno polje, neovisno o smjeru, pokazuje značajno smanjenje valnih visina pri prijelazu vala preko prirodnog praga na dubini od 4-5 metara koji se proteže iz smjera sjeverozapada prema jugoistoku. Bez obzira na smanjene valne visine, još uvijek se prenosi značajna količinu energije i uzrokuje manjak materijala u istočnom rubu plaže gdje je lice plaže široko svega nekoliko metara. Cijelom dužinom plaže izgrađen je obalni zid visine cca 2-3 metra koji ima zaštitnu funkciju. Za obradu je odabrano razdoblje jeseni i prijelaza na zimu (18.9.2010. – 13.1.2011.).

Raspoloživi podaci o vjetru su tri srednje desetominutne vrijednosti u danu, što ukupno čini 352 podatka. Važno je napomenuti da se raspoloživi podaci ne mogu uzeti kao apsolutno mjerodavni. Razlog tome leži u dvama činjenicama:

1. Podaci su lokalno prikazani, u 7 sati, u 14 sati i u 22 sata čime se na uvid autoru ne daje informacija o kontinuiranoj dinamici vjetra na predmetnom području
2. Zbog duljina privjetrišta koje su poprilično velike valovi su većem dijelu promatranog razdoblja ograničeni trajanjem vjetra. Točno trajanje vjetra pojedinog smjera iz raspoloživih podataka nije moguće pouzdano definirati.

Izvršene analize gibanja nanosa ukazuju na dominantan utjecaj valnog događaja na datum 10.11.2010. iz smjera jug. Za trajanje puhanja procijenjeni su parametri vala $H_s = 5,46$ (m) i $T = 9,03$ (s). Kalibracijom modela dolazi se do količina prihranjivanja koje odstupaju od procijenjenih vrijednosti prihranjivanja plaže.

Kao varijantna rješenja stabilizacije plaže predložena su :

1. Izgradnja podmorskog praga varijabilne duljine u smjeru zrake vala
2. Izgradnja triju pera na ekvidistantnim razmakom uzduž plaže.

Podmorski prag, s obzirom na potrebne dimenzije, s tehničkog gledišta predstavlja robusno i neefektivno rješenje za valne događaje povratnih perioda većih od 30 godina. S ekonomskog gledišta, radi se o objektu velikih dimenzija, ukupnog volumena većeg od 60000 (m³) kamenog materijala, $G_{50} = 44,145$ (kN).

Rješenje s perima od nasutog kamena predstavlja rješenje koje u slučaju pojave valova ekstremnih visina značajno utječe na dinamička svojstva lica plaže i smanjuje longitudinalno gibanje materijala plaže. Važno je napomenuti kako je za izgradnju triju pera predviđenih provedenom analizom potrebno osigurati do 5000 (m³) kamenog materijala. S tehničkog i ekonomskog aspekta, a su skladu sa svojstvima valnog polja u obuhvatu, stabilizacija plaže perima prioritetna je varijanta rješenja problema stabilizacije plaže u zoni obuhvata.

12. LITERATURA

- [1] Kamphuis, J.W. Introduction to coastal engineering and management. Advanced series on ocean engineering - Volume 16. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.
- [2] Silvester, R., J.R.C. Hsu. Coastal stabilization. Advanced series on ocean engineering - Volume 14. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997.
- [3] Nielsen, P. Coastal and estuarine processes. Advanced series on ocean engineering - Volume 29. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- [4] Frey, A., K. Connell, H. Hanson, M. Larson, R. Thomas, S. Munger, A. Zundel. GenCade version 1 model theory and user's guide. ERDC/CHL TR-12-25. Vicksburg, MS: U.S Army Engineer Research and Development Center, 2012.
- [5] Frey, A., D.B. King, S. Mungeret. Recommendations and requirements for GenCade simulations. ERDC/CHL TR-14-6. Vicksburg, MS: U.S Army Engineer Research and Development Center, 2014.
- [6] Dean, Robert G., Robert A. Dalrymple. Coastal Processes: With engineering applications. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press, 2002.
- [7] Projekat revitalizacije plaže u Petrovcu, PIM-INCEST d.o.o., Tivat, 2001.
- [8] Petković S., Monitoring plaža u Crnoj Gori, Kotor, 2006.
- [9] Izrada baznih studija i idejnih rješenja za revitalizacije plaža Mogren, Pržno, Petrovac i Sutomore: Izveštaj izvedenih radova Harpha Sea (Verzija 1.0). HARPHA SEA d.o.o., Koper, 2017.