

POJEDNOSTAVNJENI RAČUNALNI MODEL MORSKIH ORGULJA U ZADRU

A SIMPLIFIED COMPUTATIONAL MODEL OF THE SEA ORGAN IN ZADAR

Gabrijel Peroli*, Nino Krvavica**

Sažetak

U ovom su radu analizirane građevinske karakteristike te hidraulički i akustički aspekti Morskih orgulja u Zadru. U tu svrhu razvijen je pojednostavnjeni računalni model koji se sastoji od dvodimenzijskog modela gibanja morske površine te algoritma za transformaciju vremenske serije oscilacija morske površine u zvučni MIDI zapis s tonovima odgovarajuće frekvencije, trajanja i jakosti. Usto je analizirana i vjetrovalna klima zadarskog akvatorija te su definirani relevantni valni parametri. Kako bi se procijenile mogućnosti računalnog modela Morskih orgulja, prikazana su dva primjera za različite smjerove i visine valova.

Ključne riječi: morske orgulje, Zadar, spektar morskih valova, računalni model, MIDI zvuk

Abstract

This paper analyses the construction characteristics as well as the hydraulic and acoustical aspects of the Sea Organ in Zadar. A simplified computational model was developed for this purpose, by combining a two-dimensional model for generating surface waves and an algorithm for transforming the time series of sea-surface oscillations into a MIDI sound of a corresponding frequency, duration and intensity. Furthermore, the wind-wave climate in the Zadar channel was analysed to define the relevant wave parameters. Two examples for different wave directions and heights are presented to assess the performance of the proposed computational model.

Key words: sea organ, Zadar, sea wave spectrum, computational model, MIDI sound

* Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, R. Matejčić 3, Rijeka

E-mail: gabrijel.peroli@student.uniri.hr

** Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, R. Matejčić 3, Rijeka

E-mail: nino.krvavica@gradri.uniri.hr

1. Uvod

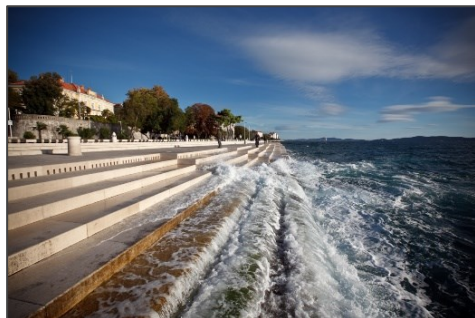
Na sjeverozapadnom dijelu obale Zadarskog poluotoka, ranije zapuštena, ali potencijalno atraktivnu zonu, danas je zamijenio novi javni prostor koji se smatra jednim od uspješnijih primjera modernoga urbanog planiranja. Na mjestu gdje se dodiruju more, kopno i sunce izgrađene su Morske orgulje, multidisciplinarno djelo akademika Nikole Bašića. Ova arhitektonsko-akustična instalacija dovršena je i otvorena za javnost početkom 2005. godine, a do danas je dobila velik broj respektabilnih arhitektonskih nagrada, ali i priznanja ostalih struka [1].

Iako su u procesu planiranja, projektiranja i izvedbe Morskih orgulja, konzultirani vrhunski hrvatski stručnjaci iz područja hidraulike i akustike, ovaj je pothvat uglavnom proveden eksperimentalno, bez detaljnih modelskih analiza i proračuna (Bašić, osobna korespondencija). Iz navedenih postavki proizašao je i glavni cilj ovog rada, a to je istražiti hidrauličke i akustičke aspekte Morskih orgulja. U tu svrhu razvijen je pojednostavnjen računalni model gibanja morske površine i generiranja zvuka.

2. Opće značajke Morskih orgulja u Zadru

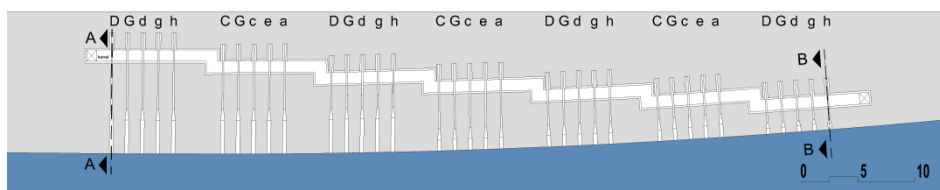
2.1. Urbanističko-arhitektonski aspekti

U ljetnim mjesecima, kada Zadar živi punim plućima, novi javni prostor na sjeverozapadu poluotoka u znatnoj je mjeri preusmjerio posjetitelje izvan povijesne jezgre (Slika 1). Izgradnjom Morskih orgulja i Pozdrava suncu stvorena je jedna nova i šira priča, u kojoj se manifestira povezanost tradicionalnog i suvremenoga [1]. Cijeli je pothvat u velikoj mjeri prihvaćen s pozitivnim komentarima, što svakako predstavlja poticaj daljnjem razvoju i možda nekim novima, sličnim idejama na ovom prostoru.

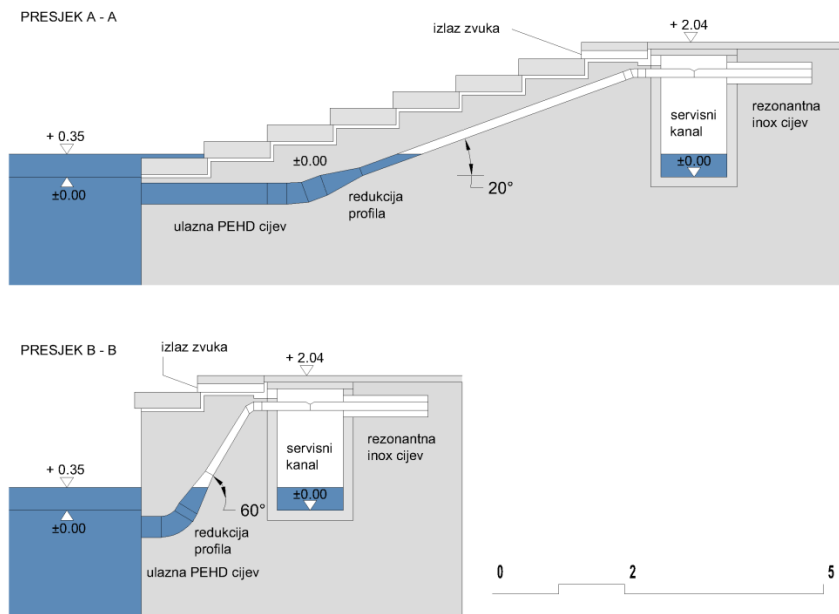


Slika 1. Fotografije Morskih orgulja u Zadru tijekom dvije različite vjetrovalne situacije [1]

Morske orgulje izvedene su rekonstrukcijom obalnog zida zadarske rive i njegovim preoblikovanjem u stepenasti oblik koji se simetrično spušta i spaja s morem (Slika 1). Cijeli je kompleks ukupne duljine 75 metara i podijeljen je u 7 jasno definiranih segmenata [1]. U svakom segmentu postavljeno je po 5 polietilenskih (PE) cijevi, koje u glazbenom smislu predstavljaju precizno ugođena svirala (Slika 2). Razmak između cijevi unutar svakog segmenta iznosi 1,5 m, dok je razmak između cijevi dvaju susjednih segmenata približno 4,5 m [1]. Na taj je način postignuto da posjetitelji, neovisno o svom položaju, mogu maksimalno čuti zvuk iz dva susjedna segmenta. Kota je vrha obalnog zida +2,04 m n. m., dok srednja razina mora iznosi +0,35 m n. m. [1]. S morske su strane ulazi u cijevi postavljeni ispod srednje razine mora kako bi, imajući u vidu svakodnevne oscilacije plime i oseke, cijevi uvijek bile uronjene (Slika 3).



Slika 2. Tlocrtna dispozicija Morskih orgulja, prema [1]

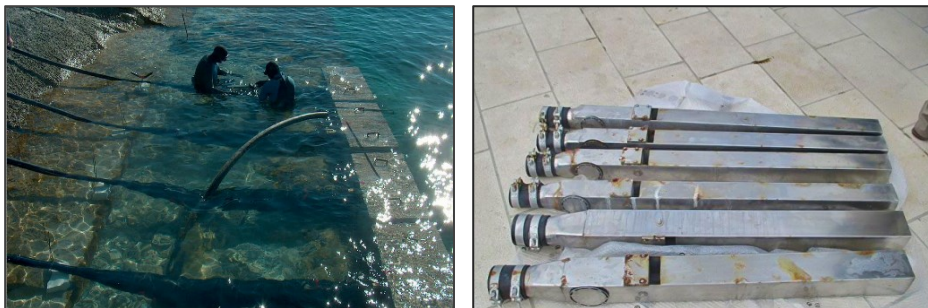


Slika 3. Dva karakteristična poprečna presjeka Morskih orgulja, prema [1]

2.2. Hidraulički aspekti

Cijevni sustav morskih orgulja sastoji se od ukupno 35 cijevi različitih promjera i duljina. Svaka pojedinačna cijev izvedena je u tri segmenta (Slike 3 i 4):

- Ulazni dio izveden je od PE cijevi većeg promjera, postavljene vodoravno ispod razine mora.
- Središnji dio izveden je također od PE cijevi, ali manjeg promjera, koja se uzdiže ukoso prema obali.
- Završni dio izveden je od pravokutne inox cijevi s labiumom, koja je položena vodoravno, a izvedena je tako da proizvede zvuk određene frekvencije.



Slika 4. Dijelovi cijevnog sustava Morskih orgulja: lijevo, PE potopljene cijevi [1] i desno, inox akustične cijevi [2]

Morske orgulje koriste energiju mora kako bi proizvele zvuk. Princip je njihova rada ovaj: vjetar, plovila te plima i oseka generiraju valove koji uzrokuju vertikalno gibanje morske površine ispred obalnog zida; gibanje mora pokreće masu vode unutar cijevi, koja dalje potiskuje zrak kroz otvor u akustičnoj cijevi (labiumu). U posebno projektiranom prostoru ispod kamenih obloga stvara se zvuk koji do posjetitelja dopire kroz otvore u kamenu. Na taj je način prirodi u potpunosti prepušteno da silinom valova nošenih vjetrom i morskim strujama zadarskog akvatorija određuje dinamiku i jakost zvuka.

2.3. Akustički aspekti

U akustičnom smislu cijevi koje se nalaze unutar spomenutih sedam segmenata stvaraju tonove dvaju harmonično srodnih durskih akorda: G-dura i C-dura s dodanom sekstom (Slika 2). Svi tonovi pripadaju velikoj ili maloj skali, odnosno odgovaraju frekvencijama u rasponu od 60 do 250 Hz

(note C2 do H3) [3]. Kao i cijeli prostor tako i melodija prati tradiciju podneblja, odnosno tonovi se podudaraju s muškim dalmatinskim klapskim pjevanjem, koje zvuči vrlo umirujuće čak i u ekstremnim okolnostima nailaska fronte valova paralelno sa zidom [3].

Kako je već navedeno, zvuk orgulja dopire kroz otvore na šetnici (Slika 5). Većina tih zvukova ne čuje se samo na uskome priobalnom području već i u obližnjim parkovima i javnim prostorima. U obzir se moraju uzeti i ekstremniji vremenski uvjeti, pri kojima jak vjetar i veći valovi često uzrokuju snažniji zvuk, koji se širi i dalje od uskoga obalnog pojasa i koji može ometati svakodnevnost građana. Pri projektiranju ove građevine procijenjeno je da će zvuk dopirati do kuća udaljenih 55 metara od Morskih orgulja te da jakost zvuka neće nadmašiti 35 dBA u 90% vremena [3]. Kroz određeno razdoblje planira se pratiti utjecaj zvuka na okolinu. U slučaju mogućih smetnji predviđena su tri rješenja: smanjenje hidrauličkog tlaka na ulazu u cijevi, prigušenje za određeni postotak na otvorima ili prigušenje u unutrašnjosti sustava [3].



Slika 5. Gornji i bočni otvori za zvuk Morskih orgulja [1]

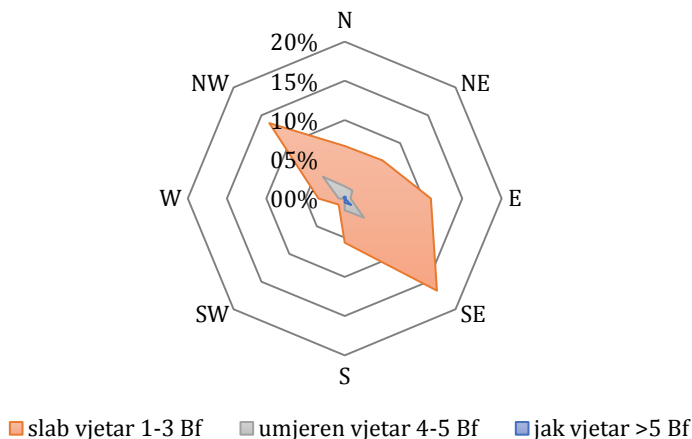
2.4. Vjetrovalna klima zadarskog akvatorija

Vjetar je jedna od važnijih komponenti koja utječe na funkcionalnost Morskih orgulja. Iz tog razloga analizirana je vjetrovalna klima prema meteorološkim podacima s postaje Zadar u razdoblju 1961. – 1990. [4] i novijem kraćem periodu 1991. – 2005. [5] tako da je fokus stavljen na ljetni period kada se Morske orgulje najčešće i posjećuju.

Prosječna godišnja ruža vjetrova (1961. – 1990.) ukazuje da dominantan vjetar puše iz jugoistočnog smjera (jugo) s učestalosti od 21,3%. Sljedeći dominantan smjer vjetra je NE s ukupnom učestalosti od 17,7% te E smjer s učestalosti od 11,8%. Tijekom godine prevladavaju slabi vjetrovi (64%) i tišina (20%), a jak se vjetar rijetko pojavljuje (Slika 6). Vrlo je slična situacija u jesenskom i zimskom razdoblju, kada također dominira SE smjer, a izuzetak je samo veća učestalost vjetrova iz NE smjera (bura) te manji broj dana s tišinom [4].

Ljeti je situacija bitno drukčija. Dominantan vjetar, prema ljetnoj ruži vjetrova (1991.-2005.), dolazi iz sjeverozapadnog smjera (NW) s učestalosti od 16,2% [5]. Iz tog smjera puše maestral, najčešće slab osvježavajući vjetar koji puše s mora na kopno u popodnevnim satima. Sljedeći dominantan smjer sličan je prvome po svojim karakteristikama i dolazi iz susjednoga WNW smjera, i to s učestalosti od 11,1%. Vjetrovi navedenih dvaju smjerova, NW i WNW, zajedno imaju učestalost od 40,0%, pa će se u daljnjoj analizi razmatrati zajedno kao vjetrovi iz IV. kvadranta. Ne treba zanemariti ni vjetrove koji pušu iz smjerova E-SSE s ukupnom učestalosti od 30,0%, koji će se također razmatrati u predmetnim analizama, i to kao vjetrovi iz II. kvadranta. Na ovom području ljeti najčešće pušu slabi vjetrovi, dok maestral često doseže umjerenu jakost. Jaki su vjetrovi rijetki, a pušu najčešće iz smjerova od E do SSE.

Zadar: godišnja ruža vjetrova (1961.-1990.)



Slika 6. Godišnja ruža vjetrova za Zadar za razdoblje 1961. – 1990, prema [4]

Kako bi se provela kratkoročna prognoza valova za dominantne smjerove vjetrova, proračunata je efektivna duljina privjetrišta za vjetrove iz II. i IV. kvadranta te odgovarajući valni parametri. Kao što je već navedeno, u ljetnom periodu na ovom području pušu vrlo slabi vjetrovi, no za stvaranje valova na morskoj površini relevantni su umjereni vjetrovi ($v = 5,5 - 7,9$ m/s) i umjereni jaki vjetrovi ($v = 8,0 - 10,7$ m/s). Na osnovi izračunatih podataka o duljini privjetrišta i brzini vjetra te uz pomoć Gröen-Dorresteinova dijagrama, procijenjene su značajne visine valova H_s i periodi valova T_s (Tablica 1). Privjetrište za NW smjer duže je od privjetrišta za SE smjer ($F = 12,8$ km u odnosu prema 7,1 km), zbog čega su i značajne visine valova nešto niže za SE u odnosu prema NW smjeru. Za umjerene vjetrove očekuju se značajne valne visine 0,4 – 0,65 m iz NW smjera, odnosno 0,35 – 0,55 m iz SE smjera. Za umjereni jaki vjetrove, s druge strane, očekuju se značajne valne visine 0,65 – 0,9 m iz NW smjera, odnosno 0,55 – 0,75 m iz SE smjera. Pritom odgovarajući značajni valni periodi variraju između 1,8 i 2,9 s.

Tablica 1. Kratkoročna prognoza valnih parametara za slabe i umjerene vjetrove iz II. i IV. kvadranta

Kvadrant i glavni smjer vjetra		Privjetrište F (km)	Umjeren vjetar $v = 5,5 - 7,9$ m/s		Umjereni jaki vjetar $v = 8,0 - 10,7$ m/s	
			H_s (m)	T_s (s)	H_s (m)	T_s (s)
II.	SE	7,1	0,35 – 0,55	1,8 – 2,2	0,55 – 0,75	2,2 – 2,5
IV.	NW	12,8	0,4 – 0,65	2,3 – 2,7	0,65 – 0,9	2,7 – 2,9

3. Računalni model

Analiza građevinskih, hidrauličkih i akustičnih elemenata Morskih orgulja provedena je s ciljem da dobivena saznanja posluže kao ulazni parametri za izradu modela koji bi simulirao rad orgulja. Metodologija izrade ovoga integriranog modela sastoji se od dva ključna dijela: (i) izrade modela gibanja morske površine te (ii) izrade modela generiranja zvuka ovisno o dinamici morske površine. Model je u potpunosti izrađen u MATLAB programskom okruženju [6].

3.1. Model gibanja morske površine

Kako bi se što realnije opisala stohastička narav gibanja morske površine, koristio se spektralni pristup generiranju vjetrovnih valova. Naime, navedeni pristup temelji se na ideji kako se gibanje površine mora $\eta(x, y, t)$ na bilo kojoj točki u horizontalnoj ravnini x - y i u vremenu t može opisati kao superpozicija diskretnih spektralnih komponenti [7], pri čemu je svaka komponenta spektra zapravo jedan harmonijski (linearni) val koji se može opisati općom jednadžbom [7]:

$$\eta(x, y, t) = A \cos(\omega t - k(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) + \alpha), \quad (1)$$

gdje je A amplituda vala, k je valni broj, α kut faznog pomaka vala te θ kut napredovanja vala u globalnome koordinatnom sustavu. Funkcija spektralne gustoće (u nastavku valni spektar) $S(\omega)$ definiran je za različite kružne frekvencije $\omega = 2\pi f$. U praksi postoji nekoliko valnih spektara koji se često koriste za morske valove, npr. Pierson-Moskowitz ili JONSWAP [7]. U ovom slučaju, odabran je Tabainov valni spektar, koji je definiran ovim izrazom [8]:

$$S(\omega) = 0,862 \frac{0,0135g^2}{\omega^5} e^{\frac{5,186}{H_s^2 \omega^4}} \gamma^{p(\omega)}, \quad (2)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, H_s značajna visina vala, a γ parametar širine spektra (preporuka je za Jadransko more $\gamma=1,63$). Tabainov spektar odabran je jer se smatra najpreciznijim u opisivanju morskih valova u Jadranskome moru. Funkcija koja se nalazi u eksponentu parametra γ definirana je ovim izrazom [8]:

$$p(\omega) = e^{\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma(\omega)^2 \omega_p^2}}, \quad (3)$$

gdje je $\sigma(\omega)$ parametar oblika spektra koji ovisi o vršnoj kružnoj frekvenciji ω_p , a koji su definirani ovim izrazima [8]:

$$\sigma(\omega) = \begin{cases} 0,08 & \text{za } \omega \leq \omega_p \\ 0,10 & \text{za } \omega > \omega_p \end{cases} \quad \text{i} \quad \omega_p = 0,32 + \frac{1,8}{H_s + 0,6}. \quad (4)$$

Na taj je način valni spektar $S(\omega)$ definiran samo jednim parametrom – značajnom visinom vala H_s .

Jednom kada je poznat $S(\omega)$, može se odrediti i sintetički generiran valni profil $\eta(x, y, t)$. Amplitude pojedinih faznih komponenti mogu se odrediti direktno iz zadanog spektra s pomoću jednadžbe $A(\omega) = \sqrt{2S(\omega)\Delta\omega}$ [7]. U praktičnoj se primjeni valni spektar diskretizira konačnim brojem inkremenata N definiranih korakom $\Delta\omega = \omega_{max}/N$, tako da se ω_{max} odredi iz uvjeta $S(\omega_{max}) \approx 0$. Na taj način superpozicijom linearnih valova definiranih izrazom (1) generirani valni profil može se opisati sumom pojedinih spektralnih komponenti, tj. linearnih valova [7]:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N A(\omega) \cos[\omega_i t - k_i(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) + \alpha_i], \quad (5)$$

gdje indeks i označava pojedinu spektralnu komponentu. Stohastička narav faznog pomaka određena je parametrom α_i , koji se za svaku komponentu definira slučajnim odabirom iz domene s granicama 0 i 2π [9]. Valni broj k_i pojedine komponente može se odrediti iz izraza $\omega_i^2 = gk_i \tanh(k_i h)$, gdje je h dubina mora [7]. Pošto je prethodno navedeni izraz nelinearan i zahtijeva primjenu iterativnih metoda (npr. bisekcija ili Newton-Raphson), u praksi je jednostavnije koristiti eksplicitnu jednadžbu [10]:

$$k_i = \frac{\omega_i^2}{g} \left[1 - e^{-(\omega_i \sqrt{h/g})^{5/2}} \right]^{-2/5}. \quad (6)$$

Kako bi se dodatno uključila i varijabilnost kuta napredovanja valova, spektar $S(\omega)$ korigira se množenjem funkcijom raspodjele kuta napredovanja $D(\theta)$, koja je definirana ovim izrazom [11]:

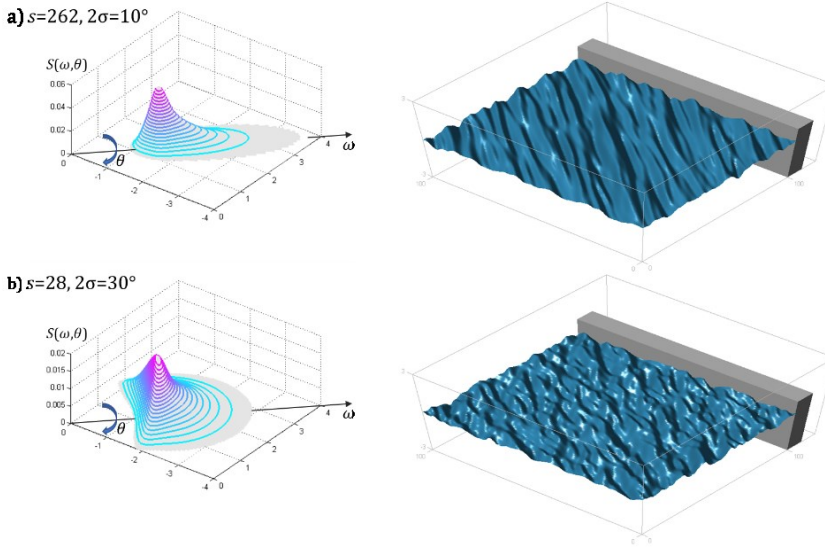
$$D(\theta) = C \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right), \quad (7)$$

gdje je $C = \Gamma(s + 1) / [\Gamma(s + 1/2) 2\sqrt{\pi}]$, $\Gamma(s)$ je Gama funkcija, s je parametar koji definira širinu raspodjele, a $\theta - \theta_0$ je relativni kut odmaka od dominantnog kuta napredovanja valova θ_0 . Uzimanjem u obzir varijabilnosti kuta napredovanja, amplituda pojedinoga harmonijskog vala određuje se prema izrazu $A(\omega, \theta) = \sqrt{2S(\omega)D(\theta)\Delta\omega\Delta\theta}$, a (5) u konačnom obliku glasi [7]:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A(\omega_i, \theta_j) \cos \left[\omega_i t - k_i \left(x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j) \right) + \alpha_{i,j} \right]. \quad (8)$$

Navedeni pristup može se i dalje proširiti kako bi se odredile relevantne kinematičke veličine na proizvoljnoj dubini [12], no u tom je slučaju dovoljno definirati vertikalne pomake. Na Slici 7 prikazan je 2D spektar valova, koji uključuje i varijabilnost kuta napredovanja valova, te generirana

površina mora za $H_s = 0,5$ m i dva različita s broja, koji odgovaraju rasponu kutova $\pm 10^\circ$ i $\pm 30^\circ$ oko glavnog smjera napredovanja $\theta_0 = 45^\circ$.



Slika 7. Dvodimenzijski spektar valova i sintetički generirana površina mora za $H_s = 0,5$ m i dva različita s faktora, koji odgovaraju rasponu kutova $\pm 10^\circ$ i $\pm 30^\circ$ oko glavnog smjera napredovanja $\theta_0 = 45^\circ$

3.2. Konceptualni model generiranja zvuka

Model generiranja zvuka temelji se na tri osnovne pretpostavke:

- I. Frekvencija tona ovisi jedino o geometriji inox cijevi, ali jakost i trajanje zvuka proporcionalni su brzini zraka na izlazu iz cijevi.
- II. Brzina zraka na izlazu iz cijevi proporcionalna je oscilaciji vode unutar cijevi, a zrak izlazi tijekom izdizanja razine vode i obrnuto.
- III. Amplituda i period oscilacije vode unutar cijevi proporcionalni su amplitudi i periodu oscilacije morske površine neposredno ispred ulaza u cijev (linijski su gubici u cijevnom sustavu zanemarivi, a lokalni gubici ponajprije mogu utjecati na pomak u fazi te na apsolutnu vrijednost amplitude)

U skladu s navedenim pretpostavkama izrađen je pojednostavnjeni model generiranja *Musical Instrument Digital Interface* (MIDI) zvučnog zapisa [13]. MIDI zapis određen je s pet parametra: kanalom, vremenom početka tona, vremenom završetka tona, MIDI brojem (kreće se u rasponu

od 21 do 108 i odgovara pojedinim notama u rasponu od osam oktava, odnosno frekvenciji zvuka) i MIDI brzinom (kreće se u rasponu od 0 do 127 i odgovara jakosti zvuka).

Prvi korak sastoji se od proračuna vrijednosti $\eta_j(t) = \eta(X_j, Y_j, t)$ iz (8), na koordinatama X_j, Y_j , koje odgovaraju tlocrtnoj poziciji ispred svake pojedine cijevi, gdje indeks j označava redni broj cijevi. Kako bi se definirala brzina i smjer pomaka razine vode, potrebno je izračunati diskretnu vremensku derivaciju pomaka:

$$\frac{d\eta_j(t)}{dt} \approx \frac{\eta_j(t+\Delta t) - \eta_j(t)}{\Delta t}, \quad (9)$$

gdje je Δt vremenski korak.

Pod pretpostavkom da se zvuk stvara samo tijekom izlaska zraka, tj. izdizanja vode u cijevi, možemo smatrati da nultočke (9) odgovaraju vremenu početka i završetka tona. Maksimalna vrijednost (9) između dvije nultočke predstavlja relativnu vrijednost jakosti zvuka (MIDI brzina). Pritom, frekvencija tona (MIDI broj) definirana je unaprijed zadanom vrijednosti za svaku pojedinu cijev (Slika 3). Na taj način vremenska serija oscilacija morske površine transformirana je u $K \times 5$ matricu, gdje svaki redak $k = 1..K$ odgovara pojedinom segmentu pozitivnih vrijednosti (9), a svaki stupac odgovara jednom od ranije navedenih pet MIDI parametara. Konačno, MIDI matrica transformirana je u MIDI datoteku s pomoću MATLAB funkcija *matrix2midi* i *writemidi* [14].

4. Rezultati

Kako bi se prikazale mogućnosti predloženog modela te analizirao utjecaj dinamike valova na zvuk morskih orgulja, u nastavku su prikazana dva primjera za različite smjerove i visine valova. U prvom se slučaju razmatrala tipična ljetna situacija, kada iz NW smjera puše maestral umjerene jačine. U drugom slučaju razmatra se umjereno jak vjetar iz SE smjera.

4.1. Primjer 1: Valovi generirani umjerenim maestralom

U ovom primjeru simuliran je rad Morskih orgulja valovima iz NW smjera generiranih vjetrom umjerene jačine. Gibanje morske površine generirano je s obzirom na valove opisane Tabainovim spektrom, uz glavni smjer napredovanja $\theta_0 = 45^\circ$ (pri čemu je 0° normala na obalni zid), raspon kutova $\pm 20^\circ$ i značajnu visinu vala $H_s = 0,5$ m (Tablica 1).

Slika 8a prikazuje segment 40 sekundi generirane vremenske serije oscilacija morske površine neposredno ispred ulaza u najkraću cijev

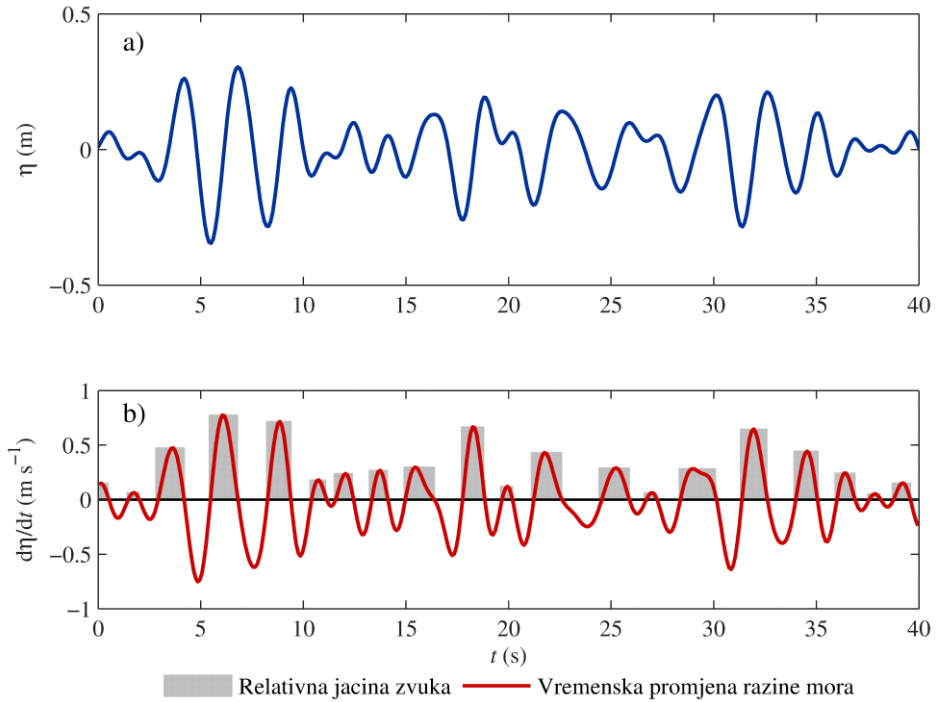
Morskih orgulja (Slika 3b). Statistička analiza (*zero-up*) cijeloga 5-minutnog zapisa ukazuje na značajnu visinu vala $H_s = 0,51$ m i maksimalnu visinu vala $H_{max} = 0,78$ m. Vremenska promjena razine mora, na istim koordinatama i za isti vremenski segment, prikazana je na Slici 8b zajedno s relativnom jakosti i trajanjem zvuka.

Slika 9 prikazuje odgovarajući MIDI zapis svih deset cijevi iz susjedna dva segmenta. Svaki pojedini ton opisan je odgovarajućom notom (velika slova odgovaraju oktavi C2-H2, a mala slova oktavi C3-H3) te trajanjem i jakosti zvuka.

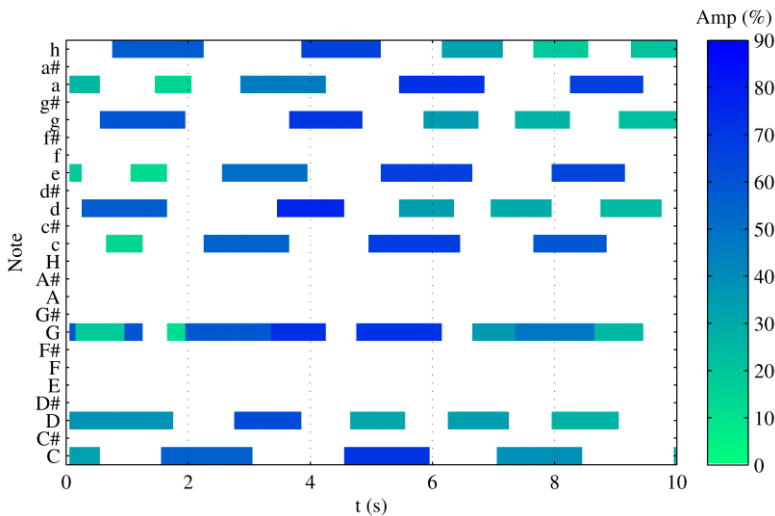
4.2. Primjer 2: Valovi generirani umjereno jakim jugom

Rad Morskih orgulja simuliran je i za slučaj djelovanja valova iz SE smjera generiranih umjereno jakim vjetrom. Gibanje je morske površine također generirano s obzirom na valove opisane Tabainovim spektrom, uz glavni smjer napredovanja $\theta_0 = -60^\circ$, raspon kutova $\pm 20^\circ$ i značajnu visinu vala $H_s = 0,7$ m (Tablica 1).

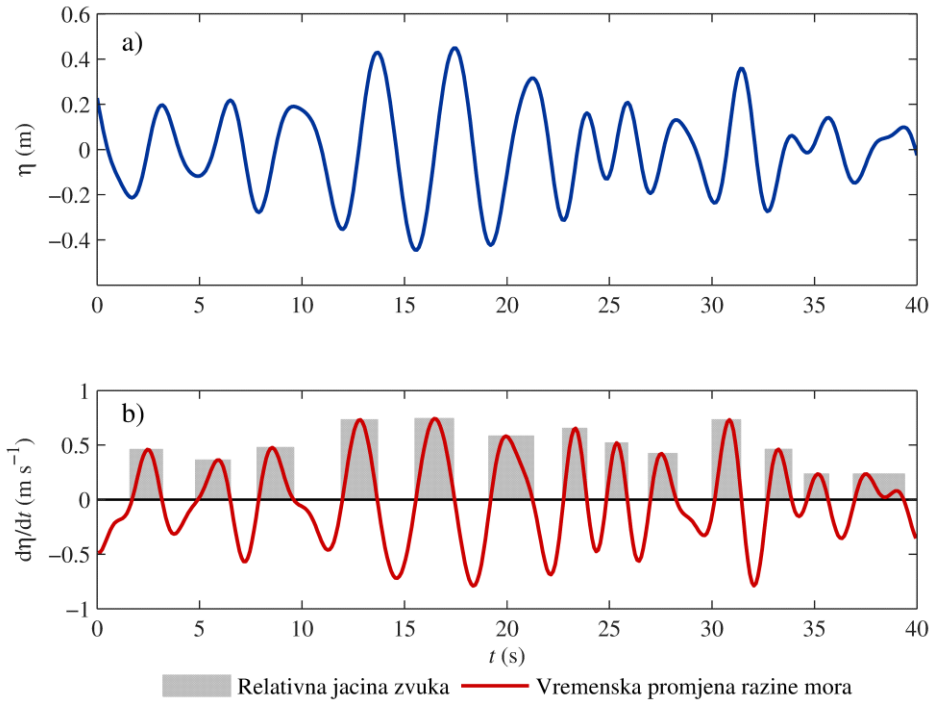
Slika 10a prikazuje segment 40 sekundi generirane vremenske serije oscilacija morske površine neposredno ispred ulaza u najkraću cijev Morskih orgulja (Slika 3b). Statistička analiza (*zero-up*) cijeloga 5-minutnog zapisa ukazuje na značajnu visinu vala $H_s = 0,73$ m i maksimalnu visinu vala $H_{max} = 1,06$ m. Vremenska promjena razine mora na istim koordinatama i za isti vremenski segment, prikazana je na Slici 10b zajedno s relativnom jakosti i trajanjem zvuka. Slika 11 prikazuje odgovarajući MIDI zapis deset cijevi iz susjedna dva segmenta.



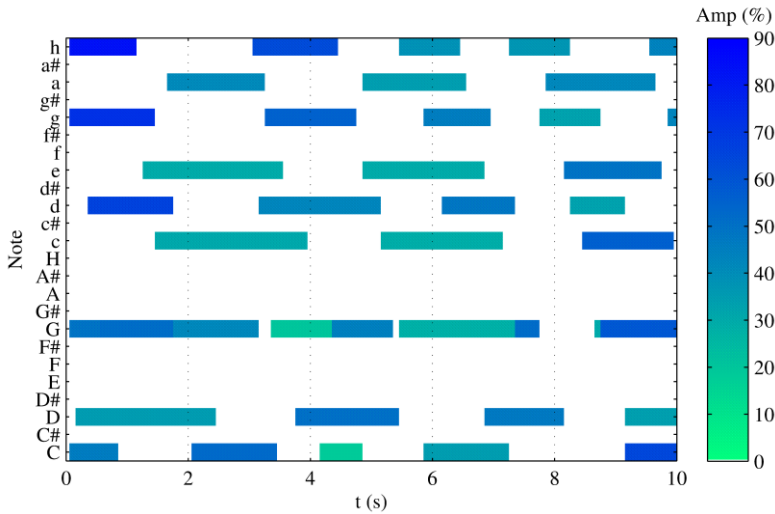
Slika 8. Primjer 1: a) oscilacije razine mora ispred ulaza u cijev, b) vremenska promjena razine mora i odgovarajuća relativna jakost zvuka



Slika 9. Primjer 1: prikaz generiranog MIDI zvučnog zapisa deset cijevi iz susjedna dva segmenta



Slika 10. Primjer 2: a) oscilacije razine mora ispred ulaza u cijev, b) vremenska promjena razine mora i odgovarajuća relativna jakost zvuka



Slika 11. Primjer 2: prikaz generiranog MIDI zvučnog zapisa deset cijevi iz susjedna dva segmenta

5. Diskusija i zaključak

Predloženi model dao je očekivane rezultate; dinamika zvučnog zapisa uspješno prati dinamiku mora. Naime, kraći valovi rezultiraju kraćim trajanjem tona, dok strmiji valovi rezultiraju tonovima veće jakosti i obrnuto. Primjetan je utjecaj i smjera valova, pa tako valovi iz NW smjera rezultiraju melodijom uzlaznih tonskih nizova (Slika 9), dok valovi iz suprotnog SE smjera rezultiraju melodijom silaznih tonskih nizova (Slika 11). Kut nailaska valova također utječe na dinamiku zvučnog zapisa; naime, okomitiji valovi rezultiraju većim preklapanjem tonova različitih frekvencija.

Treba napomenuti da, iako je uzeta u obzir stohastička narav valovanja, a geometrija je temeljna na realnima tehničkim podacima izvedenih Morskih orgulja, u ovom radu prikazan je preliminarni model koji se temelji na mnogim pretpostavkama i pojednostavnjenjima. Unatoč tome, kvalitativna usporedba snimljenih zvučnih zapisa Morskih orgulja [15] s generiranim MIDI zapisom [16] već i sada ukazuje na zadovoljavajuće poklapanje.

Računalni se model uskoro planira unaprijediti, a pojedini se algoritmi planiraju modificirati kako bi vjerodostojnije odražavali fizikalnu narav hidrauličkih i akustičkih procesa. Pritom se ponajprije misli na uključivanje dodatnog među-koraka, tj. jednodimenzijskoga numeričkog modela oscilacije vodnih masa u cijevima. Usto se planira integrirati kompleksniji model gibanja morske površine, koji uključuje i procese deformacije valova: refleksiju, oplićavanje i refrakciju. Također, kako bi se procijenila vjerodostojnost takvog modela, planira se provesti evaluacija zasnovana na usporedbi s fizikalnim modelom.

Zaključno, numerički model tog tipa dovoljno je poopćen da bi se mogao koristiti u idejnim fazama planiranja sličnih „instrumentalnih“ obalnih konstrukcija. Naime, model omogućuje simulaciju zvuka koji generiraju morske orgulje te procjenu utjecaja lokacije, valnih karakteristika ili odabira rasporeda cijevi na konačnu melodiju.

Zahvala. Zahvaljujemo akademiku Nikoli Bašiću i djelatnicima Marinaprojekta d.o.o. na pruženoj podršci i dostavljenim podacima o Morskim orguljama.

Literatura

- [1] Bašić Stelluti, B.; Mattioni, V. 2011. *Morske orgulje i Pozdrav suncu*. Marinaprojekt d.o.o. Zadar.

- [2] *Grad Zadar: Morske orgulje na čišćenju i ugodavanju*. <http://www.grad-zadar.hr/vijest/opce-vijesti-28/morske-orgulje-na-ciscenju-i-ugodavanju-3326.html> (pristupljeno 17. 2. 2017.).
- [3] Stamać, I. 2005. Acoustical and musical solution to wave driven sea organ in Zadar, *2nd Congress of Alps-Adria Acoustics Association and 1st Congress of Acoustical Society of Croatia*. 203-206. Opatija. Hrvatska.
- [4] Kraljev, D.; Gajić-Čapka, M. 1995. *U okrilju sunca i mora – klimatološka monografija Zadra*. Zadiz. Zadar.
- [5] *Vjetrovalna klima za potrebe glavnog projekta TT Zadar*. 2007. Hydroexpert d.o.o. Zagreb.
- [6] *MATLAB 2010b*. The Mathworks, Inc. Natick. Massachusetts. SAD.
- [7] Holthuijsen, L.H. 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- [8] Tabain, T. 1997. Standard Wind Wave Spectrum for the Adriatic Sea Revisited (1977-1997), *Brodogradnja*, br. 45. 303-313.
- [9] Goda, Y. 1988. Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*. JSCE, br. 1. 39-52.
- [10] Guo, J. 2002. Simple and explicit solution of wave dispersion equation. *Coastal Engineering*, br. 2. 71-74.
- [11] Longuet-Higgins, M.S.; Cartwright, D.E.; Smith, N.D. 1963. Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean Wave Spectra*. Prentice-Hall, Inc. Easton. Maryland. 111-132.
- [12] Travaš, V.; Krvavica, N. 2014. Spektralni i monokromatski pristup definiranju hidrodinamičkog opterećenja na vertikalne pilote. *Hrvatske vode*, br. 87. 13-22.
- [13] Rohstein, J. *MIDI: A Comprehensive Introduction*. A-R Editions. Madison. Wisconsin.
- [14] Schutte, K. *MATLAB and MIDI*. <http://kenschutte.com/midi>, (pristupljeno 17. 2. 2017.).
- [15] *Zadar Sea Organ*. <https://www.youtube.com/watch?v=n86pF-wQKrw>, (pristupljeno 10. 4. 2017.).
- [16] *Computational model for the Sea Organ in Zadar, Croatia*. <https://www.youtube.com/watch?v=HzbhLXo9zK0>, (pristupljeno 10. 4. 2017.).