

Primljen / Received: 12.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 6.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 15.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

Integralni računalni model za simulaciju Morskih orgulja

Autori:



Dr.sc. **Nino Krvavica**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
nino.krvavica@gradri.uniri.hr



Doc.dr.sc. **Igor Ružič**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
iruzic@gradri.uniri.hr



Prof.dr.sc. **Nevenka Ožanić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
nozanic@gradri.uniri.hr

Prethodno priopćenje

Nino Krvavica, Igor Ružič, Nevenka Ožanić

Integralni računalni model za simulaciju Morskih orgulja

U radu je prikazan integralni pristup simulaciji hidrauličkih i glazbenih aspekata Morskih orgulja u Zadru. Računalni se model sastoji od algoritma za generiranje realnih morskih valova, numeričkog modela oscilacija vodnih masa u cijevima orgulja te glazbenog modela za generiranje zvuka. Rezultati su pokazali kako se, za jednake valne uvjete, unutarnje oscilacije razine vode razlikuju među segmentima Morskih orgulja, ponajprije zbog različitih geometrija cijevi. Analize su nadalje otkrile kako rezultirajući zvuk, osim o geometriji cijevi, ovisi i o duljini i smjeru propagacije valova.

Ključne riječi:

Morske orgulje, računalni model, valni spektar, oscilacije vodnih masa, direktna integracija, valni oblik zvučnog signala

Preliminary report

Nino Krvavica, Igor Ružič, Nevenka Ožanić

Integrated computational model for Sea Organ simulation

An integrated approach for the simulation of hydraulic and musical aspects of the Sea Organ in Zadar, Croatia, is presented in the paper. The computational model combines a real-life sea wave generation algorithm, a numerical model for water mass oscillation in organ pipes, and a musical sound generation model. The results show that, under the same wave conditions, internal water level oscillations differ between individual Sea Organ segments mainly because of different pipe geometries. Furthermore, analyses revealed that the resulting sound depends not only on pipe geometry, but also on the length and direction of waves.

Key words:

Sea organ, computational model, wave spectrum, water mass oscillations, direct integration, waveform sound

Vorherige Mitteilung

Nino Krvavica, Igor Ružič, Nevenka Ožanić

Integrales Computermodell für die Simulation der Meeresorgel

In der Abhandlung wird der integrale Ansatz für die Simulation der hydraulischen und musikalischen Aspekte der Meeresorgel in Zadar dargestellt. Das Computermodell besteht aus einem Algorithmus für die Generierung realer Meereswellen, einem numerischen Modell der Oszillation der Wassermassen in den Orgelpfeifen sowie einem musikalischen Modell für die Klangerzeugung. Die Ergebnisse zeigten, wie sich die inneren Oszillationen des Wasserniveaus zwischen den Segmenten der Meeresorgel bei gleichen Wellenbedingungen unterscheiden, in erster Linie wegen der unterschiedlichen Geometrien der Pfeifen. Die Analysen haben des Weiteren aufgedeckt, wie der resultierende Klang außer von der Geometrie der Pfeifen auch von der Länge und der Richtung der Wellenausbreitung abhängt.

Schlüsselwörter:

Meeresorgel, Computermodell, Wellenspektrum, Oszillation der Wassermassen, direkte Integration, Wellenform des Audiosignals

1. Uvod

Tijekom posljednjih nekoliko godina sjeverozapadno je obalno područje Zadra doživjelo transformaciju iz zapuštene periferije u moderan, atraktivan i često posjećen javni prostor. Dvije urbane instalacije – Morske orgulje i Pozdrav suncu – prepoznate su širom svijeta zbog svoje arhitektonske, vizualne i akustične inovativnosti. Obje su ove građevine vrlo pozitivno prihvaćene u javnosti i u stručnim krugovima, što je rezultiralo i s nekoliko prestižnih međunarodnih nagrada i priznanja [1].

Projektiranje i izgradnja Morskih orgulja provedena je uglavnom eksperimentalno uslijed nedostatka odgovarajućih numeričkih modela. Upravo je zbog toga nedavno predstavljen pojednostavljeni računalni model za simulaciju zvuka Morskih orgulja, koji se temelji na generiranju realnih valova [2]. Ovaj pojednostavljeni računalni model [2] izrađen je uz pretpostavku direktne linearne veze između oscilacija morske površine i razine vode u cijevima orgulja. Međutim, kao posljedica ove pretpostavke zanemareni su utjecaji inercijalnih i viskozni sila, zbog čega model nema mogućnost procijeniti utjecaj geometrije cijevi na oscilacije vodnih masa. Drugim riječima, simulirane oscilacije vodnih masa rezultat su jedino dinamike valova, dok je utjecaj promjera, duljine i nagiba cijevi zanemaren.

Cilj ovoga istraživanja je razviti i prikazati poboljšani računalni model za simulaciju Morskih orgulja, koji se sastoji od tri međusobno povezane cjeline: algoritma za generiranje realnih valova, jednodimenzijskog numeričkog modela za proračun oscilacija vodnih masa unutar cijevi te modela za generiranje rezultirajućeg zvuka. Ovakav model može poslužiti u simulaciji unutarnjih oscilacija vodnih masa i rezultirajućeg zvuka generiranog sličnim tipom obalnih građevina i na taj način pomoći u procesu odlučivanja i projektiranja. Glavni doprinosi rada su sljedeći:

- razvijen je originalni jednodimenzijski numerički model za proračun oscilacija vodnih masa unutar cijevi orgulja pod utjecajem morskih valova,
- predstavljen je integralni model, koji na jedinstven način povezuje hidrodinamički model s računalnim modelom zvuka te
- pomoću predloženog modela istraženi su hidraulički i glazbeni aspekti Morskih orgulja u Zadru kako bi se prepoznali i definirali glavni utjecajni faktori različitih dijelova sustava i valnih parametara na unutarnje oscilacije i rezultirajući zvuk.

Rad je koncipiran na sljedeći način: prvo su opisane i ilustrirane hidrauličke i glazbene karakteristike Morskih orgulja u Zadru; nakon toga je predstavljen integralni model koji se sastoji od računalnog modela za generiranje realnih morskih valova temeljenog na spektralnom opisu valova, numeričkog modela za proračun oscilacija vodnih masa te konceptualnog modela za generiranje zvuka temeljenog na valnom obliku zvučnog zapisa; dvije grupe rezultata su prikazane i prodiskutirane; i konačno su predstavljeni glavni zaključci i budući planovi.

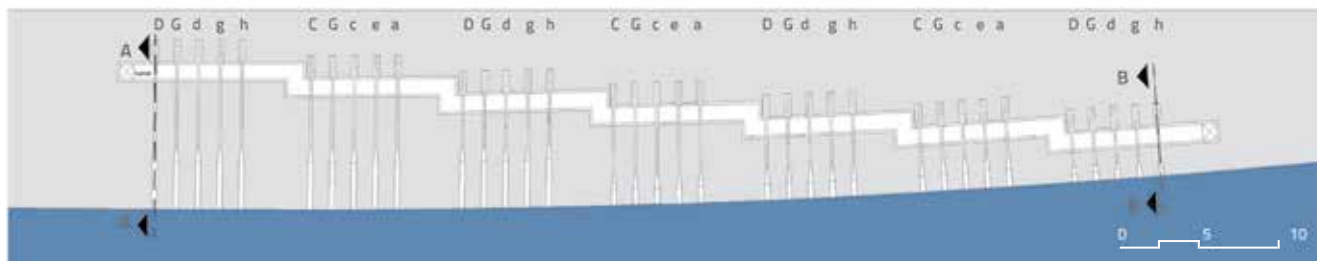
1.1. Hidrauličke i glazbene karakteristike Morskih orgulja

Morske orgulje izgrađene su 2005. godine rekonstrukcijom postojećeg obalnog zida na Zadarskoj obalnoj šetnici te izgradnjom cijevnog sustava ispod kamenih stepenica koje se postupno spuštaju prema moru [1]. Ovaj 75 m dugačak instrument sastoji se od sedam segmenata, gdje je svaki segment definiran različitim brojem stepenica i visinama obale. Ispod kamenih stepenica postavljeno je ukupno 35 cijevi različitih duljina i promjera [1]. Horizontalna udaljenost između osi cijevi iznosi ~1,5 m, a udaljenost između dva susjedna segmenta iznosi ~4,5 m (slika 1.). Hidraulički sustav sastoji se od tri dijela (slika 2.):

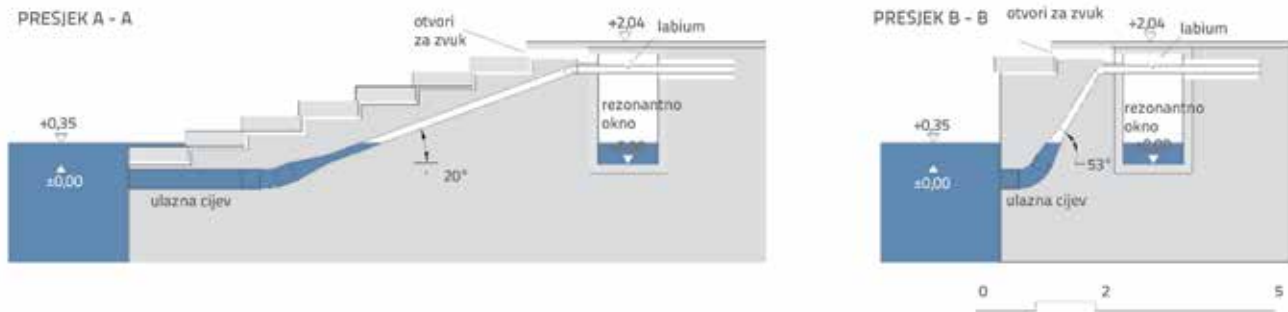
- horizontalne ulazne cijevi potopljene ispod razine mora
- akustične cijevi s labiumom postavljene unutar rezonantnog okna, koje je izgrađeno ispod šetnice
- cijevi reduciranog promjera postavljene pod nagibom, koja spaja donju ulaznu i gornju akustičnu cijev.

Ulazne i reducirane cijevi izrađene su od polietilena (PE), a akustična je cijev izrađena od nehrđajućeg čelika [1].

Način na koji Morske orgulje generiraju zvuk može se ukratko opisati na sljedeći način: vjetar, plovila te plima i oseka generiraju valove koji uzrokuju vertikalno gibanje morske površine ispred obalnog zida; vertikalno gibanje mora pokreće masu vode unutar cijevi, koja dalje potiskuje zrak kroz otvor u akustičnoj cijevi (labiumu), gdje se konačno proizvodi zvuk unaprijed definirane frekvencije. Zvuk iz orgulja izlazi kroz posebno izrađene otvore kako bi ga posjetitelji mogli čuti. U glazbenom smislu, svaki je segment ugođen tako da proizvodi tonove G-dura (D-G-d-g-h) ili C-dura s dodatnom sekstom (C-D-c-e-a), kako je prikazano na slici 1. Svi tonovi, dakle, odgovaraju frekvencijama u rasponu od 60 do 250 Hz [3].



Slika 1. Tlocrt cijevnog sustava Morskih orgulja u Zadru [1]



Slika 2. Dva karakteristična poprečna presjeka Morskih orgulja u Zadru [1]

Odabir ovih međusobno harmoničnih akorda inspiriran je muškim vokalnim rasponom dalmatinskih klapa [3].

2. Metodologija

Kao što je navedeno, predloženi integralni model sastoji se od tri dijela:

- računalnog modela temeljenog na spektralnom opisu morskih valova
- numeričkog modela oscilacija vodnih masa u cijevima
- modela generiranja zvuka.

Računalni model za sva tri dijela napisan je u MATLAB programskom paketu [4], bez korištenja ikakvih vanjskih paketa osim *matrix2midi* [5] i *writemidi* [5] za zapis konačnog zvuka u MIDI datoteku.

2.1. Računalni model spektralnog opisa morskih valova

Računalni model za simulaciju gibanja morske površine temelji se na spektralnom opisu vjetrovnih valova. Model se temelji na metodologiji predloženoj u [6] za razvoj faznoamplitudnog modela valova s dvodimenzijским valnim spektrom. Za početak, potrebno je definirati harmonijski val koji se kreće u x - y horizontalnoj ravnini:

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

gdje je θ kut između glavnog smjera propagacije valova i negativne x -osi, η je visina izdizanja morske površine u trenutku t , a je amplituda vala, ω je kružna frekvencija, $k = 2\pi/L$ je valni broj, L je duljina vala i α je kut faznog pomaka vala.

Kako bi se što realnije opisala stohastička narav realnih valova, izdizanje morske površine na zadanim x - y koordinatama može se definirati kao suma konačnog broja harmonijskih valova, definiranih različitim amplitudama i faznim pomacima [6]:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \eta_{i,j}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos[\omega_i t - k_i(x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j)) + \alpha_{i,j}] \quad (2)$$

gdje je N ukupni broj diskretnih frekvencija (indeks i), a M je ukupni broj diskretnih smjerova propagacije valova (indeks j).

Pritom, svaki pojedinačni harmonijski val u izrazu (2) definiran je zasebnom amplitudom vala $a_{i,j}$, koja je izračunana iz zadanog valnog spektra, te proizvoljnim faznim pomakom vala $\alpha_{i,j}$, koji je dobiven nasumičnim odabirom iz jednolike raspodjele [4]. Treba napomenuti kako je valni broj k_i u direktnoj vezi s frekvencijom vala ω_j , zbog čega se također može označiti indeksom i .

Amplituda za svaki pojedinačni harmonijski val izračunana je pomoću diskretnog valnog spektra $a(\omega_i) = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$, gdje je spektar $S(\omega)$ diskretiziran konačnim brojem N frekvencijskih inkremenata $\Delta\omega = \omega_{\max}/N$. Postoji nekoliko valnih spektara koji su dobiveni iz terenskih opažanja, kao što su JONSWAP [7] ili Pierson-Moskowitz [8]. U ovome je radu korišten Tabainov valni spektar [9], koji je izveden iz opažanja u Jadranskom moru:

$$S(\omega) = 0,862 \frac{0,0135g^2}{\omega^5} e^{\frac{5,186}{H_s^2 \omega^4}} \gamma^{\rho(\omega)} \quad (3)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, H_s je značajna visina vala, a γ je parametar karakteristične širine valnog spektra. Za Jadransko more preporučuje se koristiti vrijednost $\gamma = 1,63$, a funkcija $\rho(\omega)$ je definirana sljedećim izrazom [9]:

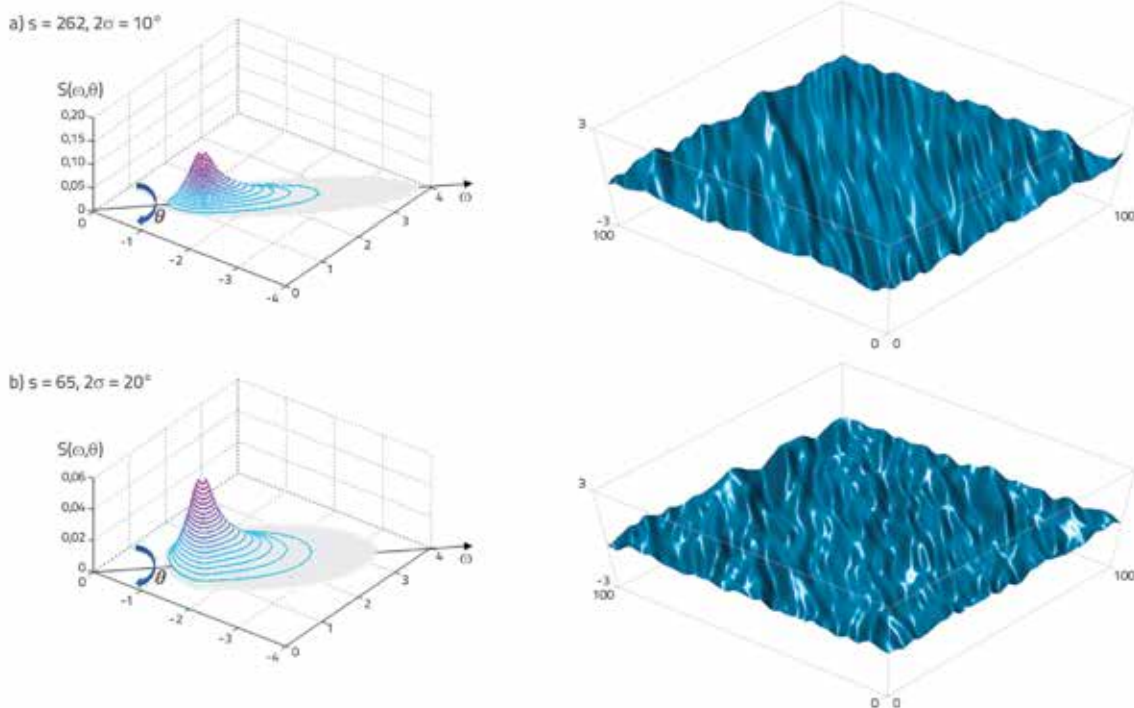
$$\rho(\omega) = e^{-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma(\omega)^2 \omega_p^2}} \quad (4)$$

gdje je $\sigma(\omega)$ parametar oblika valnog spektra koji ovisi o frekvenciji ω , koja je definirana pomoću vršne frekvencije spektra ω_p na sljedeći način [9]:

$$\sigma(\omega) = \begin{cases} 0,08 & \text{za } \omega \leq \omega_p \\ 0,10 & \text{za } \omega > \omega_p \end{cases} \text{ te } \omega_p = 0,32 + \frac{1,8}{H_s + 0,6} \quad (5)$$

Treba primijetiti kako Tabainov izraz zahtijeva jedino značajnu visinu vala kao ulazni podatak za definiranje valnog spektra. Iako je Tabainov spektar u ovom slučaju odabran jer pruža realnu valnu sliku Jadranskog mora, ostali se spektri podjednako jednostavno mogu implementirati u predloženi model.

Dvodimenzijски valni spektar definira prostornu raspodjelu izdizanja morske površine za različite frekvencije i smjerove valova [6]. Kako bi se uključila i varijabilnost smjera propagacije valova, jednodimenzijски Tabainov spektar definiran izrazom (3)



Slika 3. Dvodimenzijski valni spektar i generirano izdizanje površine mora za $H_s = 0,6$ m: a) $s = 262$; b) $s = 65$

proširen je dodatnim parametrom $D(\theta)$ tako da vrijedi $S(\omega, \theta) = S(\omega)D(\theta)$. Pritom je parametar $D(\theta)$ definiran izrazom [6]:

$$D(\theta) = C \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \tag{6}$$

gdje je $c = \Gamma(s+1)/[\Gamma(s+1/2)2\sqrt{\pi}]$, $\Gamma(s)$ je Gamma funkcija, s je parametar koji definira raspon smjerova, a $\theta - \theta_0$ je relativni kut između pojedinog smjera propagacije θ i glavnog smjera θ_0 . Amplituda vala varira s obzirom na frekvenciju i smjer vala, a definirana je izrazom $a(\omega, \theta) = \sqrt{2S(\omega)D(\theta)\Delta\omega\Delta\theta}$. Da bi se predočio utjecaj raspona smjera propagacije na rezultirajuće valno polje, na slici 3. su prikazana dva dvodimenzijaska valna spektra i odgovarajuće valovite površine mora u proizvoljnom vremenu, za različite s parametre i značajnu valnu visinu $H_s = 0,6$ m.

Treba napomenuti kako je valni broj u izrazu (2) moguće izračunani pomoću jednadžbe disperzije vala, gdje je d dubina dna. Međutim, kako je navedena jednadžba nelinearna, moguće ju je riješiti samo pomoću iterativnih metoda, kao što su bisekcija ili Newton-Raphson. Zbog toga je jednostavnije koristiti alternativni eksplicitni oblik izraza disperzije, poput [10]:

$$k_i = \frac{\omega_i^2}{g} \left[1 - e^{-\left(\omega_i \sqrt{d/g}\right)^{5/2}} \right]^{-2/5} \tag{7}$$

Refleksija valova od obalnog zida Morskih orgulja je u modelu opisana lokalnim povećanjem amplitude vala. S druge strane, nelinearna interakcija valova nije uključena u ovoj fazi razvoja

modela, pošto je pretpostavljeno da je njezin utjecaj zanemariv. U skladu s navedenim postavkama, izdizanje razine mora neposredno ispred obalnog zida Morskih orgulja može se opisati sljedećim izrazom:

$$\eta(x, y, t) = (a + a_r) \cos(\omega t - k(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) + \alpha) \tag{8}$$

gdje je reflektirana amplituda vala definirana izrazom $a_r = K_r a$, K_r je koeficijent refleksije, a a predstavlja amplitudu dolaznog vala. Koeficijent refleksije vala od vertikalnog zida izračunan je s obzirom na visinu obale h_c iznad srednje razine mora (SRM) [11] te glavni smjer propagacije valova θ_0 :

$$K_r = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta_0) \left(\frac{6}{11} \frac{h_c}{H_s} + 0,7 \right) \tag{9}$$

Prema linearnoj teoriji valova, tlak vala na određenoj dubini h definiran je kao zbroj hidrostatičkog i dinamičkog tlaka [6]:

$$p_{wave} = p_{stat} + p_{dyn} = pgh + pg\eta(x, y, t) \frac{\cosh[k(d-h)]}{\cosh(kd)} \tag{10}$$

Hidrostatički tlak ovisi samo o dubini h , dok je dinamički tlak promjenjiv u vremenu, a može se izračunati kao suma dinamičkih tlakova svakog pojedinog harmoničkog vala [6]:

$$p_{dyn}(x, y, t, h) = \rho g \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \eta_{i,j}(x, y, t) \frac{\cosh[k_i(d-h)]}{\cosh(k_i d)} \tag{11}$$

Implementacija algoritma za generiranje realne površine mora relativno je jednostavna. Za početak, definira se prostorna domena koja je određena duljinom L_x i širinom L_y . Nakon toga, definira se prostorni korak Δl te matrica $J \times K$ gdje je $J = L_x / \Delta l$ broj redova, a $K = L_y / \Delta l$ broj stupaca matrice. Također, definira se i vremenska domena određena ukupnim vremenom simulacije T i prostornim korakom Δt . Na navedeni su način dobivene $T / \Delta t$ matrice veličine $J \times K$. Konačno, svaki element navedenih matrica opisuje izdizanje razine mora na odgovarajućim koordinatama, a računa se pomoću izraza (2), dok se dinamički tlak računa pomoću izraza (11) na zadanim koordinatama koji odgovaraju lokaciji ulaza u svaku cijev Morskih orgulja.

2.2. Numerički model oscilacija vodnih masa u cijevima orgulja

2.2.1. Procesne jednadžbe

Oscilacije vodnih masa u cijevima orgulja pod utjecajem valova simulirane su pomoću jednodimenzijalnog numeričkog modela koji se temelji na jednadžbi kontinuiteta i nestacionarnoj Bernoulliovoj jednadžbi. Jednadžba kontinuiteta opisana je sljedećim izrazom [12]:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

gdje je Q protok vode, V je volumen vode u cijevima, a t je vrijeme. Uz pretpostavku nestlačivog fluida, nestacionarna Bernoulliova jednadžba, dobivena integracijom Eulerove jednadžbe duž jedne strujnice između proizvoljnih točaka 1 i 2, može se zapisati na sljedeći način [12]:

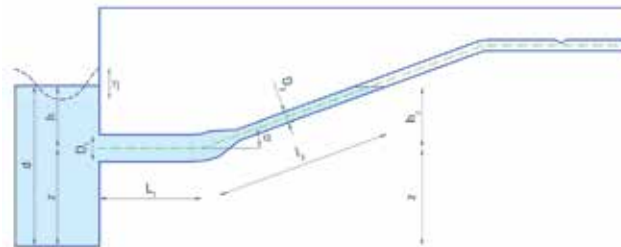
$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \Delta E + \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (13)$$

gdje je $z_{1,2}$ dubina vode, $p_{1,2}$ hidrostatički tlak, a $v_{1,2}$ brzina vode u točkama 1 i 2, ρ je gustoća vode a ΔE je pad energetske linije. Posljednji član na desnoj strani izraza (13) opisuje energiju po jedinici mase potrebnu za promjenu brzine v u infinitezimalnom dijelu strujnice ds .

Izrazi (12) i (13) primijenjeni su kako bi se pobliže proučile oscilacije vodnih masa u cijevima orgulja (slika 4.). Pod pretpostavkom da razina vode oscilira jedino duž druge cijevi (drugim riječima, voda u prvoj cijevi je uvijek pod tlakom), izraz (12) se može zapisati u sljedećem obliku:

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{Q}{A_2} \quad (14)$$

gdje je l_2 duljina stupca vode u drugoj cijevi, a A_2 je površina poprečnog presjeka druge cijevi.



Slika 4. Karakteristični uzdužni presjek sustava cijevi Morskih orgulja

Ako uzmemo u obzir strujnicu koja se proteže duž osi cijevi, lijeva strana izraza (13) se može zamijeniti s ukupnim tlakom od vala p_{wave} na dubini h koja odgovara osi cijevi (slika 4.). Tlak u cijevima mijenja se s obzirom na razinu vode h_p , dakle možemo zapisati $p_2 = \rho h_p = \rho g l_2 \sin \alpha$, gdje je α kut između osi druge cijevi i horizontalne ravnine. Akustični dio Morskih orgulja sastoji se od cijevi s malenim otvorom za zrak ispred labiuma, zbog čega se tlak unutar cijevi može zanemariti. Također, može se pretpostaviti kako je promjena brzine vode u svakom segmentu sustava cijevi trenutačna. Dakle, izraz (13) se može zapisati u sljedećem obliku:

$$\frac{p_{wave}}{\rho g} = l_2 \sin \alpha + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_e + \frac{L_1}{g} \frac{dv_1}{dt} + \frac{l_2}{g} \frac{dv_2}{dt} \quad (15)$$

Gdje su v_1 i v_2 brzine vode u ulaznoj i drugoj cijevi, L_1 je duljina ulazne cijevi, a ΔH_e predstavlja energetske gubitke. Budući da brzina vode ovisi o promjeru cijevi, izraz (15) je izražena kao funkcija protoka $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$:

$$h + \frac{p_{dyn}}{\rho g} = l_2 \sin \alpha + \frac{Q^2}{2gA_1^2} + \Delta H_e + \left(\frac{L_1}{gA_1} + \frac{l_2}{gA_2} \right) \frac{dQ}{dt} \quad (16)$$

gdje su A_1 i A_2 površine poprečnog presjeka prve i druge cijevi. Kako bi se zadržao ispravan predznak energetske visine, član s kvadratom protoka je zapisan kao produkt protoka i njegove apsolutne vrijednosti. Konačno, nestacionarna Bernoulliova jednadžba zapisana je u sljedećem obliku:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{h + \frac{p_{dyn}}{\rho g} - l_2 \sin \alpha - \beta \frac{Q|Q|}{2g}}{\frac{L_1}{gA_1} + \frac{l_2}{gA_2}} \quad (17)$$

s time da je ukupni koeficijent gubitaka β definiran kao:

$$\beta = \frac{1}{A_2^2} + \frac{\xi_E}{A_1^2} + \frac{\xi_A}{A_1^2} + \frac{\xi_R}{A_2^2} + \lambda_1 \frac{L_1}{D_1 A_1^2} + \lambda_2 \frac{l_2}{D_2 A_2^2} \quad (18)$$

gdje je ξ_E koeficijent lokalnog gubitka na ulazu u cijev, ξ_A koeficijent lokalnog gubitka na koljenu, ξ_R koeficijent lokalnog

gubitka na mjestu redukcije profila, dok su dva posljednja člana izraza (18) linijski gubici uslijed trenja koji su opisani Darcy-Weisbachovom jednadžbom [12], gdje su D_1 i D_2 promjeri prve i druge cijevi, a λ_1 i λ_2 koeficijenti trenja u prvoj, odnosno drugoj cijevi, koji se mogu odrediti iz White-Colebrookove jednadžbe [12].

Dakle, procesne su jednadžbe definirane kao sustav dviju nelinearnih običnih diferencijalnih jednadžbi (ODJ) s dvije nepoznanice: duljinom vodnog stupca l_2 i protokom Q . Nažalost, izrazi (14) i (17) se ne mogu riješiti analitički, zbog čega je potrebno primijeniti neku od numeričkih shema kako bi se aproksimiralo odgovarajuće rješenje.

2.2.2. Numerička shema

Općeniti pristup u rješavanju dinamičkog odziva bilo kojeg sustava je direktna numerička integracija ODJ. U ovom se pristupu traže rješenja koja zadovoljavaju jednadžbe u diskretnim vremenskim trenucima, s obzirom na poznati početni uvjet [13]. Postoji više različitih numeričkih metoda, koje se mogu kategorizirati kao eksplicitne ili implicitne. U ovome je radu primijenjena implicitna trapezna metoda [13] kako bi se numerički riješio sustav procesnih jednadžbi. Predložena implicitna trapezna metoda za rješavanje ODJ oblika:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (19)$$

može se zapisati sljedećim izrazom [13]:

$$y^{n+1} = y^n + \frac{\Delta t}{2} [f(t^n, y^n) + f(t^{n+1}, y^{n+1})] \quad (20)$$

gdje je y^{n+1} nepoznata vrijednost funkcije $y(t)$ u trenutku $t^{n+1} = t^n + \Delta t$, y^n je poznata vrijednost u trenutku t^n , $f(t^n, y^n)$ i $f(t^{n+1}, y^{n+1})$ su vrijednosti vremenske derivacije funkcije $y(t)$ u trenucima t^n i t^{n+1} , a Δt je vremenski korak. Implicitna trapezna metoda je drugoga reda točnosti i A-stabilna [11]. Predložena numerička metoda primijenjena je kako bi se riješili izrazi (14) i (17), na sljedeći način:

$$l_2^{n+1} = l_2^n + \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{Q}{A_1} \right)^n + \left(\frac{Q}{A_1} \right)^{n+1} \right] \quad (21)$$

$$Q_2^{n+1} = Q_2^n + \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{h + \frac{p_{dyn}}{\rho g} - l_2 \sin \alpha - \beta \frac{Q|Q|}{2g}}{L_1 + \frac{l_2}{gA_2}} \right)^n + \left(\frac{h + \frac{p_{dyn}}{\rho g} - l_2 \sin \alpha - \beta \frac{Q|Q|}{2g}}{L_1 + \frac{l_2}{gA_2}} \right)^{n+1} \right] \quad (22)$$

Navedene jednadžbe su nelinearne, zbog čega je potrebno koristiti neku od iterativnih metoda za rješavanje sustava nelinearnih jednadžbi. Budući da analitička formulacija Jakobijeva

matrice procesnog sustava jednadžbi nije trivijalna (prije svega zbog derivacije empirijske jednadžbe trenja), kvazi-Newtonova metoda je poželjnija u ovom slučaju. U tu je svrhu odabrana Broydenova metoda [14] kako bi se riješio zadani sustav nelinearnih jednadžbi. U ovoj je iterativnoj metodi Jakobijeva matrica zamijenjena aproksimativnom matricom, koju je onda relativno jednostavno ažurirati u svakom iterativnom koraku [14]. Također, ukupan je broj operacija u svakom koraku smanjen, a konvergencija je superlinearna [14].

2.3. Konceptualni model za generiranje zvuka

U ovome je radu korišten pojednostavljeni pristup računalnom generiranju zvuka. Pretpostavljeno je da se u svakoj akustičnoj cijevi može generirati jedan ton odgovarajuće frekvencije, ovisno o geometriji i karakteristikama te cijevi. Međutim, jakost zvuka ovisi o brzini zraka na izlazu iz cijevi. Druga je pretpostavka kako brzina zraka direktno ovisi o izračunanim oscilacijama razine vode unutar cijevi.

Prvi se korak sastoji od proračuna oscilacija razine vode u svakoj cijevi, kako je opisano u prethodnom poglavlju. Nakon što je h_p poznat, potrebno je izračunati brzinu promjene razine vode pomoću sljedeće diskretne derivacije:

$$\frac{dh_p}{dt} \approx \frac{h_p^{n+1} - h_p^n}{\Delta t} \quad (23)$$

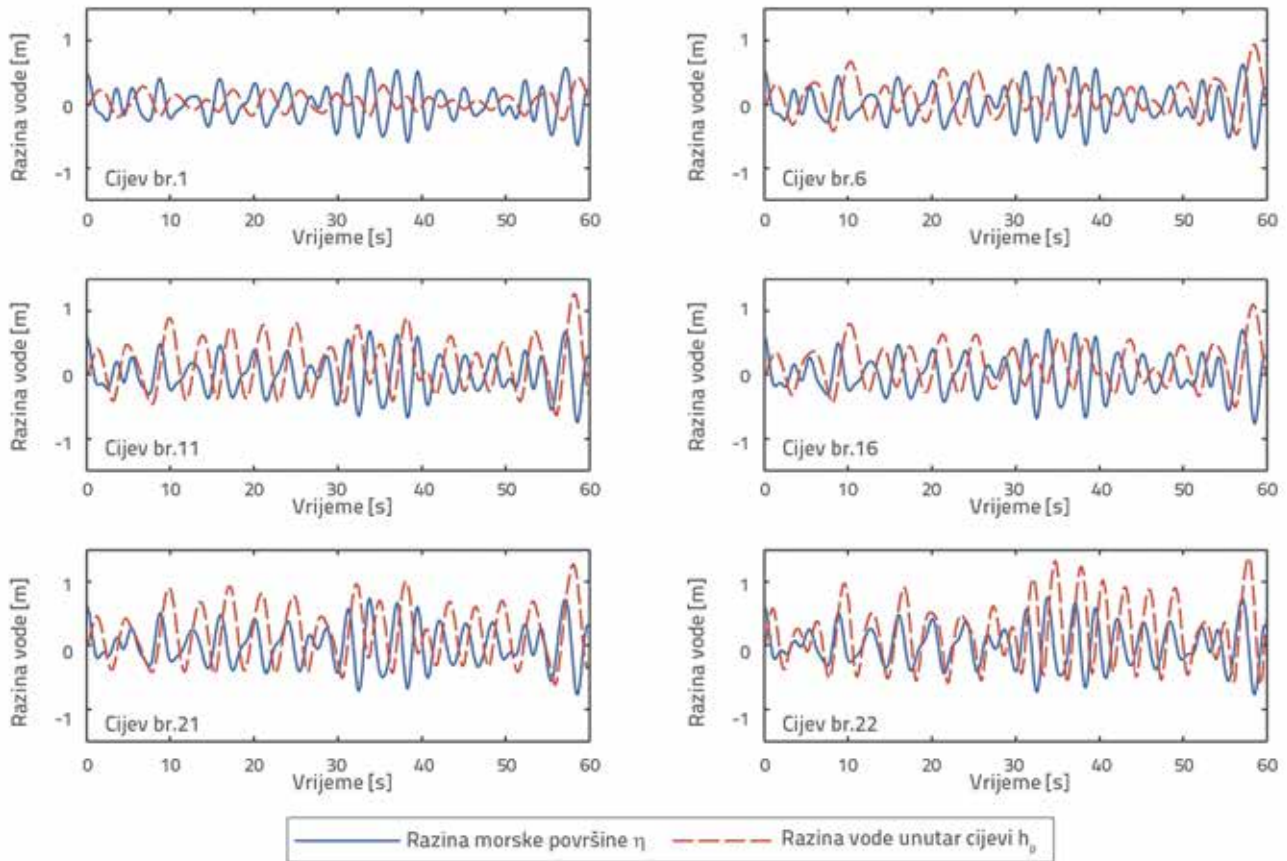
Uz pretpostavku da se zvuk proizvede samo kada zrak izlazi iz cijevi, trajanje određenog tona definirano je vremenskom udaljenosti između dvije susjedne nul-točke izraza (23). Amplituda zvučnog vala proporcionalna je pozitivnoj vrijednosti izraza (23) između dvije nul-točke. Dakle, zvučni zapis moguće je računalno generirati pomoću sljedeće valne jednadžbe:

$$y(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (24)$$

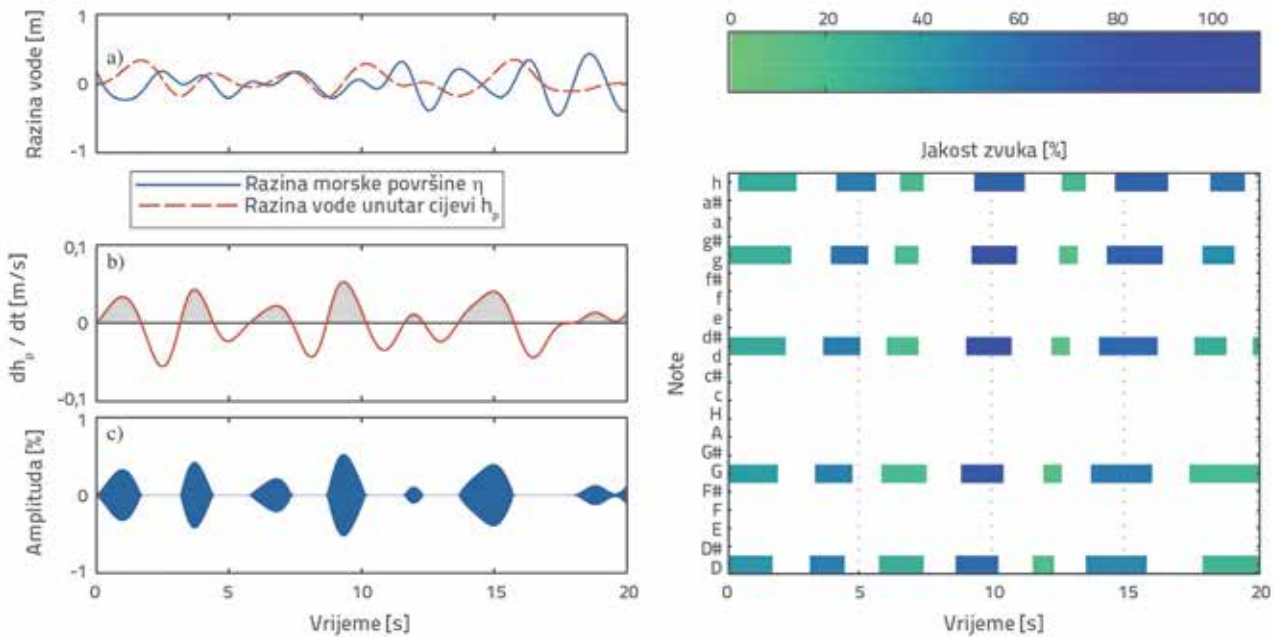
gdje je A amplituda zvučnog vala proporcionalna brzini promjene razine vode unutar cijevi, f je unaprijed zadana frekvencija tona, a t je vrijeme proteklo između dvije susjedne nul-točke izraza (23).

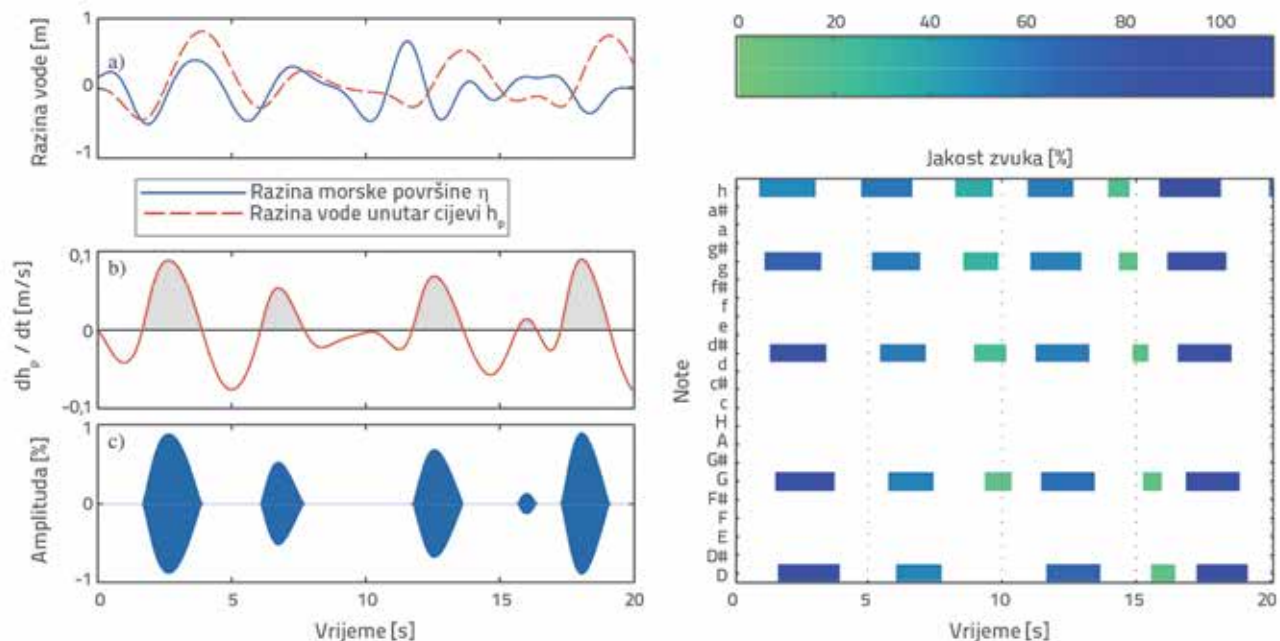
3. Rezultati i rasprava

Kako bi se demonstrirale mogućnosti predloženog modela, prikazana su dva primjera. U prvom su primjeru uspoređene oscilacije razine vode unutar cijevi za različite segmente orgulja, ali za jednake valne uvjete. Valni je spektar generiran za značajnu valnu visinu $H_s = 0,5$ m, bez raspona smjera propagacije $\theta = 0^\circ$ i za glavni smjer okomit na obalnu liniju $\theta_0 = 0^\circ$. Koeficijent refleksije izračunan je pomoću izraza (9) za različite visine obale po segmentima. Oscilacije razine vode unutar cijevi su izračunane pomoću predloženog numeričkog modela (poglavlje 2.2). Geometrija cijevi za svaki segment procijenjena je na



Slika 5. Numerički rezultati za vanjske (razina morske površine) i unutarnje (razine vode unutar cijevi) oscilacije po segmentima

Slika 6. Rezultati za SZ scenarij: a) oscilacije vanjske i unutarnje razine vode za cijev 16; b) brzina promjene razine vode u cijevi 16; c) generirani zvuk u cijevi 16; d) generirana *piano-roll* melodija za segment 4



Slika 7. Rezultati za II scenarij: a) oscilacije vanjske i unutarnje razine vode za cijev 16; b) brzina promjene razine vode u cijevi 16; c) generirani zvuk u cijevi 16; d) generirana *piano-roll* melodija za segment 4

temelju idejnih skica (slike 1. i 2.); $D_1=30$ cm za ulaznu cijev, $D_2 = D_3 = 12$ cm za drugu i treću cijev; kuta ulazne cijevi je $-0,5$ m.n.m., a kota gornje akustične cijevi je $+1,6$ m.n.m.; duljine cijevi variraju ovisno o segmentu, kao i kut između horizontale i druge cijevi (α je odabran u rasponu od 20° do 56°). Budući da je materijal cijevi PE ili nehrđajući čelik, gubici uslijed trenja su zanemareni, dok su lokalni gubici izračunani pomoću koeficijenata odabranih iz poznatih tabličnih vrijednosti dostupnih u literaturi [12].

Rezultati dobiveni za prvi primjer – vanjske i unutarnje oscilacije vode za različite segmente – prikazani su na slici 5. Unutarnje oscilacije, dobivene uslijed djelovanja jednakih valova, nešto su manje u cijevima 1 i 6 u usporedbi s ostalim cijevima, što se može pripisati manjim koeficijentom refleksije kod prva dva segmenta zbog niže obale. Još i važnije, među segmentima je primjetan i drugačiji odziv razine vode unutar cijevi. Čini se da su zbog duljih cijevi (i većeg početnog volumena vode) unutarnje oscilacije vode prigušenije u cijevima 1 i 6 u usporedbi s cijevima 11 i 16, a posebno u usporedbi s cijevima 21 i 26.

Drugi primjer prikazuje unutarnje oscilacije vode i rezultirajući zvuk za dvije različite valne situacije. U prvom je scenariju promatran realan slučaj umjerenog vjetera iz SZ (ZSZ) smjera, što je rezultiralo značajnom valnom visinom, s rasponom smjera propagacije $\theta_0 = \pm 20^\circ$, i glavnim smjerom propagacije $\theta_0 = 45^\circ$. U drugom je scenariju promatran slučaj umjerenog jakog vjetera iz II smjera, koji je rezultirao nešto većom značajnom visinom vala $H_s = 0,7$ m, s rasponom smjera propagacije $\theta_0 = \pm 20^\circ$, i glavnim smjerom propagacije $\theta_0 = -60^\circ$. Oscilacije unutarnje razine vode izračunane su koristeći iste ulazne parametre kao i u prethodnom primjeru.

Rezultati za drugi primjer prikazani su na slici 6. (za SZ scenarij) i na slici 7. (za II scenarij). Razlike između generiranih vrijednosti η

i odgovarajuće razine h_p dodatno naglašavaju važnost korištenja numeričkog modela za simulaciju oscilacija razine vode unutar cijevi (slike 6.a i 7.a). Nadalje, utjecaj visine valova primjetan je kada se usporede slike 6.a i 7.a; viši valovi rezultiraju izraženijim oscilacijama razine vode unutar cijevi. Viši valovi također rezultiraju i glasnijim tonovima (slika 7.c u usporedbi sa slikom 6.c). Rezultirajuća glazbena MIDI datoteka u *piano-roll* formatu prikazuje utjecaj smjera propagacije valova na melodiju koju proizvode orgulje; SZ smjer valova generira melodiju uzlaznih nizova tonova, dok II smjer valova generira melodiju silaznih nizova tonova (slike 6.d i 7.d).

4. Zaključak

U ovome je radu prikazan integralni računalni model za simulaciju hidrauličkih i glazbenih aspekata Morskih orgulja u Zadru. Realni valovi su računalno generirani pomoću algoritma temeljenog na usmjerenom spektru valova. Oscilacije razine vode unutar cijevi simulirane su pomoću jednodimenzijskog numeričkog modela temeljenog na implicitnoj metodi za rješavanje sustava dviju običnih parcijalnih jednačini. Konačno, zvuk i melodija su računalno generirani pomoću jednostavnog zvučnog modela temeljenog na valnom obliku zvučnog signala.

Iz rezultata je proizašlo nekoliko korisnih i zanimljivih informacija o Morskim orguljama. Geometrija sustava cijevi, prije svega duljina i nagib, ponajviše utječu na oscilacije razine vode unutar cijevi i posljedično na intenzitet i trajanje zvuka. Također, analiza je pokazala kako prva dva segmenta orgulja, u kojoj su najdulje cijevi i najniži koeficijenti refleksije valova, rezultiraju manjim oscilacijama razine vode i slabijim zvukom u usporedbi s ostalim segmentima. Ovaj se rezultat poklapa s osobnim

iskustvom autora, gdje je primijećeno kako prva dva segmenta Morskih orgulja u Zadru gotovo ne proizvode zvuk pri manjim valovima. Uz jasnu ovisnost visine valova i jakosti zvuka, analize su također pokazale kako duljina i smjer propagacije valova također utječu na konačnu melodiju; sjeverni vjetrovni valovi generiraju melodiju uzlaznih nizova tonova, a južni vjetrovni valovi generiraju melodiju silaznih nizova tonova. Iako su neki fizikalni procesi, kao što su varijacije tlaka u cijevima ili nelinearne transformacije i interakcije valova, zanemareni, računalni je model vrlo realistično simulirao glavne procese. Nažalost, usporedba konačnog zvuka generiranog ovim modelom ne može na odgovarajući način biti prikazana u papirnatom formatu; međutim, čitatelji se pozivaju da sami procijene sličnosti između simulacije predstavljenog modela [15] i zvučnog zapisa s Morskih orgulja u Zadru [16].

Budući planovi uključuju eksperimentalne analize na fizikalnom modelu morskih orgulja koji će se izraditi u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakultet Sveučilišta u Rijeci. Fokus ovog eksperimentalnog istraživanja posvetit će se labiumu – malom otvoru u akustičnoj cijevi – i njegovom utjecaju na oscilacije razine vode i tlaka unutar cijevnog sustava. Na temelju ovih rezultata, računalni će se model detaljno validirati i po potrebi dodatno modificirati i unaprijediti.

Zahvala

Ovaj je rad financiralo Sveučilište u Rijeci projektom broj 13.05.1.1.03 (Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškom području).

LITERATURA

- [1] Bašić Stelluti, B., Mattioni, V.: Sea Organ and Greeting to the Sun, Marinaprojekt d.o.o., Zadar, Croatia, 2011.
- [2] Peroli, G., Krvavica, N.: A simplified computational model of the Sea Organ in Zadar, Zbornik Građevinskog fakulteta u Rijeci, 19 (2016) 1, pp. 9-24.
- [3] Stamač, I.: 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, Opatija, Croatia, pp. 203-206, 2005.
- [4] MATLAB 2010b. The Mathworks, Inc. Natick. Massachusetts. SAD, 2010.
- [5] Schutte, K.: MATLAB and MIDI, kenschutte.com/midi, 17.2.2017.
- [6] Holthuijsen, L.H.: Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
- [7] Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A.: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsches Hydrographisches Institut, Germany, 1973.
- [8] Pierson, W.J., Moskowitz, L.: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. Journal of geophysical research, 69 (1964) 24, pp. 5181-5190, <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05181>
- [9] Tabain, T.: Standard Wind Wave Spectrum for the Adriatic Sea Revisited (1977-1997), Brodogradnja, 45 (1997), pp. 303-313., 1997.
- [10] Guo, J.: Simple and explicit solution of wave dispersion equation, Coastal Engineering, 2 (2002), pp. 71-74, [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00039-X)
- [11] Goda, Y.: Random seas and design of maritime structures, Univ. of Tokyo Press, Japan, 1985.
- [12] White, F.M.: Fluid mechanics. 5th edition. McGraw-Hill Book Company, Boston, USA, 2003.
- [13] Lambert, J.D.: Computational methods in ordinary differential equations, John Wiley & Sons, USA, 1973.
- [14] Broyden, C.G.: A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations, Mathematics of computation, 19 (1965) 92, pp. 577-593, <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0198670-6>
- [15] Computational model for the Sea Organ in Zadar, Croatia, youtu.be/UdkOZVO3E6g, 26.9.2017.
- [16] Zadar Sea Organ, www.youtube.com/watch?v=n86pF-wQKrw, 8.5.2017.