

Primljen / Received: 2.10.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.12.2018

Prihvaćen / Accepted: 22.12.2018.

Dostupno online / Available online: 25.3.2019.

Optimizacija akustičnih i ekonomskih značajki zvučnih barijera upotrebom genetičkog algoritma

Autori:



Dr.sc. **Sanja Grubeša** dipl.ing.el.
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
sanja.grubesa@fer.hr



Dr.sc. **Mia Suhanek**, dipl.ing.el.
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mia.suhanek@fer.hr



Prof.dr.sc. **Ivan Đurek**, dipl.ing.el.
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivan.djurek@fer.hr



Izv.prof.dr.sc. **Antonio Petošić**, dipl.ing.el.
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
antonio.petosic@fer.hr

Prethodno priopćenje

Sanja Grubeša, Mia Suhanek, Ivan Đurek, Antonio Petošić

Optimizacija akustičnih i ekonomskih značajki zvučnih barijera upotrebom genetičkog algoritma

U ovom radu proučavana je optimizacija zvučnih barijera pomoću numeričke metode rubnih elemenata i genetičkog algoritma. Zvučne barijere su optimizirane po akustičkim, tehnološkim i ekonomskim značajkama u svrhu dobivanja optimalne zvučne barijere. Kako bi se optimizirale akustičke i ekonomske karakteristike zvučne barijere korišten je genetički algoritam koji od danih oblika slaže zvučnu barijeru. U radu je definiran i novi parametar, nazvan parametar troška zvučne barijere (K_e). Primjenom genetičkog algoritma i parametra troška zvučne barijere (K_e) lako je stvoriti, razviti i konstruirati odgovarajuću zvučnu barijeru.

Ključne riječi:

zvučne barijere, optimizacija, parametar akustične učinkovitosti barijere, parametar troška zvučne barijere

Preliminary note

Sanja Grubeša, Mia Suhanek, Ivan Đurek, Antonio Petošić

Combined acoustical and economical noise barrier optimization using genetic algorithms

This paper studies noise barrier optimization using the Boundary Element Method (BEM) as a numerical technique and Genetic Algorithms (GA). Noise barriers are optimised according to acoustical, technological and economical properties so as to obtain an optimum noise barrier. In order to optimise acoustical and economical properties of noise barriers, the use is made of a genetic algorithm that forms a noise barrier out of given shapes. A new noise barrier evaluation parameter, named the noise barrier cost parameter (K_e), is also defined in the paper. Using the genetic algorithm and the noise barrier cost parameter (K_e), it is easy to create, develop and construct an appropriate noise barrier.

Key words:

noise barriers, optimisation, barrier acoustic-efficiency parameter, noise barrier cost parameter

Vorherige Mitteilung

Sanja Grubeša, Mia Suhanek, Ivan Đurek, Antonio Petošić

Optimierung akustischer und wirtschaftlicher Eigenschaften der Schallbarrieren durch Anwendung eines genetischen Algorithmus

In dieser Abhandlung wird die Optimierung von Schallbarrieren mithilfe der numerischen Randelementmethode und des genetischen Algorithmus untersucht. Die Schallbarrieren wurden gemäß den akustischen, technologischen und wirtschaftlichen Eigenschaften optimiert, um eine optimale Schallbarriere zu erhalten. Um die akustischen und wirtschaftlichen Merkmale der Schallbarriere zu optimieren, wurde ein genetischer Algorithmus angewendet, der aus den gegebenen Formen eine Schallbarriere zusammenfügt. In der Abhandlung wird auch ein neuer Parameter definiert, genannt Kostenparameter der Schallbarriere (K_e). Durch Anwendung des genetischen Algorithmus und des Kostenparameters der Schallbarriere (K_e) ist es leicht, eine geeignete Schallbarriere zu erstellen, zu entwickeln und zu konstruieren.

Schlüsselwörter:

Schallbarrieren, Optimierung, Parameter der akustischen Effizienz der Barriere, Kostenparameter der Schallbarriere

1. Uvod

Zvučne barijere najčešće se primjenjuju radi smanjenja prekomjernih razina buke, a posebno u slučajevima kada je izvor buke promet. Kontinuirano rastuća mobilnost ljudi i robe dovodi do naglog porasta prometa, a time i buke koju promet stvara. Stoga je buka prometa (cestovnog, željezničkog, zračnog i brodskog) postala jedno od važnih pitanja koje utječe na kvalitetu života u područjima gdje vrijednosti buke prelaze propisane granice [1]. Za opis smanjenja razine buke često služi i parametar koji se definira kao smanjenje razine buke zbog postavljanja zvučne barijere (eng. *Insertion Loss* - IL). Taj parametar uglavnom ovisi o visini zvučne barijere, a u manjoj mjeri o obliku poprečnog presjeka i obliku vrha barijere [2-4]. Stoga se većina današnjih istraživanja usredotočuje na optimizaciju parametra smanjenja razine buke zbog postavljanja zvučne barijere [5-9].

Glavni problem većine zvučnih barijera, kod kojih je optimizirani oblik poprečnog presjeka, a još više kod barijera kod kojih se optimizira oblik difuznog gornjeg elementa, jest taj da se ukupni trošak takvih barijera uopće ne razmatra [5-8]. To je posebno naglašeno u slučajevima kada su ti oblici tehnološki vrlo složeni i skupi za proizvodnju ili ako materijali od kojih je zvučna barijera napravljena nisu posebno isplativi, što čini takvo oblikovanje ekonomski neprihvatljivim. Kako bismo to detaljno objasnili, moramo imati na umu da bi materijal od kojeg se barijera izrađuje morao biti dovoljnog indeksa zvučne izolacije kako bi dominantni izvor buke na mjestu prijama iza barijere uvijek bio zvuk koji se ogiba oko barijere, a ne zvuk koji prolazi kroz barijeru. Indeks zvučne izolacije i koeficijent zvukoupjnosti barijere u oktavnom frekventijskom rasponu (125 Hz - 4 kHz) u uvjetima difuznog polja često se mjeri u laboratorijskim uvjetima prema [10, 11]. Kombinacija parametara određenih u laboratorijskim uvjetima (indeks zvučne izolacije, koeficijent zvukoupjnosti) zajedno s parametrima određenim u terenskim uvjetima (koeficijent difrakcije prema [12] i koeficijent refleksije prema [13]) utječu na parametar smanjenja razine buke zbog postavljanja zvučne barijere na mjesto na kojem je barijera postavljena. Prema tome, dominantni dio zvučne energije buke od izvora do mjesta prijama iza barijere treba uvijek biti dio koji se raspršuje oko barijere (obično preko vrha za duge barijere) [14]. Nadalje, dodajući tom zahtjevu i složeni oblik barijere, dobivamo barijere koje su tehnološki vrlo složene i skupe za proizvodnju, a time ekonomski neisplative.

Zvučne barijere su uvijek dugačke (u odnosu na njihovu visinu) zbog načina širenja zvučnog vala. U stvarnim okolnostima možemo to uočiti na autocestama i drugim brzim prometnicama gdje duljina zvučnih barijera lako može doseći nekoliko stotina metara.

Učinkovitost zvučne barijere također se može povećati uvođenjem sustava za aktivno poništenje buke [15], iako je u tim slučajevima učinkovitost barijere ograničena na određeni frekventijski raspon. Takva rješenja uvijek unose dodatne troškove u osnovnu cijenu barijere. Određeno poboljšanje učinkovitosti barijere dobiva se i sadnjom raznovrsnog bilja na zvučnu barijeru te se na taj način povećava i debljina same

barijere [16]. Takvo poboljšanje je također vrlo ograničeno, te je vrlo upitno opravdavaju li takva rješenja povećanje ukupnih troškova barijera.

Zbog svih prethodno navedenih razloga, u ovom se radu obrađuje problem ekonomske isplativosti gradnje zvučnih barijera različitih oblika i materijala. Istraživanja i proračuni u ovom radu uvode specifičan parametar troška zvučne barijere (K_p) koji se mora uzeti u obzir tijekom procesa optimizacije takvih barijera.

2. Numerička metoda za proračun učinkovitosti zvučnih barijera

Postoji više empirijskih izraza koji određuju razinu buke od prometa na mjestu imisije. Ti se izrazi upotrebljavaju u različitim numeričkim modelima koji su dio različitih međunarodnih i nacionalnih normi i pravilnika [17]. Metoda rubnih elemenata (eng. *Boundary Element Method* - BEM) je numerička metoda za proračun parametra smanjenja razine buke zbog postavljanja zvučne barijere (IL) [18].

U ovom radu primijenjena je numerička metoda rubnih elemenata (BEM) za proračun parametra smanjenja razine buke zbog postavljanja zvučne barijere (IL). Uz pretpostavku da zvučni tlak u svakoj točki prostora harmonički ovisi o vremenu, tada je zvučni tlak dan izrazom (1).

$$p(x, y, z, t) = P(x, y, z) \cdot e^{j\omega t} \quad (1)$$

gdje je $p(x, y, z, t)$ zvučni tlak u vremenskoj domeni, a $P(x, y, z)$ je amplituda zvučnog tlaka u trodimenzionalnom prostoru.

Da bi se odredila vrijednost zvučnog tlaka u nekoj točki, potrebno je naći rješenje za homogenu Helmholtzovu jednadžbu danu izrazom (2) [19, 20],

$$\nabla^2 P(x, y, z) + k^2 P(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

gdje je $k=2\pi/\lambda$ valni broj (rad/m), a λ valna duljina u (m).

Metoda rubnih elemenata (BEM) omogućava laku promjenu elemenata zvučnih barijera te prilikom proračuna zvučnih barijera razmatra samo poluravninu u dvodimenzionalnom ili trodimenzionalnom prostoru, kad imamo izvor s jedne strane zvučne barijere, a jednu ili više točaka prijama s druge strane barijere [20-23]. Svi proračuni su napravljeni korištenjem kompjutorske aplikacije koja je isprogramirana u C++ programskom jeziku i koja je detaljnije opisana u [9, 24, 25].

3. O metodi modeliranja

Dva glavna parametra, to jest parametar akustičke učinkovitosti zvučne barijera - L_{x_i} i parametar troška zvučne barijere - K_p , ovisna su o obliku i materijalu barijere. Oni su ključni u procesu optimizacije barijera i stoga su detaljno analizirani u ovom

radu. Iz praktičnih razloga izabrana je zvučna barijera poznatih dimenzija, podijeljena na module unaprijed definiranog oblika koji se mogu proizvesti u tvornicama i lako se sastavljaju na licu mjesta. Svi oblici i veličine odabrani su nakon konzultacija s tvrtkama koje imaju praktično iskustvo u proizvodnji zvučnih barijera.

Drugi parametar, parametar troška zvučne barijere (K_z), uzima u obzir ukupni trošak barijere, uglavnom fokusirajući se na novooblikovani algoritam za optimizaciju troškova montaže zvučne barijere na određenoj lokaciji te uzimajući u obzir složenost proizvodnog procesa.

Konačno, i parametar akustičke učinkovitosti zvučne barijere (L_w) kao akustička mjera i parametar troška zvučne barijere (K_z) kao ekonomska mjera korišteni su u genetičkim algoritmima tijekom procesa optimizacije cijele zvučne barijere.

3.1. Oblik modula

Prilikom odlučivanja o osnovnim oblicima modula potrebnih za sastavljanje zvučne barijere, glavno pitanje je: "Može li se odabrani oblik relativno lako proizvesti po razumnoj cijeni?" lako je dobro poznato da mnogi procesi optimizacije daju različite oblike s maksimalnim parametrom smanjenja razine buke [5, 6], često su upravo ti dobiveni oblici previše komplicirani da bi se mogli proizvesti uobičajenim tehnološkim postupcima i materijalima. Zbog toga su razmatrani samo pojednostavljeni moduli, a ne njihovi složeniji oblici. Ukupno je definirano pet osnovnih oblika koji se mogu izraditi od šest različitih, ali uobičajenih materijala (drvo, beton, aluminij, čelik,

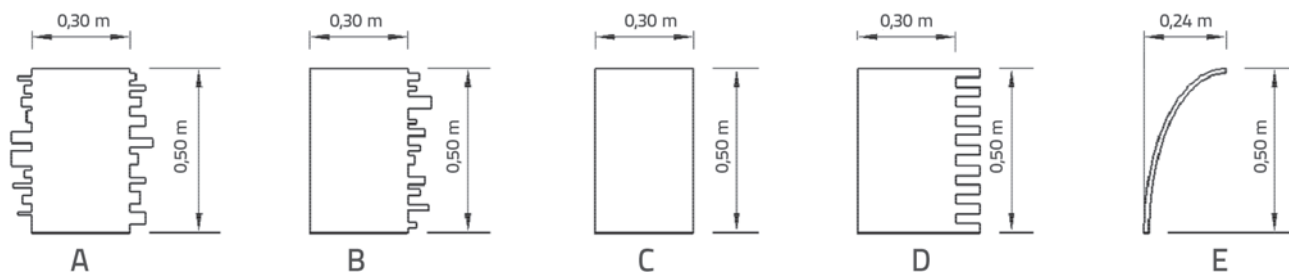
plastika i polikarbonat). U tablici 1. prikazane su izračunane vrijednosti specifične akustičke impedancije za najčešće korištene materijale u konstrukciji zvučnih barijera. Vidljivo je da su vrijednosti imaginarnog dijela impedancija tih materijala negativne [26]. Vrijednosti impedancije koriste se za simulaciju akustičkih svojstava zvučnih barijera u proračunima metodom konačnih elemenata. Izbor materijala kao i ulazni parametri za izračun akustičkih parametara detaljnije su obrađeni u našem već objavljenom radu [9, 25].

Odabrani oblici prikazani su na slici 1. i označeni kao tip A do E. Različiti oblici određeni su odabranim geometrijskim karakteristikama osnovnih oblika, a materijali njihovim akustičkim impedancijama, koje se koriste u procesu numeričkog proračuna. Važno je znati da svi oblici imaju iste osnovne dimenzije, primjerice visine 0,5 metara i duljine 4,0 metra, a mogli su biti sastavljeni u bilo kojem položaju analizirane zvučne barijere. Analizirana zvučna barijera može imati dimenzije od 16,0 do 5,0 metara. Ukupna debljina pregrade je 0,3 metra, što je veće od debljine uobičajeno korištenih zvučnih barijera. Razlog tome je što smo željeli održati produktivnost modula kao što je primjerice tip A koji ima udubljenja na obje strane i zadržati održivu statiku takvog modula. Jedina iznimka u navedenim postavkama je modul barijere tipa E, koji se može montirati samo na vrhu barijere. Drugi važan aspekt je taj da je donji sloj barijere uvijek izrađen od betona (i visok 0,5 metara), što je zajednički temelj za bilo koju zvučnu barijeru sastavljenu u stvarnim, svakodnevnim uvjetima.

Modul tipa A proizvodi se prešanjem i određuje se sljedećim parametrima: polovica debljine osnovnog modula, visina

Tablica 1. Specifična akustična impedancija materijala koji se najčešće koriste za konstrukciju zvučnih barijera [26]

Materijal	Aluminij	Čelik	Beton - predgotovljeni	Drvo - bagrem	Beton ugrađen na mjestu postavljanja	Polikarbonat
Specifična masa elementa [kg/m ²]	6,53	10,59	310	38	500	15
Frekvencija [Hz]	Imaginarni dio specifične akustične impedancije [10 ³ Pa s/m]					
125	-5,13	-8,32	-243,47	-29,85	-392,70	-11,78
250	-10,26	-16,63	-486,95	-59,69	-785,40	-23,56
500	-20,51	-33,27	-973,89	-119,38	-1570,80	-47,12
1000	-41,03	-66,54	-1947,79	-238,76	-3141,59	-94,25
2000	-82,06	-133,08	-3895,57	-477,52	-6283,19	-188,50
4000	-164,12	-266,16	-7791,15	-955,04	-12566,37	-376,99



Slika 1. Poprečni presjek svih pet modula (A do E) koji su korišteni u optimizacijskim procesima

udubine svakog pojedinog udubljenja na modulu i širina svakog pojedinog udubljenja na modulu. Polovica debljine osnovnog modula je unaprijed određena. Drugim riječima, genetički algoritam mijenja samo dubinu i duljinu udubljenja modula (detaljniji opis u poglavlju 3.3). Fenotip F_1 za ovaj tip modula je predstavljen brojem udubljenja (od 1 do N), kombinacijom njihove visine ($h_{\text{udubljenja}}$) i širine ($l_{\text{udubljenja}}$) te materijala od kojih je modul izrađen. Modul tipa A može se proizvesti od aluminija, čelika ili plastike. Modul tipa B je vrlo sličan tipu A, ali je jedna strana potpuno ravna, bez udubljenja. Također može biti izrađen od aluminija, čelika ili plastike. Modul tipa C je potpuno ravan bez ikakvih udubljenja. Može se izraditi od betona, plastike, drva ili polikarbonata, a njegova debljina ovisi o vrsti materijala. Modul tipa D je pojednostavljena verzija tipa A, sa svim jednakim dimenzijama udubljenja, ali ta udubljenja mogu imati pravokutni ili sferični presjek. Modul tipa E određen je debljinom i visinom od 0,5 metara. Međutim, njegov se gradijent mijenja kroz genetički algoritam koji nasumično izmjenjuje odabrane korake od 0,25 do 0,5 metara. Proizvodi se termoformiranjem ili predgotovljenjem od plastike ili polikarbonata.

3.2. Parametar akustičke učinkovitosti zvučne barijere

3.2.1. Spektar buke prometa

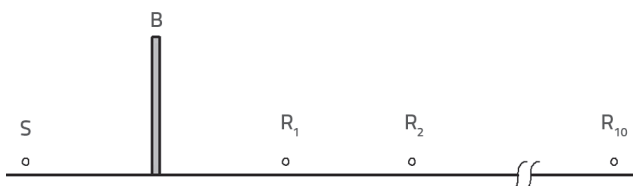
Kako bi se što više približio stvarnoj situaciji, izvor zvuka je modeliran tako da emitira razinu zvučnog tlaka od 100 dB na udaljenosti od jednog metra u uvjetima slobodnog polja na frekvenciji od 1 kHz. Na drugim frekvencijama razina zvučnog tlaka ovisi o normiranom spektru buke prometa, kako je definirano u tablici 2. [27]. Izračuni su napravljeni prema ovim zahtjevima s obzirom na činjenicu da se većina energije buke prometa nalazi u frekvencijskom području oko 1 kHz [27], što odgovara frekvencijskom području u kojem ljudski sluh pokazuje najveću osjetljivost. Može se zaključiti da su komponente prometne buke s frekvencijama između 500 Hz i 2 kHz one koje određuju ukupnu razinu prometne buke. Stoga se učinkovitost barijera mora optimizirati za ovaj frekvencijski pojas. S druge strane, jedan od ciljeva procesa projektiranja automobila je smanjiti razinu buke u prometu i na taj način promijeniti frekvencijski spektar kako bi bio prihvatljiviji [28, 29].

3.2.2. Akustička učinkovitost zvučne barijere

Akustička učinkovitost svake jedinice u svakoj novoj populaciji barijera izračunata je određivanjem parametra akustičke

učinkovitosti barijere (L_{xi}) za oktavne frekvencije u pojasu između 125 i 4000 Hz. Izračun se temelji na našem dizajnu BEM algoritma u trodimenzionalnom poluprostoru za kompleksnu konstrukciju barijere. Slika 2. prikazuje trodimenzionalni proračunski model, gdje je izvor zvuka postavljen 5 metara ispred barijere na 0,5 metara visine. Ta visina je odabrana zbog činjenice da su prethodne studije [30-32] pokazale kako se lokacija izvora zvuka za kombiniranu kotrljajuću buku i buku motora nalazi na 0,5 metara iznad tla. Nadalje, prijamne točke se nalaze na visini od 0,5 metara od tla, što predstavlja najgori mogući scenarij primjerice kada se izravan zvuk iz izvora zvuka superponira s reflektiranim zvukom od površine ceste, i to u frekvencijskom području u kojem je energija zvučnog tlaka buke prometa maksimalna (oko 1 kHz).

Impedancija tla određuje se prema Delany-Bazleyevom modelu [33], a vrijednosti impedancije tla na koje se postavlja zvučna barijera nalaze se u [25]. U proračunima prikazanim u ovom radu pretpostavlja se da su zvučne barijere postavljene na travu, površina ispod izvora je asfalt, a ispod površine za prijam je ponovo trava. Za izračunavanje parametra akustičke učinkovitosti barijera (L_{xi}) izračunava se prosječna razina zvučnog tlaka za prihvatne točke koje se nalaze na vertikalnoj liniji koja prolazi kroz središte buke, na udaljenosti od 5 do 50 metara od barijere u koracima od 5 metara, opet na 0,5 metara visine od tla. Ovakva obrada rezultata daje značajno bolju i realniju sliku barijere od uobičajenog promatranja uzoraka u nekoliko točaka. Prema tome, optimizacija više ne ovisi o pozicijama točaka, pa ni rezultati optimizacije ne ovise o rasporedu minimuma i maksimuma u točkama uzorkovanja, već ovise o stvarnoj optimizaciji barijere za zaštitu nekog područja iza nje.



Slika 2. Grafički prikaz pozicija za simulaciju: S je izvor, B je zvučna barijera i R su točke prijama

Procjena akustičkih svojstava barijere temelji se na ΔL_{ref} vrijednosti ili, drugim riječima, izračunava se kao razlika između prosječnih razina zvučnog tlaka za referentnu običnu betonsku barijeru L_{ref} i simuliranu barijeru L_{xi} kako je prikazano u izrazu (3).

$$\Delta L_{ref} = L_{ref} - L_{xi} \quad (3)$$

Tablica 2. Normirani spektar buke prometa L_1 [27]

f_i [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_1 [dB]	-20	-20	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-9	-8	-9	-10	-11	-13	-15	-16	-18

Tablica 3. Primjer numeričkih vrijednosti definiranih koeficijenata za izračun parametra troška zvučne barijere

Broj modula	Tip modula	Materijal modula	Karakteristike modula [m]	K_m (koef. troška materijala)	K_p (koef. kompleksnosti proizvodnje)	K_t (koef. transportnog troška)	K_e (parametar troška zvučne barijere)
1	C	aluminij	-	327	1	0,61	199,5
2	C	beton	-	224	1	0,62	138,8
3	D	plastika	broj udubljenja: 9 $h_{udubljenja} = 0,028$ $l_{udubljenja} = 0,061$	64	1,72	0,62	68,2
4	D	drvo	broj udubljenja: 5 $h_{udubljenja} = 0,05$ $l_{udubljenja} = 0,05$	214	1,6	0,63	215,7
5	D	drvo	broj udubljenja: 9 $h_{udubljenja} = 0,028$ $l_{udubljenja} = 0,05$	214	2,08	0,63	280,4
6	C	drvo	-	224	1	0,63	141,1

3.3. Parametar troška zvučne barijere (K_e)

Cijena barijere je ključni parametar pri donošenju odluke hoće li se inovativni oblik primjenjivati u nekom stvarnom slučaju ili ne. Međutim, troškovi se ne mogu optimizirati uobičajenim genetičkim algoritima ako nisu parametrizirani. Stoga parametar troška zvučne barijere (K_e) mora imati brojčanu vrijednost, koja izravno ovisi o svim karakteristikama zvučne barijere koje definiraju njezinu cijenu, a koje se mogu izravno izračunati analitičkim izrazom. Stoga je razvijen numerički postupak temeljen na istraživanjima i raspravama s proizvođačima zvučnih barijera, uzimajući u obzir sve aspekte koji pridonose ukupnoj cijeni instalirane barijere [9, 25]. Taj numerički postupak rezultirao je upotrebom novog parametra za optimizaciju, tzv. parametra troška zvučne barijere, (K_e). On predstavlja ukupnu cijenu barijere postavljene na odabranom mjestu. Nadalje, parametar troška zvučne barijere (K_e) odražava ukupne troškove postavljanja barijere u područje interesa i ovisi o ukupnom umnošku dva koeficijenta: K_t (koeficijentu troškova prijevoza) i K_b (koeficijentu proizvodnosti barijere), kao što je prikazano u izrazu (4). Koeficijent troškova prijevoza (K_t) proporcionalan je težini i volumenu modula barijere. U većini slučajeva, za konstrukciju barijere koriste se moduli veličine 4 metra x 0,5 metra, a njihov volumen je približno jednak. Stoga se u proračunu koristi samo masa barijere. Koeficijent je standardiziran za masu od 10.000 kg, tako da je koeficijent bezdimenzijski, a njegove vrijednosti služe samo za usporedbu različitih konstrukcija barijera [9, 25].

$$K_e = K_t \cdot K_b \quad (4)$$

Koeficijent proizvodnosti barijere K_b također ovisi o druga dva bezdimenzijska koeficijenta, koeficijentu troška materijala (K_m) i koeficijentu kompleksnosti proizvodnje (K_p), izraz (5).

$$K_b = K_m \cdot K_p \quad (5)$$

U našim prethodnim radovima [9, 25] postoji detaljnije objašnjenje i analiza svih navedenih koeficijenata. Tablica 3. prikazuje primjer numeričkih vrijednosti prethodno definiranih koeficijenata. Svaka je barijera načinjena od modula. Moduli su dimenzija 4 metra dužine i 0,5 metara visine i mogu biti izrađeni od različitih materijala (npr. aluminij, beton, plastika itd.). Osim toga, ovisno o tipu modula, broj udubljenja je različit (vidljivo u tablici 3.). Može se primijetiti da je za isti modul tipa C načinjen od različitih materijala, npr. od aluminijskog i betona, K_m veći za aluminij, što utječe na parametar troška zvučne barijere K_e (K_e za aluminij je veći od K_e za beton, vidi retke 1 i 2. Ako promatramo dva modula istog tipa D koji su izrađeni od drva i prvi ima pet, a drugi devet udubljenja, onaj s devet udubljenja imat će veći K_p , ali i veći K_e . Ipak, svi ostali koeficijenti za ta dva modula su vrlo međusobno slični (vidi retke 4 i 5). S druge strane, ako promatramo dva modula izrađena od istog materijala, npr. drva, ali oblikovana u različite vrste modula, npr. D i C, tada će K_p za modul tipa D biti veći nego za modul tipa C (vidi retke 5 i 6). Nakon ovih opažanja konačno se može zaključiti da tip materijala ima visok utjecaj na ukupnu cijenu barijere za buku. Štoviše, još snažniji utjecaj ima oblik modula - što je oblik kompliciraniji, povećanje parametra troška zvučne barijere je veće.

3.4. Primjena genetičkog algoritma (GA)

Da bismo optimizirali zvučnu barijeru, imajući na umu sve važne aspekte kao što su akustička učinkovitost i trošak barijere, potrebno je u obzir uzeti novouvedeni ekonomski parametar tj. trošak zvučne barijere (K_e), kao i parametar akustičke učinkovitosti barijere (L_{xi}). Za metodu numeričke optimizacije razvijen je i korišten genetički algoritam (GA). Algoritam započinje odabirom početne populacije barijere, svaka barijera se sastoji od 36 modula (9 x 4 modula, dok je deseti osnovni modul betonski temelj). Svaki modul se nasumično bira algoritmom. U stvarnoj primjeni svi moduli bili bi smješteni između metalnih stupova pričvršćenih na betonskoj podlozi, no u izračunu se nije uzelo u obzir smanjenje gubitka umetanja (IL) zbog tih metalnih stupova. To se može praktično postići primjenom odgovarajućeg brtvljenja između modula barijere i između modula i čeličnih stupova.

Važno je naglasiti da optimizacijski algoritam uzima u obzir i akustičku izvedbu barijere, kao i novi parametar troška barijera za svaku barijeru, točnije svaku jedinku. Analitički se to definira kao jednostavno množenje prosječnog zvučnog tlaka iza barijere, tj. parametara akustičke učinkovitosti barijere L_{xi} i prethodno definiranog parametra troška barijere K_e , kao što je prikazano u izrazu (6).

$$E_{xi} = L_{xi} \cdot K_e \tag{6}$$

Koeficijent E_{xi} predstavlja sposobnost preživljavanja svake barijere, točnije svake jedinke u genetičkom algoritmu, a predstavlja i ukupnu ocjenu barijere.

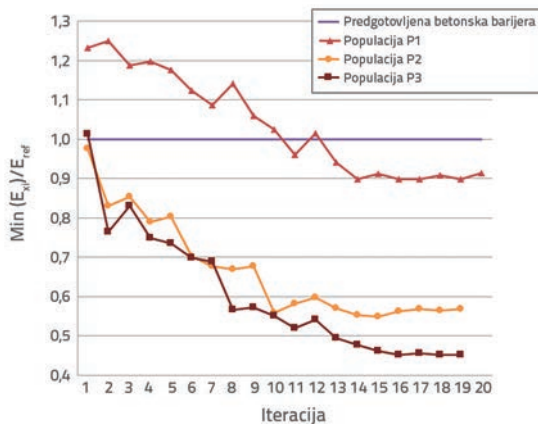
4. Rezultati istraživanja

Da bi se mogli dobiveni rezultati usporediti s referentnim slučajem, sve barijere (odnosno preciznije jedinke) uspoređuju se s najjednostavnijom mogućom barijerom, drugim riječima ravnom, prethodno predgotovljenom betonskom barijerom iste veličine i sastavljenom na mjestu.

Nadalje, stvorene su tri početne populacije različitih veličina kako bi se ispitao utjecaj broja jedinki na rezultate optimizacije. Prva populacija P1 sastoji se od 10 jedinki, druga populacija P2 od 20 jedinki i treća populacija P3 od 40 jedinki.

Za svaku barijeru (jedinku) u svim populacijama najprije je izračunan parametar akustičke učinkovitosti barijere L_{xi} . Zatim se za svaku jedinku izračunava i parametar troška zvučne barijere u svrhu dobivanja ukupne ocjene barijere E_{xi} [9, 25].

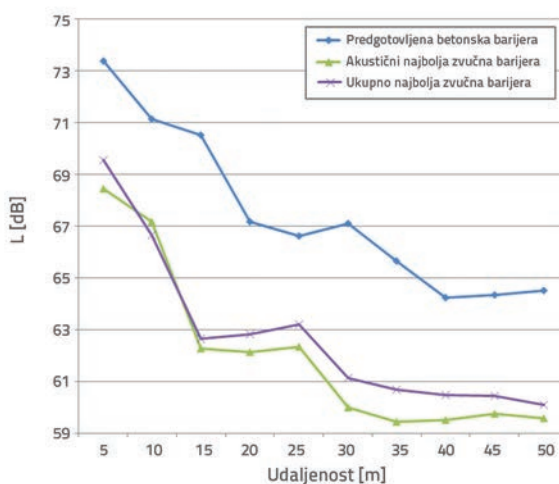
Slika 3. prikazuje vrijednosti ukupne ocjene barijere normirane s obzirom na ukupnu ocjenu referentne betonske barijere. Na slici 3. je vidljivo da se vrijednost ukupne ocjene zvučnih barijera E_{xi} smanjuje s brojem iteracija optimizacijskog algoritma, što znači da se akustičke i ekonomske značajke zvučne barijere poboljšavaju u svakom koraku optimizacije.



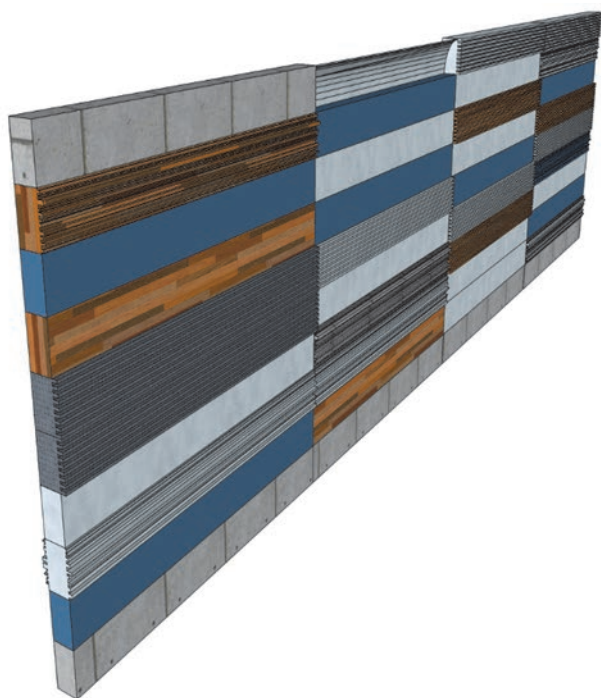
Slika 3. Normirana ukupna ocjena barijere u odnosu na referentnu predgotovljenu betonsku zvučnu barijeru za populacije P1, P2 i P3

Parametar akustičke učinkovitosti barijere je najveći za populaciju P3. Istodobno, ukupna ocjena barijere E_{xi} je najviša za tu istu populaciju P3. To dovodi do zaključka da broj zvučnih barijera, ili preciznije, jedinki u početnoj populaciji izravno utječe na sama ograničenja optimizacije. Stoga je za sve usporedbe rezultata optimizacije odabrana populacija P3.

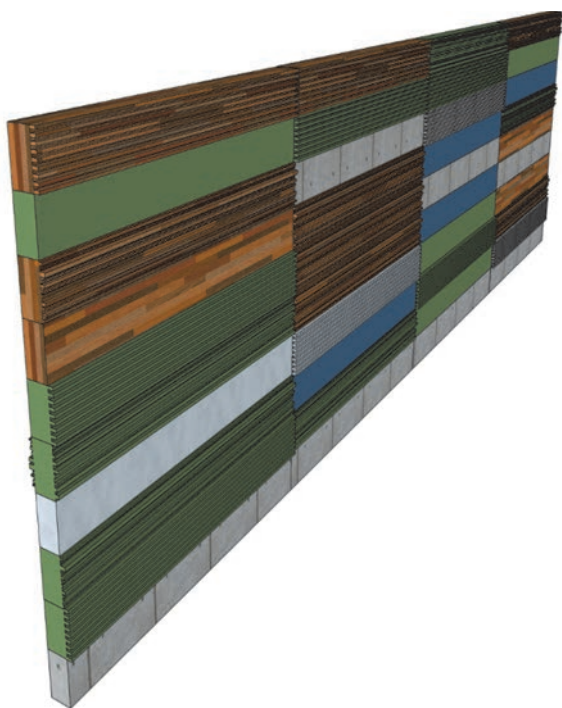
Slika 4. prikazuje prosječne razine zvučnog tlaka, odnosno parametar akustičke učinkovitosti barijere L_{xi} u odnosu na udaljenost od položaja barijere za referentnu betonsku barijeru, akustički najbolju barijeru i najbolju barijeru prema ukupnoj ocjeni. Optimizirane barijere, imajući na umu obje optimizacijske premise, znatno su bolje od betonske barijere, a akustički najbolje ocijenjena barijera je, iako u manjoj mjeri, bolja od najbolje barijere prema ukupnoj ocjeni.



Slika 4. Prosječna razina zvučnog tlaka za referentnu zvučnu barijeru (predgotovljena betonska barijera), za akustički najbolju zvučnu barijeru i za ukupno najbolju zvučnu barijeru



Slika 5. 3D vizualizacija akustični najbolje zvučne barijere (prema parametru L_{xi})



Slika 6. 3D vizualizacija ukupno najbolje zvučne barijere (prema parametru E_{xi})

Slika 5. prikazuje 3D vizualizaciju akustički najbolje barijere prema parametru (L_{xi}), a slika 6. 3D vizualizaciju najbolje barijere prema ukupnoj ocjeni E_{xi} . Može se primijetiti da optimizirana barijera, prema ukupnoj ocjeni, ima znatno više drvenih (označeni

smeđom bojom) i plastičnih modula (označeni zelenom bojom). Osim toga, ukupna ocjena barijere za buku također uzima u obzir i parametar troška zvučne barijere, a drveni i plastični moduli su općenito jeftiniji od modula izrađenih od drugih materijala (primjerice polikarbonata - označen plavom bojom, aluminija - označen sivom bojom).

Da bismo provjerili rezultate dobivene genetičkim algoritmom, tri različite barijere (predgotovljena betonska barijera, akustički najbolja zvučna barijera i ukupno najbolja barijera) smještene su na istom mjestu, blizu autoceste koja prolazi kroz grad, u svrhu vizualizacije (slika 7.).



Slika 7. Lokacija zvučne barijere postavljene uz autocestu koja prolazi kroz grad

Ideja je usporediti parametar akustičke učinkovitosti barijere L_{xi} i ukupnu ocjenu barijere E_{xi} (koja također uzima u obzir i parametar troška zvučne barijere) za sve tri barijere koje su prikazane u tablicama 4. i 5.

Tablica 4. Parametar akustičke učinkovitosti zvučne barijere

Udaljenost od barijere [m]	10	20	30
Predgotovljena betonska zvučna barijera L [dB]	71	67	67
Akustički najbolja zvučna barijera L [dB]	67	62	60
Ukupno najbolja zvučna barijera L [dB]	67	63	61

Ako se uzme u obzir samo parametar za akustičku učinkovitost barijere, postoji značajno poboljšanje za akustički najbolje ocijenjenu i ukupno najbolju barijeru u usporedbi s predgotovljenom betonskom barijerom. S druge strane, razlika između akustički najbolje ocijenjene barijere i ukupno najbolje barijere nije drastična (vidi tablicu 4.). Uspoređujući ukupnu ocjenu barijera $E_{x,r}$ razlika je značajna za najbolju barijeru, a troškovi se smanjuju za 55 %. Za akustički najbolju zvučnu barijeru te su uštede nešto niže (20 %), ali su i dalje značajne (i prikazane u tablici 5.).

Tablica 5. Normirana ukupna ocjena zvučnih barijera u odnosu na referentnu zvučnu barijeru (predgotovljena betonska zvučna barijera)

	E_{ref}	E_{xi}	E_{xi} / E_{ref}
Predgotovljena betonska zvučna barijera	401093	401093	1,00
Akustički najbolja zvučna barijera	-	320749	0,80
Ukupno najbolja zvučna barijera	-	181138	0,45

Pri postavljanju zvučne barijere u svrhu smanjenja buke prometa u urbanim područjima te uzimajući u obzir i akustičke i ekonomske značajke zvučnih barijera, mogu se ostvariti značajne uštede. Te uštede mogu se ostvariti analizirajući parametar akustičke učinkovitosti barijere. Ovakva vrsta proračuna može vrlo lako postati učinkovito sredstvo za projektiranje, planiranje i proračun zvučnih barijera čiji je konačni cilj smanjenje buke prometa u stambenim područjima.

5. Zaključak

Ovaj rad se bavi proučavanjem optimizacije zvučnih barijera metodom rubnih elemenata kao numeričkim alatom, te za optimizaciju koristi genetički algoritam. Postupak optimizacije provodi se kako bi se dobila optimalna barijera po akustičkim, tehnološkim i ekonomskim značajkama.

Korišteni modeli zvučnih barijera su sastavljeni od modula, definiranih od pet različitih oblika i šest različitih materijala.

Važno je naglasiti da je pri odlučivanju o osnovnim odabranim oblicima modula za sastavljanje barijere glavni argument bila jednostavnost izrade određenog oblika. Njihov raspored postavljanja je mijenjan genetičkim algoritmom kako bi se optimizirale njihove akustičke i ekonomske značajke.

Nadalje, uzimajući u obzir samo akustičke aspekte, najbolji postignuti parametar smanjenja razine buke zbog samog postavljanja zvučne barijere bio je oko 3 dB iznad parametra smanjenja razine buke referentne predgotovljene betonske barijere, a uzimajući u obzir ekonomske parametre, i dalje je postignuto prosječno povećanje parametra smanjenja razine buke zbog samog postavljanja zvučne barijere od 2 dB. Rezultati su pokazali da je veličina populacije najvažniji parametar za optimizaciju algoritma. Poboljšanje parametra smanjenja razine buke zbog samog postavljanja zvučne barijere ovisi i o lokaciji izvora i prijarnika u odnosu na barijeru i naravno ovisi o frekvenciji. Buduća istraživanja bit će usmjerena na optimiziranje daljnjih kombinacija oblika i materijala, uzimajući u obzir položaj izvora buke i zaštićenih područja od buke. Također mora se naglasiti da je težište ovog rada na projektiranju i određivanju akustičkih i ekonomskih parametara za zaštitu od buke. Imajući to na umu težište budućega rada može biti detaljna analiza troškova održavanja barijera, što je svakako najvažniji parametar kod donošenja odluge o tipu barijere.

U ovom se radu također predlaže uvođenje novog parametra za procjenu buke, koji je nazvan parametar troška zvučne barijere. Opsežno istraživanje je pokazalo da je to jedan od najvažnijih odlučujućih čimbenika pri odabiru i stvaranju zvučne barijere.

Danas, kada je buka, naročito ona od prometa, sve veći problem koji izravno utječe na kvalitetu života, i to ne samo u urbanim sredinama, potrebno je primijeniti i razviti sve moguće alate za minimiziranje te buke. Jedan od najučinkovitijih instrumenata za smanjenje buke su zvučne barijere. Pomoću genetičkog algoritma i parametra troška zvučne barijere lako je stvoriti, razviti i konstruirati odgovarajuću zvučnu barijeru, imajući na umu i poštujući izvorni proračun. Stvaranje, razvoj i proizvodnja tih vrsta barijera za zaštitu od buke u kombinaciji s oblikovanjem ugodnih akustičkih okruženja (zvučnih okolina) mogu biti glavni alati za smanjenje buke u "pametnim" gradovima.

LITERATURA

- [1] Sviben, Z., Toš, Z.: Some aspects of pollution and noise in Zagreb city traffic preliminary communication, *Promet - Traffic & Transportation*, 13 (2001), pp. 115-118.
- [2] Ishizuka, T., Fujiwara, F.: Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions, *Applied Acoustics*, 65 (2004), pp. 125-141, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2003.08.006>
- [3] Grubeša, S., Domitrović, H., Jambrošić, K.: Performance of traffic noise barriers with varying cross-section, *Promet - Traffic & Transportation*, 23 (2011), pp. 161-168.
- [4] Hothersall, D.C., Chandler-Wilde, S.N., Hajmirzae, M.N.: Efficiency of single noise barriers, *Journal of Sound and Vibration*, 146 (1991), pp. 303-322, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90765-C](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90765-C)
- [5] Duhamel, D.: Shape optimization of noise barriers using genetic algorithms, *Journal of Sound and Vibration*, 297 (2006), pp. 432-443, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.04.004>
- [6] Duhning, M.B., Jensen, J.S., Sigmund, O.: Acoustic design by topology optimization, *Journal of Sound and Vibration*, 317 (2008), pp. 557-575, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.042>

- [7] Toledo, R.E., Aznárez, J.J., Greiner, D., Maeso, O.: Shape design optimization of road acoustic barriers featuring top-edge devices by using genetic algorithms and boundary elements, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 63 (2016), pp. 49-60, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.10.011>
- [8] Liu, C., Chen, L., Zhao, W., Chen, H.: Shape optimization of sound barrier using an isogeometric fast multipole boundary element method in two dimensions, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 85 (2017), pp. 142-157, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.09.009>
- [9] Grubeša, S., Jambrošić, K., Domitrović, H.: Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms, *Applied Acoustics*, 73 (2012) 11, pp. 1129-1137.
- [10] HRN EN 1793-2:2018 Road traffic noise reducing devices, Test method for determining the acoustic performance, Intrinsic characteristics of airborne sound insulation under diffuse sound field conditions
- [11] HRN EN 1793-1:2017 Road traffic noise reducing devices, Test method for determining the acoustic performance, Intrinsic characteristics of sound absorption under diffuse sound field conditions
- [12] HRN EN 1793-4:2015 Road traffic noise reducing devices, Test method for determining the acoustic performance. Intrinsic characteristics, In situ values of sound diffraction
- [13] HRN EN 1793-5:2016
- [14] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V.: *Fundamental of acoustics*, New York John Wiley and Sons, 2000.
- [15] Chen, W., Min, H., Qiu, X.: Noise reduction mechanisms of active noise barriers, *Noise Control Engineering Journal*, 61 (2013) 2, pp. 120-126.
- [16] Daltrop, S., Hodgson, M., Wakefield, C.: Field investigation of the effects of vegetation on the performance of roadside noise barriers, *Noise Control Engineering Journal*, 60 (2012) 2, pp. 202-208.
- [17] Steele, C.: A critical review of some traffic noise prediction models, *Applied Acoustics*, 62 (2001) 3, pp. 271-287.
- [18] Seznec, R.: Diffraction of sound around Barriers: Use of the boundary elements technique, *Journal of Sound and Vibration*, 73 (1980), pp. 195-209, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(80\)90689-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(80)90689-6)
- [19] Finch, D.R.: *Introduction to acoustics*, New York, Prentice Hall, 2005.
- [20] Mc Laughlin, P.: *Outdoor sound propagation and the boundary element method*, MSc dissertation, University of Reading, 2005.
- [21] Juhl, P., Jacobsen, F.: *Radiation of sound*, lecture notes, Acoustic technology, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, 2011.
- [22] Chandler-Wilde, S.N., Hothersall, D.C.: Efficient calculation of the green function for acoustic propagation above a homogeneous impedance plane, *Journal of Sound and Vibrations*, 180 (1995), pp. 705-724, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1995.0110>
- [23] Duhamel, D.: Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier, *Journal of Sound and Vibrations*, 97 (1996), pp. 547-571, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0548>
- [24] Wu, T.W.: *Boundary Element Acoustics*, Southampton, WIT Press, 2000.
- [25] Grubeša, S.: *Optimizacija parametara bukobrana numeričkim postupcima*, Doktorska disertacija, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [26] Morse, M.P.: *Vibration and sound*. American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1981.
- [27] EN 1793-3: 1997 Road Traffic Noise Reducing Devices - Test Method for Determining the Acoustics Performance - Normalized Traffic Noise Spectrum.
- [28] Sviben, Z., Toš, Z., Borković, M.: Methods for an acceptable traffic noise level design, *Promet - Traffic & Transportation*, 16 (2004), pp. 207-210.
- [29] Štrumberger, N., Viduka, K.: Traffic impact on environment pollution in the first decade of the 3rd millennium, *Promet - Traffic & Transportation*, 13 (2001), pp. 119-124.
- [30] Baulaca, M., Guilloub, A., Defrancea, J., Jeana, P.A.H.: Calculations of low height noise barriers efficiency by using Boundary Element Method and optimisation algorithms, *Conference Paper in The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 223-227, 2008, <https://doi.org/10.1121/1.2932667>
- [31] Nilsson, M., Bengtsson, J., Klæboe, R.: *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*, Taylor & Francis Group, 2014, <https://doi.org/10.1201/b17606>
- [32] Jonasson, H.G.: Acoustical Source Modelling of Road Vehicles. *Acta Acustica united with Acustica*, 93 (2007), pp. 173 - 184.
- [33] Delany, M., Bazley, E.N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics*, 3 (1970), pp. 105-116, [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)