

Primljen / Received: 29.9.2021.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2022.

Prihvaćen / Accepted: 31.1.2022.

Dostupno online / Available online: 10.2.2022.

Vrednovanje neakustičnih svojstava zidova za zaštitu od prometne buke

Autori:



Doc.dr.sc. **Maja Ahac**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
maja.ahac@grad.unizg.hr



Doc.dr.sc. **Saša Ahac**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
sasa.ahac@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
stjepan.lakusic@grad.unizg.hr

Pregledni rad

Maja Ahac, Saša Ahac, Stjepan Lakušić

Vrednovanje neakustičnih svojstava zidova za zaštitu od prometne buke

Cilj prikazanog istraživanja bio je smanjiti nesigurnost u odabiru materijala panela ispune zidova za zaštitu od buke i time unaprijediti proces upravljanja prometnom bukom u Republici Hrvatskoj. Radi unaprjeđenja postupka odabira materijala panela ispune pri planiranju i projektiranju zidova za zaštitu od prometne buke, izvršena je evaluacija betonskih, metalnih, drvenih i prozirnih panela. Istraživanje svojstava panela izrađenih od ta četiri osnovna materijala provedeno je uz pretpostavku da su akustični zahtjevi na konstrukciju zida potpuno zadovoljeni. Tako je istraživanje moglo biti usmjereno na šest neakustičnih svojstava panela (kriterija koja su inženjeri građevinarstva dužni razmatrati): mehaničku otpornost i stabilnost, trajanje, troškove građenja, održavanja i zamjene, troškove uporabljivosti i reciklabilnost. Analiza navedenih svojstava provedena je nad prikupljenim javno dostupnim podacima iz sekundarnih izvora. Podaci su sistematizirani te podvrgnuti više kriterijskoj analizi koja je pokazala da betonski paneli imaju najveću (ponderiranu i neponderiranu) srednju ocjenu.

Ključne riječi:

zaštita od buke, mjere zaštite, planiranje, projektiranje, materijal panela zida, višekriterijska analiza

Subject review

Maja Ahac, Saša Ahac, Stjepan Lakušić

Evaluation of non-acoustic properties of traffic noise walls

The presented research aims to reduce the uncertainty in the selection of noise wall panel materials, and thus to improve the traffic noise management process in the Republic of Croatia. An evaluation of concrete, metal, wood, and transparent panels is performed to improve the panel material selection procedure in the planning and design of traffic noise walls. Properties of panels made of these four basic materials are studied under the assumption that the acoustic requirements relating to the wall structure have been fully met. Thus, the research focuses on six non-acoustic properties of panels (criteria that must be considered by civil engineers): mechanical resistance and stability, service life, construction, maintenance, and replacement costs, service life costs, and recyclability. These properties are analysed using the publicly available data from secondary sources. The data are systematized and subjected to a multicriteria analysis, which has revealed that concrete panels have the highest (weighted and unweighted) mean score.

Key words:

noise protection, mitigation measures, planning, design, panel material, multicriteria analysis

1. Uvod

Prema podacima Europske agencije za okoliš (EEA), zagađenje bukom u Europi predstavlja velik zdravstveni i ekološki problem [1], koji uzrokuje poremećaje spavanja [2] i učenja [3-6], povišen krvni tlak i ishemijsku bolest srca [7-9], a ponajviše ometa komunikaciju i misaone procese [10,11]. Prema europskoj Direktivi o procjeni i upravljanju bukom iz okoliša 2002/49/EK (END), države članice Europske unije (EU) moraju utvrditi izloženost stanovništva prekomjernim razinama buke glavnih prometnica i industrije temeljem strateških karata buke [12]. Na osnovi strateških karata buke pripremaju se, usvajaju i objavljuju akcijski planovi za upravljanje bukom iz okoliša i njezinim štetnim učincima, koji uključuju mjere zaštite od buke propisane na državnoj razini [12, 13]. Prema posljednjim podacima Europske agencije za okoliš, buka cestovnog i željezničkog prometa još uvijek je glavni izvor prometne buke, kako u gradskim, tako i u izvangradskim područjima. Približno 125 milijuna stanovnika EU izloženo je ukupnim razinama buke cestovnog prometa većim od 55 dB(A), a dodatnih 12 milijuna izloženo je ukupnim razinama buke željezničkog prometa većim od 65 dB(A) [14]. Iako je cestovni promet najznačajniji izvor buke iz okoliša u Europi (u odnosu na željeznički promet, buci cestovnog prometa izloženo je deset puta više ljudi), razine buke koju proizvodi željeznički promet često su više.

U proteklih nekoliko godina akcijski su planovi težili podizanju svijesti o buci kao problemu okoliša te promoviranju primjene mjera za smanjenje buke na mjestu njezina nastanka. U cestovnom je prometu riječ o promociji korištenja električnih vozila, vozila s tišim motorima i pneumaticima, zamjeni normalne kolničke konstrukcije tihom kolničkom konstrukcijom i provođenju "nepopularnih" mjera upravljanja prometom kroz ograničenja brzine i pristupa infrastrukturi. Mjere za smanjenje emisije buke željezničkog prometa usredotočene su na vozilo (održavanje glatkih kotača, ugradnja tiših disk-kočnica) i kolosijek (održavanje glatkih tračnica, ugradnja elastičnog pričvrstnog pribora, pragova s elastičnim podloškama ili od kompozitnih materijala, opločenje kolosijeka apsorbirajućim pločama, elastično oblaganje vrata tračnice) [15]. Unatoč značajnom napretku u učinkovitosti i primjeni mjera za smanjenje buke cestovnog i željezničkog prometa na izvoru, više od 25 % novoplaniranih mjera odnosi se na smanjenje propagacije zvučnih valova [14], najčešće kroz izgradnju barijera za zaštitu od buke između izvora i prijamnika.

Primjena barijera za zaštitu od buke započela je prije više od 50 godina, podjednako u SAD-u i u Europi [16, 17]. Izraz "barijera za zaštitu od buke" ili "bukobran" obuhvaća različite građevine čija je namjena smanjenje buke, a uobičajeni tipovi bukobrana uz prometnice su zemljani nasipi, zidovi za zaštitu od buke i njihova kombinacija [18]. Istraživanje opisano u ovom radu usmjereno je na zidove za zaštitu od buke. To su vitke, linijske građevine najčešće primjenjivane na postojećim prometnicama [19] na kojima je prostor za smještaj barijera ograničen. Zidovi se sastoje od panela horizontalno slaganih između čeličnih ili

betonskih stupova. Stupovi su H-profila, usidreni na postojeće konstrukcije (zidove, parapete) ili ugrađeni u vlastite temelje (pilote, trakaste ili temelje samce).

Pri odabiru materijala panela na raspolaganju je široka paleta proizvoda, koji se dijele prema akustičnim svojstvima (na apsorbirajuće i reflektirajuće), prema prozirnosti (na prozirne i neprozirne) te prema glavnom materijalu izvedbe. Za potrebe ovog rada paneli su sistematizirani u četiri grupe prema glavnom materijalu: (1) betonski, (2) metalni, (3) drveni i (4) prozirni materijali (npr. polimetakrilat). Izbor materijala panela zidova za zaštitu od buke pod utjecajem je niza čimbenika - osim akustične učinkovitosti određenog tipa panela, odabir materijala ovisi i o fizičkim dimenzijama zida, primjenjivosti panela na lokaciji i lokalnim okolišnim uvjetima, estetskim zahtjevima uključujući lokalna arhitektonska razmatranja, percepciju i prihvaćanje konstrukcije od strane javnosti, prometne sigurnosti (tj. problema preglednosti u zonama križanja) te cijene [20, 21].

Kod odabira materijala panela preporučljivo je analizirati ne samo akustična već i tehnološka i ekonomska svojstva zidova radi osiguranja optimalne dugoročne zaštite [22, 23]. Unatoč značajnom iskustvu u primjeni zidova za zaštitu od buke, pri izboru materijala panela ispune projektanti još uvijek nailaze na niz nepoznanica povezanih s ponašanjem zidova tijekom uporabe [24], uključujući njihovu stabilnost, trajnost, vatrootpornost, otpornost na udar te atmosferske utjecaje. Osnovna nedoumica je kako će neizbježna degradacija panela utjecati na učinkovitost i dugoročnu održivost zida za zaštitu od buke na određenim lokacijama i pri određenim uvjetima. Na ovo smo pitanje pokušali dati odgovor u prethodnim istraživanjima [25], u kojima smo rezultate provedene multikriterijske analize javno dostupnih metapodataka o betonskim, metalnim i drvenim panelima zidova, kvantificirali u ocjenu njihovih akustičnih i tehničkih performansi, te dugoročne održivosti i sigurnosti. Istraživanja su provedena radi:

- smanjenja nesigurnosti pri odabiru materijala panela zidova za zaštitu od prometne buke u procesu njihovog projektiranja
- podupiranja procesa upravljanja mjerama zaštite od prometne buke prebacivanjem težišta sa cijene nabave panela (kao glavnog kriterija odabira materijala panela u zemljama jugoistočne Europe) na njihovu trajnost i održivost.

U ovom je radu prikazan nastavak istraživanja procesa zaštite od buke na cestovnoj i željezničkoj mreži Republike Hrvatske (RH) i svojstava betonskih, metalnih, drvenih i prozirnih panela zidova za zaštitu od buke, koji su danas u primjeni. Postupak evaluacije panela proveden je na temelju javno dostupnih podataka iz sekundarnih izvora, uz pretpostavku da su osnovni akustični zahtjevi na konstrukciju zida potpuno zadovoljeni. Osnovni cilj istraživanja je vrednovati panele s obzirom na njihova neakustična svojstva: mehaničku otpornost i stabilnost, najkraće trajanje, prosječne troškove građenja, održavanja i zamjene, troškove uporabljivosti, kao i potencijalne reciklabilnosti panela na kraju uporabe. Sistematizacija rezultata

inozemnih istraživanja te rezultati vlastite analize i vrednovanja neakustičnih svojstava panela doprinijet će usvajanju dodatnih orijentira - trajnosti i održivosti panela - u proces planiranja i projektiranja zidova za zaštitu od prometne buke duž cestovne i željezničke mreže.

2. Zaštita od buke cestovnog i željezničkog prometa u RH

Buka okoliša u Republici Hrvatskoj regulirana je Zakonom o zaštiti od buke (Narodne novine, 30/2009, 55/2013, 153/2013, 41/2016, 114/2018 i 14/2021) [26] koji transponira END. Tim se zakonom utvrđuju mjere s ciljem izbjegavanja, sprječavanja ili smanjivanja štetnih učinaka na zdravlje ljudi koje uzrokuje buka iz okoliša, uključujući i smetnje bukom. Mjere se provode na način da se utvrđuje izloženost buci iz okoliša, i to izradom strateških karata buke na temelju metoda ocjenjivanja buke, osiguravanjem javnosti podataka o buci te naposljetku izradom i donošenjem akcijskih planova temeljenih na strateškim kartama buke.

Strateške karte buke izrađuju se pomoću računskih metoda proračuna emisije i širenja buke od poznatih izvora buke u geografskom prostoru - cestovnog prometa, željezničkog prometa, zračnog prometa te industrijskih pogona i postrojenja. Strateške karte buke čine stručnu podlogu za izradu prostornih planova te su koristan alat upravljanja bukom iz okoliša, omogućavaju izradu akcijskih planova, učinkovitije prostorno planiranje, planiranje zaštite postojećih prostora od izvora buke te provedbu akustičnog planiranja, kao i ocjenjivanja izloženosti stanovništva prekomjernim razinama buke. Strateške karte buke usklađuju se trajno s izmjenama u prostoru, a obvezno se obnavljaju odnosno izrađuju svakih pet godina. Prikupljanje i vođenje evidencije o izrađenim strateškim kartama buke provodi Ministarstvo zdravstva te ih dostavlja Europskoj komisiji putem EIONET sustava pri Europskoj agenciji za zaštitu okoliša (EEA).

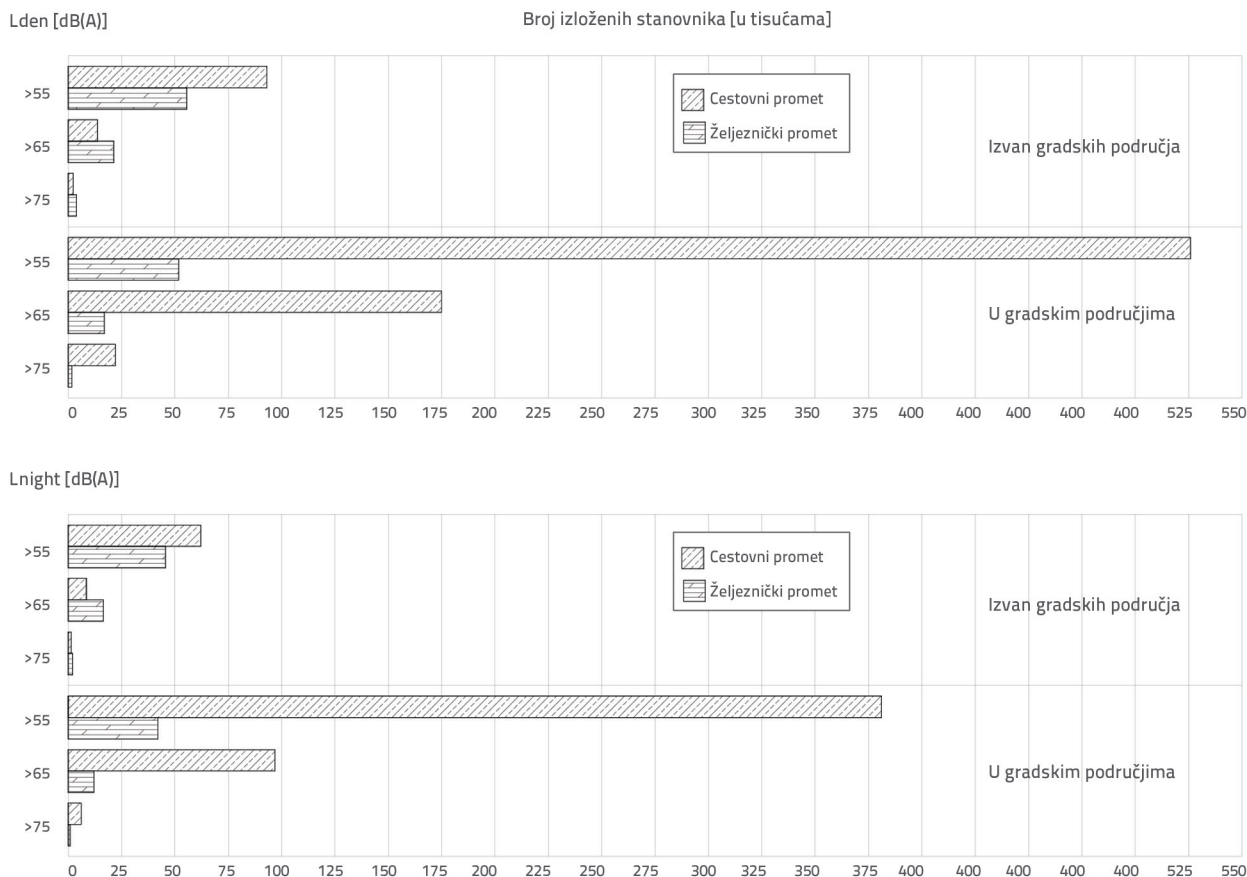
Cilj je akcijskih planova zaštite od buke taj da se na temelju strateških karata buke planiraju načini kojima će se smanjiti izloženost stanovništva prekomjernoj buci, definirati dinamika provođenja mjera zaštite od buke te procijeniti učinak planiranih mjera. Zakon o zaštiti od buke [26] propisuje da se zaštita od buke provodi danonočno, pri čemu "dan" traje 12 sati, od 7 do 19 sati, "večer" traje 4 sata, od 19 do 23 sata, a "noć" traje 8 sati, od 23 do 7 sati. Prema Pravilniku [27], za izradu strateških karata buke koriste se indikator buke (akustična veličina za opis buke iz okoliša koja je povezana sa štetnim učincima buke) za razdoblje "dan-večer-noć" L_{den} i indikator za razdoblje "noć" L_{night} izraženi u dB(A). Prema END, gornja vrijednost L_{den} za procjenu smetnji postavljena je na 55 dB(A), a gornja vrijednost L_{night} za procjenu poremećaja spavanja iznosi 50 dB(A). Dodatno, za akustično planiranje i određivanje područja zaštite od buke, uz spomenute indikatore primjenjuju se i indikator buke za razdoblje "dan" L_{day} i indikator buke za razdoblje "večer" $L_{evening}$.

Zakon o zaštiti od buke određuje i obveznike izrade strateških karata buke, kao i obveznike izrade i donošenja akcijskih planova koji su izrađeni radi upravljanja bukom iz okoliša i njezinim štetnim učincima, uključujući i mjere zaštite od buke. Tako su strateške karte buke i akcijske planove obvezni izraditi gradovi koji imaju više od 100.000 stanovnika te vlasnici tj. koncesionari industrijskih područja, glavnih cesta s više od 3.000.000 prolazaka vozila godišnje, glavnih željezničkih pruga s više od 30.000 prolazaka vlakova godišnje i glavnih zračnih luka s više od 50.000 operacija (uzlijetanja ili slijetanja) godišnje [26]. Na osnovi obveze iz Zakona o zaštiti od buke, prema dostupnim podacima u 2016. godini, izrađene su strateške karte buke te akcijski planovi za:

- grad Zagreb (ZG), grad Split (ST), grad Rijeku (RI) i grad Osijek (OS)
- dionice glavnih cesta kojima upravljaju Hrvatske autoceste (HAC) za područja autocesta A1, A3, A4 i A11, Autocesta Rijeka-Zagreb (ARZ), od 1. siječnja 2020. pripojene HAC-u, za područja autoceste A6, Autocesta Zagreb-Macelj (AZM) za područja autoceste A2, Bina-Istra za područja autocesta A8 i A9, Hrvatske ceste (HC) te županijske ceste Istarske, Primorsko-goranske i Splitsko-dalmatinske županije
- dionice glavnih željezničkih pruga kojima upravlja HŽ Infrastruktura (HŽI) na područjima pruga od važnosti za međunarodni promet M101 Državna granica - Savski Marof - Zagreb Glavni kolodvor i M102 Zagreb Glavni kolodvor - Dugo Selo.

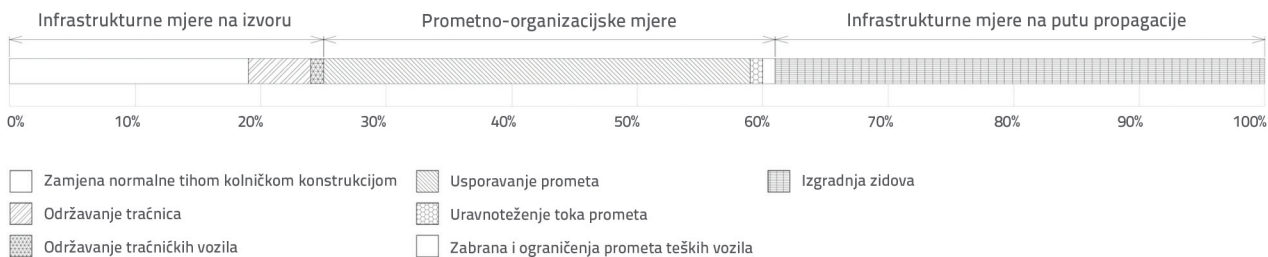
Izrađene strateške karte buke i akcijski planovi prema Zakonu o zaštiti od buke sastavni su dio Informacijskog sustava zaštite okoliša (ISZO RH), za čiju je uspostavu, razvijanje, koordiniranje i održavanje zadužena Hrvatska agencija za okoliš i prirodu na osnovi Zakona o zaštiti okoliša (Narodne novine, 80/13) i Uredbi o informacijskom sustavu zaštite okoliša (Narodne novine, 68/08). Informacijski sustav strateških karata buke i akcijskih planova, koji je Agencija za okoliš i prirodu izradila u suradnji s Ministarstvom zdravstva javno je dostupan portal (buka-portal.azo.hr).

Rezultati analize podataka o broju stanovnika izloženih prekomjernim razinama buke, koji su preuzeti s portala u svibnju 2021. godine i prikazani dijagramom na slici 1., pokazuju da učestalost izloženosti stanovništva Hrvatske s obzirom na izvor buke (cestovni ili željeznički promet) i lokaciju izvora (izvan gradskog područja ili u tom području) ima jednake trendove kao u čitavoj Europskoj uniji. Glavni izvor smetnji i poremećaja spavanja i u Republici Hrvatskoj je cestovni promet, a problem izloženosti buci ovog vida prometa znatno je izraženiji u gradskim područjima. Broj stanovnika izloženih prekomjernim razinama buke cestovnog prometa je također otprilike deset puta veći od broja stanovnika izloženih prekomjernim razinama buke željezničkog prometa. Izloženost prekomjernim razinama buke željezničkog prometa je podjednaka izvan i unutar gradskih područja, dakle neovisna je o lokaciji pruge. Izvan gradskih područja i za vrijednosti indikatora buke veće od 65 dB(A) problem buke željezničkog prometa izraženiji je u odnosu na buku cestovnog prometa.

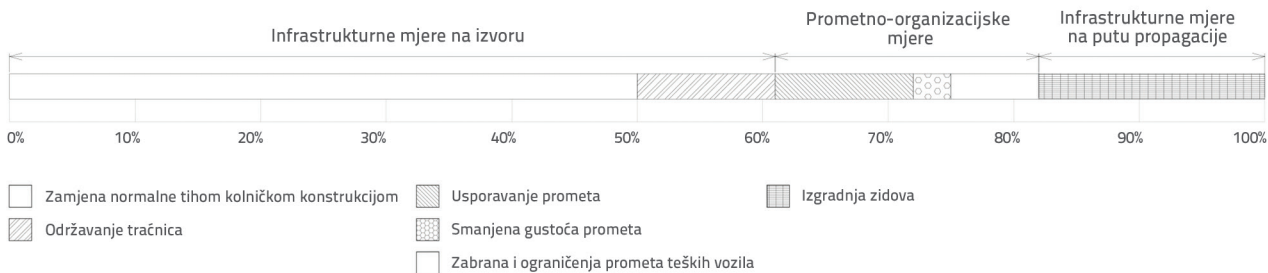


Slika 1. Broj stanovnika izloženih prekomjernim razinama buke cestovnog i željezničkog prometa prema rezultatima strateških karata buke

Učestalost korištene mjere upravljanja prometnom bukom izvan gradskih područja (Akcijski plan: HAC, HC, AZM, HŽI)



Učestalost korištene mjere upravljanja prometnom bukom u gradskim područjima (Akcijski plan: ZG, RI, OS)



Slika 2. Učestalost Akcijskim planovima predviđenih mjera upravljanja prometnom bukom na cestovnoj i željezničkoj mreži RH

Analizom javno dostupnih Akcijskih planova upravljanja bukom izrađenih za četiri koncesionara glavnih cesta i pruga (HAC, AZM, HC i HŽI) te tri grada (ZG, RI, OS) utvrđena je učestalost planiranih mjera zaštite od buke cestovnog i željezničkog prometa na područjima na kojima su strateške karte pokazale potrebu za upravljanjem bukom (slika 2.). U gradskim područjima, zbog često nedostatnog prostora za izvedbu barijera za zaštitu od buke, kao najučestalija mjera (predviđena na 50 % identificiranih područja) planirana je zamjena normalne kolničke konstrukcije tihom kolničkom konstrukcijom. Preostale mjere koje tretiraju izvor buke (održavanje glatke i ravne vozne površine, upravljanje prometom) predviđene su na ukupno 32 % područja, a izvedba zidova za zaštitu od buke predviđena je na nezanemarljivih 18 % područja upravljanja bukom. Izvan gradskih područja Akcijskim planovima predviđeni koncept zaštite bitno se mijenja. Tako je na izvangradskim područjima upravljanja bukom duž cestovnih i željezničkih prometnica čak u 39 % slučajeva predviđena izgradnja zaštitnih zidova.

U sljedećem razdoblju, što kroz Mehanizam za oporavak i otpornost, što kroz novi operativni program, predviđena su snažna investicijska ulaganja koja će u cijelosti modernizirati cjelokupnu prometnu infrastrukturu u RH. Stoga se, osim planirane provedbe mjera za smanjenje postojećih razina prometne buke predviđenih akcijskim planovima, može očekivati intenzivan porast potrebe za zaštitom stanovništva uz cestovne i željezničke prometnice, posebice izvan područja četiriju najvećih gradova. Razlog tomu je sljedeći. Prema Pravilniku o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave (Narodne novine, 145/2004) [28], koji je u primjeni bio do kraja prosinca 2021. godine, odnosno do stupanja na snagu Pravilnika o najvišim dopuštenim razinama buke s obzirom na vrstu izvora buke, vrijeme i mjesto nastanka (Narodne novine, 143/2021) [29] nove građevine prometne infrastrukture (željezničke pruge, državne ceste i županijske ceste u naseljima) koje dodiruju, odnosno presijecaju zone (1) namijenjene oporavku i liječenju, (2) isključivo stanovanju i boravku, (3) mješovite, pretežito stambene namjene, (4) mješovite, pretežito poslovne namjene sa stanovanjem - treba projektirati i graditi na način da razina buke na granici koridora planirane prometnice ne prelazi ekvivalentnu razinu buke od 65 dB(A) danju, odnosno 50 dB(A) noću. Dodatno, u slučaju rekonstrukcije ili adaptacije građevina prometne infrastrukture koje stvaraju buku iznad dopuštene razine, građevine prometne infrastrukture treba projektirati, odnosno rekonstruirati ili adaptirati na način da se razina buke na granici koridora prometnice smanji na dopuštenu razinu 65 dB(A) danju, odnosno 50 dB(A) noću. Prema Pravilniku iz 2021. godine [29], postupci pokrenuti na temelju Pravilnika iz 2004. godine [28] dovršit će se po njegovim odredbama. Nadalje, rješenja o provedenim mjerama zaštite od buke koja su izdana na temelju mjerenja buke prema Pravilniku [28] ostaju na snazi do promjene izvora zvuka navedenih u rješenju o provedenim mjerama zaštite od buke. U smislu provedbe zaštite od buke za cestovnu i željezničku infrastrukturu, izmjene koje donosi novi Pravilnik iz 2021. godine uključuju sljedeće [29].

- Uvedene su najviše dopuštene ocjenske razine buke za razdoblje "večer", koje su jednake vrijednostima za razdoblje "dan" za sve zone osim zone 1, gdje je ta vrijednost smanjena na 45 dB(A).
- Uvedene su najviše dopuštene cjelodnevne razine buke L_{den} za zone 1-5, koje iznose redom 50, 56, 57, 66 i 67 dB(A).
- Dopunjena je definicija zona najviše dopuštene ocjenske razine buke. Definicija zone 1 dopunjena je sljedećim područjima: nacionalnim parkovima, posebnim rezervatima, parkovima prirode, regionalnim parkovima, spomenicima prirode, značajnim krajobrazima, park-šumama, spomenicima parkovne arhitekture, tihim područjima izvan naseljenog područja. Dosadašnja zona 5 (zona gospodarske namjene - proizvodnja, industrija, skladišta, servisi [28]) podijeljena je na zone 5 i 6 te dopunjena sljedećim područjima. Zona 5 uključuje zone gospodarske, pretežito zanatske, namjene, zatim zone poslovne pretežito uslužne, trgovačke te trgovačke ili komunalno-servisne namjene, zone ugostiteljsko turističke namjene, zone sportsko-rekreacijske namjene na kopnu, moru i rijekama te zone luka nautičkog turizma. Zona 6 uključuje zone gospodarske namjene pretežito proizvodne industrijske djelatnosti, zone morskih luka državnog značaja na bitne djelatnosti, zone morskih luka osobito međunarodnog gospodarskog značaja, zone morskih luka županijskog značaja te zone riječnih luka od državnog i županijskog značaja. Pritom najviše dopuštene ocjenske razine buke (koja je definirana kao ukupna razina buke imisije od svih postojećih i planiranih izvora buke zajedno) za zonu 5 iznose 65 dB(A) za dnevno i večernje razdoblje te 55 dB(A) za noćno razdoblje. Za zonu 6 vrijedi da razina buke koja potječe od izvora buke unutar ove zone na granici s najbližom zonom 1, 2, 3 ili 4 u kojoj se očekuju najviše imisijske razine buke, buka ne smije prelaziti dopuštene razine buke na granici zone 1, 2, 3 ili 4.
- Za novoizgrađene infrastrukturne građevine koje dodiruju, odnosno presijecaju zone 1-5 definirane su najviše dopuštene cjelodnevne razine buke L_{den} na granici planiranog koridora infrastrukturne građevine od 66 dB(A).
- Za područja u kojima je postojeća razina rezidualne buke jednaka ili viša od dopuštene ocjenske razine buke, imisija buke koja bi nastala od novoprojektiranih, izgrađenih ili rekonstruiranih odnosno adaptiranih građevina s pripadnim izvorima buke ne smije prelaziti dopuštene razine umanjene za 5 dB(A), a područja u kojima je postojeća razina rezidualne buke niža od dopuštene ocjenske razine buke, imisija buke koja bi nastala od novoprojektiranih izgrađenih, rekonstruiranih ili adaptiranih građevina s pripadnim izvorima buke ne smije povećati postojeće razine buke za više od 1 dB(A).

Na temelju uočenog trenda u odabiru mjera zaštite od prometne buke u RH može se zaključiti da će Pravilnicima [28, 29] propisane restrikcije u razinama buke na granici koridora novoizgrađenih i rekonstruiranih cestovnih i tračničkih prometnica zasigurno zahtijevati intenzivniju primjenu

zidova za zaštitu od buke. Iako ih se još uvijek promatra kao prometnu opremu, činjenica je da zidovi za zaštitu od buke zahtijevaju jednake količine resursa te imaju jednak učinak na izgrađeni okoliš kao i druge velike građevine. Trebat će se zbog toga, pri planiranju i projektiranju zidova, usmjeriti velika pažnja na odabir materijala panela ispune. Prema [30], u južnim državama članicama EU, trošak izvedbe je obično odlučujući faktor u projektiranju zidova za zaštitu od buke, tj. prednost se najčešće daje kriteriju najniže cijene panela. To nije iznenađujuće, budući da je prosječna cijena ugradnje (montaže) kvadratnog metra panela najjeftinije varijante zida - zida sa drvenim panelima - oko 120 eura [31]. Ona dovodi do ukupnog troška od približno 2 milijuna eura za zidove izvedene s obje strane prometnice u ukupnoj duljini od četiri kilometra i s prosječnom visinom od četiri metra. S druge strane,

inozemna iskustva pokazuju da je radi dugoročne održivosti ove mjere za zaštitu od buke potrebno odabrati što trajnije panele ispune. Može se reći da ako su ispunjeni osnovni uvjeti koji osiguravaju akustičnu učinkovitost zida u zaštiti od buke – to jest zid je dovoljno visok da prekine liniju pogleda na izvor buke, a tražena gustoća površine panela je akustično zadovoljavajuća te u njemu ili između njih nema otvora koji bi propuštali buku [32] – tada je racionalnu odluku o odabiru materijala panela potrebno donijeti kroz kontrolu troškova ne samo izgradnje, već i održavanja te uklanjanja zidova [24]. Radi toga je u fazi planiranja alokacije sredstava i projektiranja ključno da upravitelji infrastrukture i projektanti raspoložu svim relevantnim informacijama o karakteristikama panela za izgradnju zidova na temelju kojih će biti u stanju donijeti dugoročno zadovoljavajuću odluku o njihovom odabiru.

CESTOVNI SEKTOR CEN/TC 226/WG 6 Barijere za zaštitu od buke s cesta		ŽELJEZNIČKI SEKTOR CEN/TC 256/SC 1/WG 40 Zvučne zapreke i odgovarajući uređaji koji djeluju na rasprostiranje zvuka zrakom	
Specifikacije	EN 14388:2015	Tehničke specifikacije za interoperabilnost (TSI) podsustava „željeznička vozila – buka“	UREDBA KOMISIJE (EU) br. 1304/2014
ISPITNE METODE ZA ODREĐIVANJE AKUSTIČNIH SVOJSTAVA			
Unutarnja svojstva zvučne apsorpcije u uvjetima difuznog zvučnog polja	EN 1793-1:2017	Unutarnja svojstva - Apsorpcija zvuka u laboratorijskim uvjetima difuznog zvučnog polja	EN 16272-1:2012
Unutarnja svojstva izolacije uzdužnog zvuka u uvjetima difuznog zvučnog polja	EN 1793-2:2018	Unutarnja svojstva - Zračna zvučna izolacija u laboratorijskim uvjetima difuznog zvučnog polja	EN 16272-2:2012
Normalizirani spektar buke prometa	EN 1793-3:1997	Lepeza normalizirane željezničke buke i jednoznačenkasta podjela primjene difuznih polja	EN 16272-3-1:2012
Osnovna svojstva - In situ vrijednosti difrakcije zvuka	EN 1793-4:2015	Lepeza normalizirane željezničke buke i jednoznačenkasta podjela primjene neposrednog polja	EN 16272-3-2:2014
Osnovna svojstva - In situ vrijednosti refleksije zvuka pod izravnim utjecajem zvučnog polja	EN 1793-5:2018	Unutarnja svojstva - In situ vrijednosti difrakcije zvuka pod izravnim utjecajem zvučnog polja	EN 16272-4:2016
		Unutarnja svojstva - In situ vrijednosti refleksije zvuka pod izravnim utjecajem zvučnog polja	EN 16272-5:2014
Unutarnja svojstva - In situ vrijednosti izolacije od vanjske buke u uvjetima neposrednog zvučnog polja	EN 1793-6:2018	Unutarnja svojstva - In situ vrijednosti izolacije od vanjske buke pod izravnim utjecajem zvučnog polja	EN 16272-6:2014
		Vanjska svojstva - In situ vrijednosti gubitaka jakosti zvuka	EN 16272-7:2015
NEAKUSTIČNA SVOJSTVA			
Mehanička svojstva i zahtjevi za stabilnost	EN 1794-1:2018	Mehanička svojstva pod statičkim opterećenjem - Proračun i metode ispitivanja	EN 16727-1:2018
Opći sigurnosni zahtjevi i uvjeti zaštite okoliša	EN 1794-2:2011	Mehanička svojstva pod dinamičkim opterećenjem uzrokovanim prolaskom vlakova - Otpornost na zamor	EN 16727-2-1:2018
Reakcija na požar - Ponašanje pri gorenju barijera za zaštitu od buke i razredba	EN 1794-3:2016	Mehanička svojstva pod dinamičkim opterećenjem uzrokovanim prolaskom vlakova - Metoda proračuna	EN 16727-2-2:2016
		Opći sigurnosni zahtjevi i uvjeti zaštite okoliša	EN 16727-3:2017
POSTUPCI ZA PROCJENJIVANJE DUGOROČNE UČINKOVITOSTI			
Akustična svojstva	EN 14389-1:2015	Akustična svojstva	EN 16951-1:2018
Neakustična svojstva	EN 14389-2:2015	Neakustična svojstva	EN 16951-2:2018

Slika 3. Struktura i sadržaj paketa europskih norma koje se odnose na uređaje za smanjenje buke cestovnog i željezničkog prometa

3. Pregled zahtijevanih svojstava panela

Pri projektiranju barijera za zaštitu od buke cestovnog i željezničkog prometa sve zemlje članice EU obvezne su uzeti u obzir CEN/CENELEC Internal Regulations europskih normi koje se odnose na uređaje za smanjenje buke djelujući na širenje zvuka zrakom. To su CEN / TC 226 / WG 6 pokrenut 1989. godine za cestovni sektor i CEN / TC256 / SC1 / WG40 pokrenut 2008. godine za željeznički sektor. Oba paketa mogu se podijeliti u tri osnovne kategorije: akustična, neakustična (mehanička svojstva, otpornost i stabilnost konstrukcije, sigurnost i otpornost na požar) i dugoročna svojstva, tj. učinkovitost barijere (slika 3.). Sve norme prikazane na slici 3. preuzete su u hrvatsku normizaciju i nalaze se u području rada tehničkih odbora HZN TO 509 (Cestovna oprema) i HZN TO 528 (Oprema za željeznice). U nastavku su ukratko opisani osnovni zahtjevi na konstrukciju zidova za zaštitu od buke te su dani pregledom literature prikupljeni zaključci o načelnom utjecaju svojstava panela na učinkovitost, stabilnost, sigurnost i trajnost zidova za zaštitu od buke.

3.1. Akustična svojstva

Učinkovitost zidova u smanjenju razina prometne buke ovisi o velikom broju parametara: akustičnim svojstvima i materijalu panela, dimenzijama zida, položaju izvora buke, zida i prijarnika, intenzitetu prometa, brzini, tipu i stanju vozila, stanju vozne površine, karakteristikama terena između izvora i prijarnika te vremenskim uvjetima [20]. Osnovni parametri kojima se opisuju akustična svojstva panela ispune zidova su sposobnost apsorpcije i izolacije zvuka, a čimbenici koji na njih najviše utječu su, osim udaljenosti zidova od izvora buke i njihove visine, debljina i tip materijala panela [33], tj. gustoća i poroznost panela [34].

Što je veća sposobnost panela ispune zida da apsorbira zvuk, to je manja refleksija zvučnog vala od zida prema objektima sa suprotne strane prometnice te natrag prema vozilu (izvoru buke). Ne-apsorbirajuća ili reflektirajuća ispuna može uzrokovati propuštanje zvučnog vala iznad zida nakon što se on višekratno reflektirao između panela i vozila. Zbog ovakvog ponašanja valova, upotreba panela s malim ili nikakvim svojstvima apsorpcije može dodatno pogoršati razine buke na mjestima prijarnika. Porast razine buke uslijed pojave refleksije može iznositi i do 3 dB(A) [20]. Ovaj je problem najviše izražen kod prozirnih reflektirajućih panela postavljenih s obje strane prometnice koje stvaraju "kanjonski" efekt, što može dovesti do povećanja razina buke za 6 dB(A) [35].

Sposobnost izolacije zvuka u prvom redu ovisi o vlastitoj težini i gustoći panela ispune. Smatra se da panel ima dovoljna

izolacijska svojstva ako je njegova gustoća najmanje 15 kg/m³ [18] te da bilo koji materijal panela zida čija težina iznosi najmanje 20 kg/m² omogućava ostvarivanje izolacije zvuka u iznosu od 20 dB(A). Dodatno smanjenje od 1,5 dB(A) moguće je postići sa svakim dodatnim metrom visine zida [34].

Trajnost zida i njegova akustična svojstva dvije su izrazito međuzavisne karakteristike. U pravilu vrijedi da trajni proizvodi uvijek ispunjavaju akustične zahtjeve budući da težina i gustoća koju posjeduju, osim trajnosti, također osiguravaju i zahtijevanu zvučnu izolaciju [36].

U tablici 1. prikazane su najniže zabilježene vrijednosti apsorpcije i izolacije zvuka zidova za zaštitu od buke s betonskim, metalnim, drvenim i prozirnim panelima, dane u [37, 38].

3.2. Neakustična svojstva

Opća zahtijevana neakustična svojstva zidova za zaštitu od buke su njihova (1) mehanička otpornost i stabilnost - pod statičkim i dinamičkim opterećenjem (uzrokovanim vjetrom i prolaskom vozila te nanosima snijega očišćenog s prometnice), udarnim opterećenjem zrakom nošenih krhotina i materijala s prometne površine te na zamor, (2) opći sigurnosni zahtjevi i uvjeti zaštite okoliša - otpornost na požar, generiranje krhotina, zaštita okoliša, izlazi u slučaju nužde, refleksija svjetlosti, prozirnost, (3) reakcija na požar - ponašanje pri gorenju, gustoća dima i otrovnih plinova [32, 39].

Stalno opterećenje, tj. vlastita težina panela mora se uzeti u obzir prilikom proračuna i projektiranja svih vrsta zidova. Vlastita težina panela posebno je važna pri projektiranju zidova na objektima (vijaduktima, mostovima, potpornim i upornim zidovima). Naime ako su nužni paneli veće težine s obzirom na zahtijevano svojstvo izolacije, tada su potrebne izmjene u projektu nosive konstrukcije. Zbog toga se u slučajevima izvedbe zidova na postojećim objektima na kojima nisu moguće preinake koje bi osigurale njihovu veću nosivost najčešće odabiru paneli ispune male vlastite težine, nauštrb izolacijskom svojstvu.

Osim stalnog opterećenja u smislu ukupne vlastite težine panela, najveće opterećenje kojima se ovakva konstrukcija treba oduprijeti jest uzrokovano djelovanjem vjetra. Opterećenje vjetrom varira ovisno o geografskoj lokaciji zida, a može ovisiti i o odnosu nadmorske visine lokacije i okolne topografije. Utječe na moment prevrtanja ili rotacijsku silu koja djeluje na zid, njegove temelje i stupove, no za razliku od stalnog, to opterećenje je neovisno o materijalu izvedbe panela.

Aerodinamička opterećenja potrebno je uzeti u obzir ako se zidovi smještaju uz infrastrukturu namijenjenu prometovanju teških vozila velikim brzinama. U tim je slučajevima moguć znatan dinamički pritisak na zid uslijed strujanja zraka. Primjerice, vozila

Tablica 1. Akustična svojstva zidova za zaštitu od buke

Svojstvo	Betonski paneli	Metalni paneli	Drveni paneli	Prozirni paneli
Zvučna apsorpcija [dB(A)]	≥ 4	≥ 8	≥ 8	< 4
Zvučna izolacija [dB(A)]	≥ 15	≥ 15	> 24	> 24

koja prolaze brzinama od 100 km/h mogu prouzročiti razliku u tlaku od $\pm 0,5$ kN/m² u području zida udaljenog tri metra [20]. Znatno veće promjene u tlaku mogu se očekivati u neposrednoj blizini tunela. Takva opterećenja potrebno je uzeti u obzir tijekom projektiranja i odabira načina pričvršćenja apsorbirajućih slojeva panela zidova.

Opterećenje snijegom odnosi se na horizontalno opterećenje uslijed snijega nakupljenog uz donju površinu zida. Pri projektiranju zidova, osim njihova dimenzioniranja za prihvat takvih opterećenja, treba uzeti u obzir prostor potreban za sigurnu pohranu snježnog nanosa očišćenog s prometne površine, kao i sigurnu udaljenost konstrukcije zida od manevarskog prostora uređaja za čišćenje snijega.

Udarne opterećenja odnose se na opterećenja uslijed udara vozila i zrakom nošenih krhotina i materijala s prometne površine. Zidovi se najčešće ne projektiraju na način da izdrže sile izravnog udara vozila već se uz ili na njih ugrađuju zaštitne (odbojne) ograde, osim ako zid za zaštitu od buke i sam ne služi kao sigurnosna barijera.

Otpornost na požar potrebno je promatrati kroz ograničenja primjene materijala, kako zapaljivog tako i nezapaljivog, koji bi pri kontaktu s otvorenim plamenom kao posljedicom šumskog požara ili prometne nesreće mogao razviti otrovne plinove ili žar koji bi se pronosio vjetrom.

U fazi projektiranja također je potrebno razmotriti opasnost od pada krhotina ako se paneli ugrađuju na konstrukcije mostovima ili vijadukata te predvidjeti izlaze u slučaju nužde i za potrebe održavanja zidova ako su dulji od 500 m, u skladu s propisima za tunele [40].

Refleksija svjetla od glatkih panela zidova za zaštitu od buke, tj. odblesak koji može ometati korisnike infrastrukture predstavlja velik sigurnosni problem u slučaju primjene metalnih ili prozirnih panela. Ova negativna pojava je više izražena kad su paneli svjetlijih boja, a javlja se i po danu (u jutarnjim i večernjim satima kada su Sunčeve zrake pod malim kutom) i po noći uslijed upotrebe svjetala, što je pogotovo izraženo ako je površina panela mokra. Primjena panela hrapavije površine i dubljeg reljefnog oblikovanja može smanjiti ili eliminirati taj nedostatak [20, 22].

U pogledu neakustične dugoročne učinkovitosti, odabir materijala i oblikovanje konstrukcije potrebno je radi osiguranja što veće trajnosti konstrukcije izložene atmosferilijama i klimatskim promjenama, što dulje uporabljivosti uz minimalno održavanje ili bez održavanja te djelotvornog zbrinjavanja konstrukcije na kraju njenog vijeka upotrebe [32]. Pri tomu količina radova i troškova održavanja panela znatno utječe na održivost zidova i ekološki učinak zida tijekom cijelog njegovog trajanja. Uporabljivost zida za zaštitu od buke može se definirati kao "bezbrizni period" u kojem on u kontinuitetu optimalno ispunjava svoju svrhu bez većih promjena svojstava, tj. vrijeme od izgradnje do trenutka kada ga je potrebno zamijeniti [24]. To vrijeme ovisi o materijalu izvedbe panela ispune, a odabir odgovarajućeg materijala ovisi u prvom redu o zahtjevima projektantu da slijedi tehničke propise koji će omogućiti dugotrajnost panela u lokalnim uvjetima. Pri tomu je potrebno voditi računa o dugotrajnoj otpornosti

materijala na pojave i procese uz prometnicu i na njoj, kao što su kemijska sredstva, sol za odleđivanje, prljava voda ili prašina, rosa, procesi smrzavanja i odmrzavanja, temperaturni ekstremi, UV zračenje, vibracije koje generira promet, biološki procesi i slično. Otpornost zidova s obzirom na vremenske prilike utječe na njihova akustična i neakustična svojstva te određuje koliko često zidovi zahtijevaju veće popravke ili zamjenu. Međutim, zasad ne postoje raspoloživi podaci o rezultatima istraživanja utjecaja vremenskih prilika na zidove izvedene od različitih materijala [32].

4. Neakustična svojstva panela ispune

Ovdje se donosi sistematiziran pregled osnovnih svojstava betonskih, metalnih, drvenih i prozirnih panela (uobičajen sastav panela, lokacija i učestalost primjene, mogućnost transporta i ugradnje, potreba za održavanjem i mogućnost zbrinjavanja). On je izrađen na temelju analize javno dostupnih rezultata istraživanja i tehničkih informacija o fizičkim svojstvima, dugoročnim performansama te tehničkoj i ekonomskoj održivosti zidova za zaštitu od buke sadržanih u [16, 24, 32, 33, 38, 41-44]. Također su prikazani rezultati evaluacije panela provedene rangiranjem najmanjih, pregledom utvrđenih, vrijednosti njihovih osnovnih neakustičnih svojstava: trajnosti i mehaničke otpornosti, troškova izgradnje, održavanja i zamjene te troškova uporabljivosti zidova za zaštitu od buke.

Potrebno je naglasiti da podatke o troškovima izgradnje i dugoročnoj ekonomičnosti panela zidova treba uzeti s mjerom opreza iz sljedećih razloga. Podaci o prosječnim troškovima izgradnje zidova uz primjenu pojedinog tipa panela, preuzeti iz [32], utvrđeni su 2010. godine anketiranjem njemačkih, austrijskih, nizozemskih, talijanskih i francuskih upravitelja infrastrukture i proizvođača panela, stoga je izgledno da donekle odstupaju od današnjih vrijednosti na tržištu zemalja jugoistočne Europe. Dodatno, budući da čak 80 % upravitelja prometnom infrastrukturom u zemljama EU nema službeno usvojen program održavanja zidova za zaštitu od buke [32], podaci o prosječnim troškovima održavanja i zamjene te prosječnim troškovima uporabljivosti (za period od 50 godina) preuzeti su iz američke literature [24, 33] i prilagođeni prikazu u SI jedinicama. Ipak, kako je u sva tri slučaja riječ o prosječnim vrijednostima utvrđenima na velikom uzorku, zaključeno je da su one zadovoljavajući orijentir za provedenu ekonomsku evaluaciju i usporedbu panela.

4.1. Betonski paneli

Betonski paneli se sastoje od dva sloja - nosivog i apsorbirajućeg. Apсорbirajući sloj izvodi se od poroznog betona (proizvedenog uz promjenu zrna agregata veličine 3 do 5 mm, primjerice ekspandirane gline, drvenih vlakana ili gumenih granula) i obično je debljine do 15 cm, a ugrađuje se na sloj nosivog armiranog betona debljine do 20 cm. S obzirom na veliku trajnost, stabilnost i otpornost (500 do 1000 kg/m² i više), očekivanu

uporabljivost tijekom najmanje 40 godina te brojnih mogućnosti pričvršćenja i oblikovanja zbog kojih se lako uklapaju u bilo koji okoliš, betonski paneli su danas najčešće primjenjivani paneli za izgradnju zaštitnih zidova od prometne buke.

Velika težina panela može predstavljati problem i povećati troškove prijevoza na veće udaljenosti. Također, zbog velike težine nisu pogodni za ugradnju na vijaduktima i mostovima. Prilikom ugradnje često se primjenjuju posebne tehnike montaže kako bi se skratila obustava prometa. Uobičajen razmak stupova od četiri metra podrazumijeva manje troškove temeljenja i izvedbe stupova zidova, no ukupni prosječni troškovi izgradnje viši su nego pri izvedbi zidova s ispunom od metalnih i drvenih panela te iznose oko 225 EUR/m².

Zbog velike otpornosti, oštećenja uslijed udaraca pri izlijetanju vozila, udara krhotina, pritiska naslaga uslijed čišćenja snijega i ostalih pojava tijekom održavanja betonskih panela nisu vjerojatna. Hrapava površina betonskih panela ne privlači grafitere jer zahtijeva veće količine boje, pa je vandalizam isključen. Budući da betonski paneli vrlo dobro podnose ekstremne temperaturne promjene, UV zračenje, vlagu, led i sol, održavanje vezano za strukturalni i estetski integritet konstrukcije se rijetko provodi. Unatoč tomu, zabilježena su oštećenja apsorbirajućeg sloja izvedenog uz primjenu drvenih vlakana u donjim dijelovima konstrukcije (metar iznad površine terena) uslijed utjecaja vlage. Dodatno, apsorbirajući slojevi koji sadrže ekspaniranu glinu mogu se ljuštiti uslijed udara i nisu otporni na smrzavanje. Unatoč tomu, ustanovljeni troškovi održavanja i zamjene takvih panela su najniži s obzirom na ostale razmatrane i iznose oko 40 EUR/m². Zbog niskih troškova održavanja, prosječni su zabilježeni troškovi uporabe oko 305 EUR/m².

Postupak sa dotrajalom zidovima izvedenim od betonskih panela relativno je jednostavan, jer za rušenje zidova i uporabu betonskih panela vrijede iste procedure kao i za sve ostale betonske proizvode. Općenito se smatra da reciklabilnost takvih panela iznosi čak 80 %.

4.2. Metalni paneli

Metalni paneli izrađuju se od (galvaniziranog) čelika, nehrđajućeg čelika ili aluminija, a sastoje se od dvije lakirane ploče debljine 0,5 i 1,0 mm, između kojih se ugrađuje kamena vuna debljine 50, 80 ili 100 mm. Uporabljivost čeličnih panela iznosi 20 do 25 godina, a aluminijskih 30 godina. Zbog male vlastite težine najčešće se ugrađuju na mostovima i vijaduktima, postojećim potpornim zidovima ograničene nosivosti te za povećanje visine postojećih zaštitnih zidova. Pri odabiru njihove lokacije potrebno je voditi računa o tome da visoke temperature zraka i tla neposredno uza zid mogu zbog insolacije i zagrijavanja panela negativno utjecati na rast okolne vegetacije.

S obzirom na malu vlastitu težinu, troškovi dopreme panela na gradilište su mali. Prilikom ugradnje aluminijskih panela potrebno je voditi računa o sprječavanju izravnog kontakta aluminija s drugim metalima (u prvom redu čelikom), jer aluminij reagira slično kao cink u postupku galvanizacije, tj. ponaša se

kao "žrtveni" element koji će se dezintegrirati u kratkom roku. Antikorozivni premaz panela je obavezan u slučajevima visoke izloženosti soli i vlazi. Također, budući da su svi metalni paneli vodljivi, njihova ugradnja nije poželjna u blizini električnih vodova ako se ne može osigurati ispravno uzemljenje svih metalnih komponenti. Paneli se jednostavno ugrađuju pomoću dizalica, a moguća obustava prometa duž prometnice tijekom izgradnje zidova traje relativno kratko. Ipak, za izvedbu pričvršćenja potrebno je predvidjeti i skelu čije postavljanje zahtijeva znatnu količinu prostora, rada i vremena. Uobičajen razmak stupova i temelja od 3 m podrazumijeva veće troškove temeljenja i izvedbe stupova u odnosu na zidove izvedene od betonskih panela, no prosječna cijena izgradnje ovakvog zida je ipak manja u odnosu na betonski i iznosi oko 215 EUR/m².

S druge strane, metalni paneli zahtijevaju veći opseg radova na održavanju u usporedbi s betonskim panelima, posebice u obalnim područjima i u gradskim sredinama. Kad su u zraku velike količine vlage i soli, dolazi do postupnog hrđanja panela. Ako paneli nisu premazani antikorozivnom bojom ili galvanizirani, hrđa s panela vrlo će brzo prijeći i na ostale elemente zida. Ne postoje li unutar panela ukrute, tada već pri malim naprezanjima panela prouzročeni normalnim temperaturnim promjenama može se javiti vitoperenje. Dodatno, mala otpornost panela (manja od 400 kg/m²) i male debljine metalnih ploča čine takve panele vrlo podložnima oštećenjima uslijed vandalizma, naleta krhotina ili vozila te radova na održavanju i čišćenju snijega s prometnice. Zbog svoje glatke površine, takvi su paneli i česta meta grafitera. Zbog toga su troškovi održavanja i moguće zamjene takvih panela niži samo u usporedbi s prozirnim panelima i iznose oko 120 EUR/m², a prosječni zabilježeni troškovi uporabljivosti iznose visokih 515 EUR/m².

Metalni elementi se potpuno mogu reciklirati, ali posebne postupke s tim u vezi potrebno je predvidjeti za ispunu panela izvedenu od mineralne ili kamene vune.

4.3. Drveni paneli

Drveni paneli izrađuju se od punog ili lameliranog drva ili šperploče. Paneli s licem od pruča i unutrašnjošću od kamene vune također se smatraju drvenima. Drvo se smatra ekološki vrlo prihvatljivim materijalom za izvedbu panela zidova i najčešće je, zbog vrlo dobrog uklapanja u okoliš, prvi izbor krajobraznih arhitekata, iako je njihovo očekivano trajanje od 20 ili 25 godina vrlo kratko u odnosu na ostale analizirane panele.

Zbog male vlastite težine, troškovi dopreme drvenih panela na gradilište su mali. Temeljenje je jednostavno i ne zahtijeva posebne postupke u smislu pilotiranja, kao što primjerice može zahtijevati primjena betonskih panela pri izgradnji viših zidova. Prilikom ugradnje, paneli se umeću između stupova i zatim međusobno pričvršćuju čavlima ili vijcima za koje je poželjno da su izrađeni od nekorozivnog metala (nehrđajućeg čelika ili aluminija). Osnovna prednost ovakvog načina povezivanja je mogućnost brze i jednostavne montaže i demontaže panela, zbog čega je moguća obustava prometa duž prometnice tijekom

izgradnje drvenih zidova relativno kratka. Paneli se jednostavno ugrađuju pomoću dizalice, ali za izvedbu pričvršćenja potrebno je predvidjeti i skelu čije postavljanje zahtijeva znatnu količinu prostora, rada i vremena. Procijenjeni prosječni troškovi izgradnje zidova izvedenih uz primjenu drvenih panela su najniži i iznose oko 205 EUR/m².

Unatoč najnižoj cijeni izgradnje, primjena drvenih panela dugoročno se pokazala problematičnom. Iako s akustičnoga gledišta posjeduju zadovoljavajuću otpornost (veću od 20 kg/m²), drvo nije strukturno čvrst materijal te se lako slama u slučaju udara vozila, što uzrokuje pojavu pukotina u zidu i smanjuje njegovu učinkovitost u zaštiti od buke. Proizvodi od drva nisu dimenzionalno stabilni – tijekom vremena, uslijed atmosferskih utjecaja (sunca, vlage) ili napada insekata drveni paneli se vitopere i skupljaju što uzrokuje pojavu otvora u područjima spojeva, pogotovo ako drvo nije bilo dovoljno prosušeno prije proizvodnje panela. Što je veća debljina drvenih panela, to će problem izvijanja tijekom uporabe biti veći. Primjena panela koji su zbog poboljšanja trajnosti kemijski tretirani pokazala je da tijekom vremena dolazi do izraženijeg propadanja na mjestima spoja panela i stupova zbog kemijske reakcije između njihovih materijala. Također, impregnacija ili premaz drvene građe predstavlja problem u slučaju požara zbog emisije štetnih plinova u okoliš. Iako se pri proizvodnji koristi impregnirano drvo, ovakvi paneli zahtijevati će periodično premazivanje, u prvom redu zbog osiguranja zaštite od vlage i insekata, ali i zbog blijeđenja originalne boje. Svaki popravak ili zamjena oštećenih dijelova drvenih panela uočljivi su, osim ako se ne provode uz primjenu elemenata koji su nabavljeni istodobno kad i ugrađeni, a koji su tijekom vremena bili izloženi istim vremenskim uvjetima. Zbog toga procijenjeni troškovi održavanja i moguće zamjene ovakvih panela iznose oko 115 EUR/m², a prosječni zabilježeni troškovi uporabljivosti 360 EUR/m².

Problem recikliranja najviše je izražen upravo kod drvenih panela koji na kraju svog trajanja, zbog izloženosti vremenskim uvjetima, nisu potrebne kvalitete za oporabu ili reciklažu. Osnovni nedostatak primjene drvenih panela ogleda se u upotrebi mineralne ili kamene vune u unutarnjim slojevima panela, a u posljednje vrijeme postavlja se i pitanje deforestacije te učinka impregnacijskih sredstava korištenih radi povećanja trajnosti drva na okoliš. Uklanjanje i recikliranje drvenih panela moglo bi se smatrati opasnim za okoliš upravo zbog raznih zaštitnih premaza jer, unatoč tretiranju, drvo panela na kraju uporabljivosti najvjerojatnije će biti nedostatne kvalitete za oporabu. Osim toga, drveni paneli gore kao i bilo koja druga drvena ograda, a dim i pepeo koji se otpuštaju u okoliš uslijed izgaranja tretiranog drva (arsen, benzen, krom, kreozol, pentaklorfenol) smatraju se toksičnima. Zbog svega toga je je reciklabilnost drvenih panela najniža, 20 do najviše 40 %.

4.4. Prozirni paneli

Prozirni paneli sastoje se od ploče polimetakrilata debljine 15 do 25 mm u čeličnom okviru. Oni omogućuju istodobno postizanje dva cilja: posjeduju zadovoljavajuća akustična svojstva potrebna za smanjenje širenja prometne buke, a ujedno predstavljaju

estetski privlačna rješenja za vozače i štićenu populaciju te ne ograničavaju njihov pregled okoline. Najčešće se preporučuju za estetska poboljšanja konstrukcije zida, a zbog male težine pogodni su za ugradnju na postojeće objekte. Uobičajena uporabljivost prozirnih panela iznosi 20 do 25 godina. Prozirnost je osnovni razlog ugradnje takvih panela, budući da zbog svoje reflektivnosti omogućuju relativno malo smanjenje buke na mjestu imisije. Takve panele se gradi isključivo ako se korisnicima prometnice ili okolnom stanovništvu želi i nadalje osigurati neometan pogled na visokovrjedan krajobraz ili kada prozirnost zida zahtijevaju vlasnici komercijalnih sadržaja uz prometnicu iz marketinških razloga (u tom slučaju oni bi trebali preuzeti odgovornost za razliku u cijeni nabave panela).

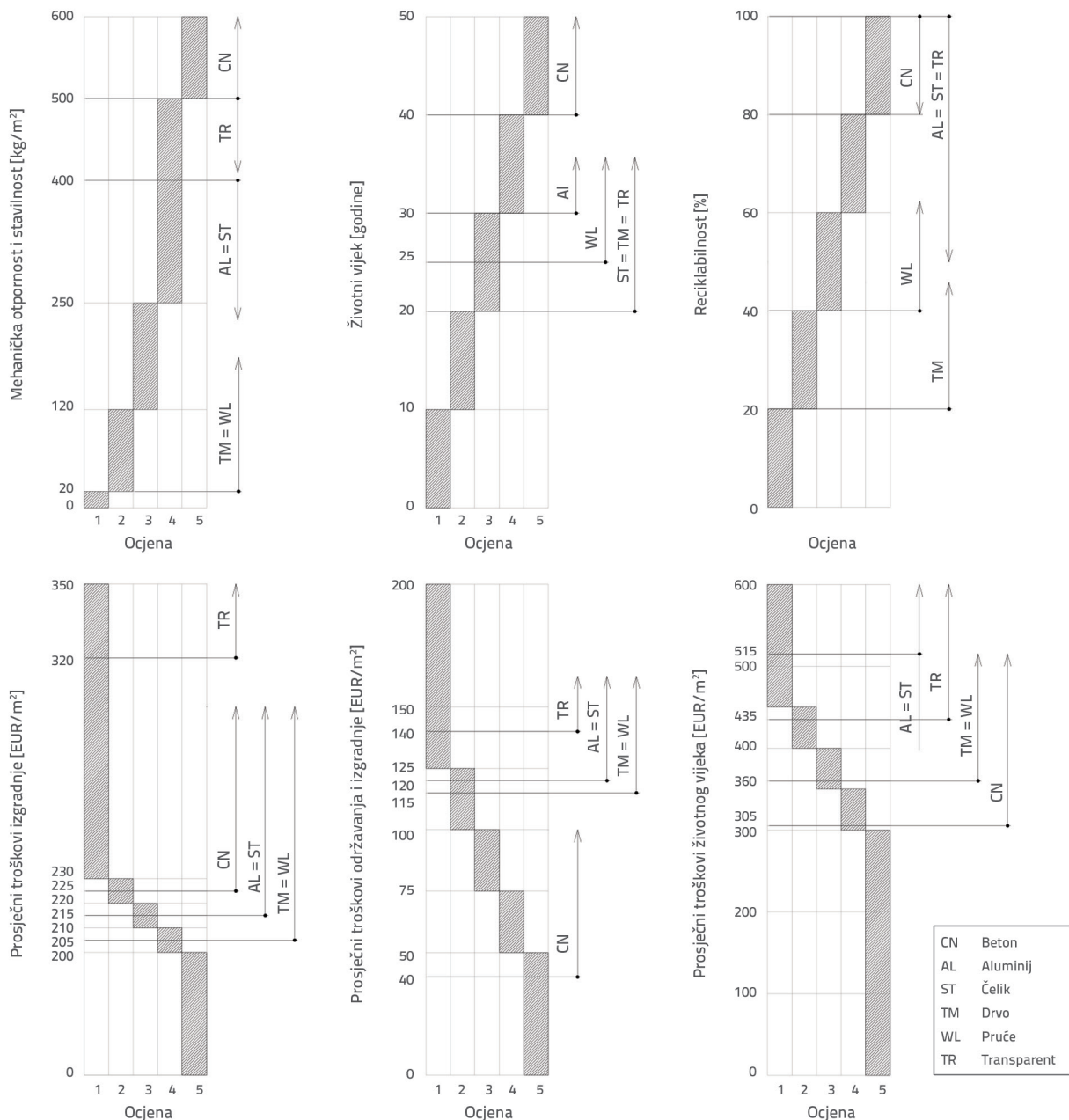
Zbog male vlastite težine, mali su troškovi dopreme prozirnih panela na gradilište. Određeni problem u dopremi i ugradnji mogu predstavljati dimenzije (površina i debljina) panela, posebice ako se radi smanjenja troškova temeljenja (sidrenja) nastoji upotrijebiti panele što većih dimenzija čime se povećavaju naprezanja u panelu tijekom njihove ugradnje. Zbog toga metode ugradnje znatno variraju ovisno o materijalu prozirnog panela (staklo, akril, pleksiglas, i sl.) i njegovim dimenzijama. Osnovni princip pri montaži tankih ravnih ploča je taj da primijenjena metoda mora omogućiti ili svesti na minimum pojavu naprezanja u panelu koja bi dovela do njegovog pucanja ili ispadanja iz potpornja. Pri ugradnji je nužno voditi računa o tolerancijama vezanima uz razmak i prijanjanje panela, stupova i sredstva za brtvljenje. Primjerice, ako je razmak panela i stupova prevelik, panel će se tijekom uporabe odvojiti od stupa što može izazvati prekomjerno pomicanje panela uslijed djelovanja vibracija ili vjetrova. Ako je taj razmak nedovoljan, sredstvo za brtvljenje spoja i sam panel neće imati dovoljnu mogućnost ekspanzije uslijed porasta temperature što će izazvati nejednoliko naprezanje u panelu te njegovo izvijanje ili pucanje. Visoka nabavna cijena prozirnih panela te uobičajen razmak stupova i temelja od tri metra koji podrazumijeva veće troškove temeljenja i izvedbe stupova u odnosu na betonske panele, za posljedicu ima najviše troškove ugradnje naprema svim ostalim razmatranim materijalima panela. Procijenjeni prosječni troškovi ugradnje iznose 320 EUR/m² panela.

Kako bi se održala prozirnost, ove tipove panela treba redovito čistiti, pogotovo ako su ugrađeni pod kutom koji onemogućava proces prirodnog čišćenja kišom. Glatka površina panela također privlači grafitere. Pristup potreban za provedbu radova na čišćenju panela obično nije problematičan sa strane prometnice, koja je i više izložena nakupljanju nečistoća. Problem se obično javlja ako vanjska strana zida nije lako ili uopće dostupna, a tada nemogućnost održavanja zadovoljavajuće prozirnosti panela može bitno utjecati na sigurnost odvijanja prometa. Dodatno, pojedini prozirni plastični materijali osjetljivi su na UV zračenje. Ako su paneli od takvih materijala izloženi dugotrajnoj insolaciji i nisu dodatno zaštićeni UV stabilizacijskim aditivima ili premazima, zamaglit će se i izgubiti boju, te će postati djelomično ili čak potpuno neprozirni. I sa zaštitom, paneli će tijekom vremena postati neprozirni. Iskustva projektanata i upravitelja infrastrukturom pokazuju da prozirni paneli zahtijevaju najvišu

razinu održavanja. U usporedbi s ostalim materijalima, takvi su paneli najosjetljiviji na udarce uslijed vandalizma, izlijetanja vozila, udara krhotina, pritiska naslaga uslijed čišćenja snijega i ostalih pojava tijekom održavanja. Popravak oštećenog panela nije moguć, već samo njegova zamjena. Zbog toga su procijenjeni prosječni troškovi održavanja i zamjene takvih panela u iznosu od 140 EUR/m² najviši u odnosu na razmatrane materijale. S druge strane, troškovi uporabljivosti niži su nego u slučaju metalnih panela, a procijenjeno je da iznose 435 EUR/m². Prozirni paneli su gotovo sto posto reciklabilni, no postavlja se pitanje preuzimanja troškova povratnog prijevoza panela proizvođaču.

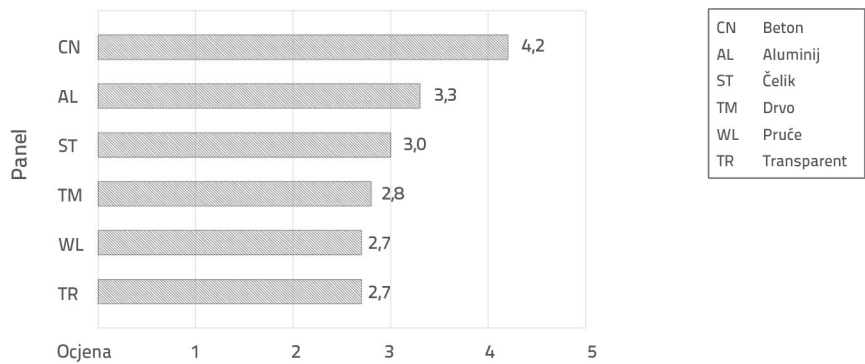
4.5. Vrednovanje panela

Ocjenjivanje panela provedeno je rangiranjem najmanjih zabilježenih vrijednosti šest neakustičnih svojstava (kriterija): najmanjeg zabilježenog trajanja i mehaničke otpornosti, reciklabilnosti, troškova izgradnje, održavanja i zamjene te troškova čitavog trajanja panela zidova za zaštitu od buke. Navedeni kriteriji rangirani su ocjenama od 1 (najgora ocjena) od 5 (najbolja ocjena) te je na temelju prethodno opisanih prikupljenih i sistematiziranih podataka o svojstvima za svaki tip panela provedeno vrednovanje, tj. Određena je ocjena panela prema pojedinom svojstvu (slika 4.).



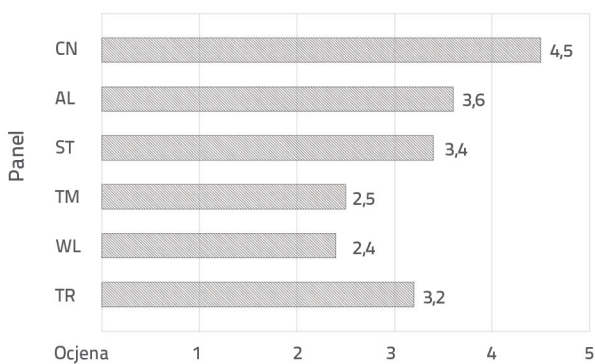
Slika 4. Ocjena panela prema najmanjim vrijednostima šest neakustičnih svojstava (kriterija)

Aritmetička srednja ocjena panela prema šest neakustičnih kriterija

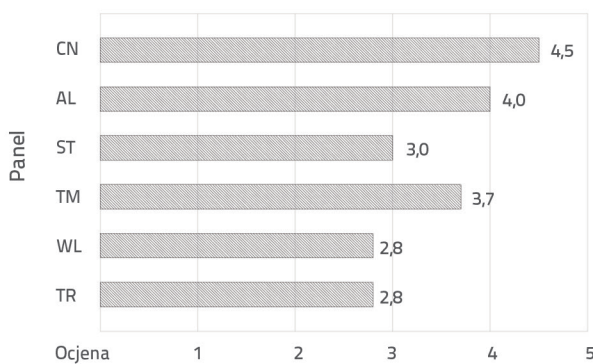


Ponderirana srednja ocjena panela prema šest neakustičnih kriterija

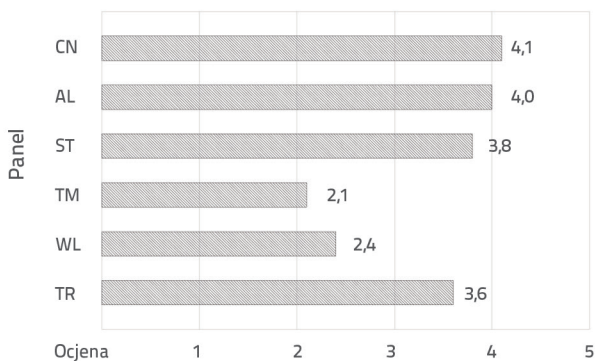
Prioritet - mehanička otpornost i stabilitet



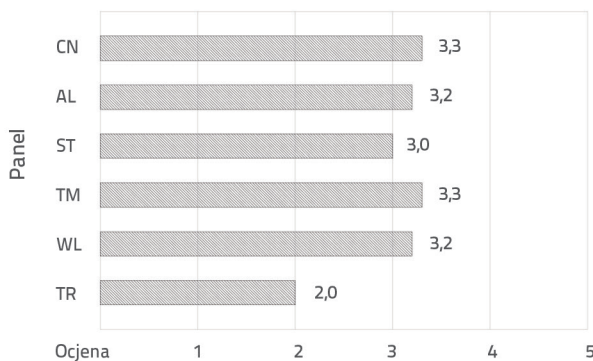
Prioritet - životni vijek



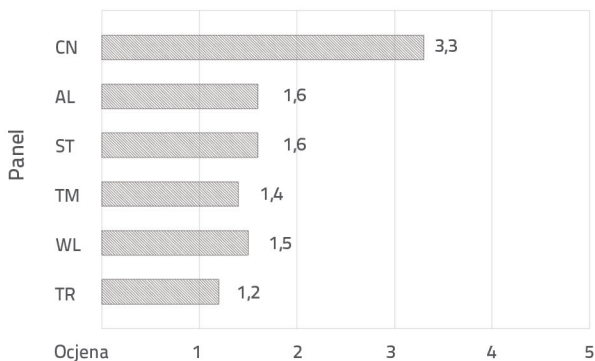
Prioritet - reciklabilnost



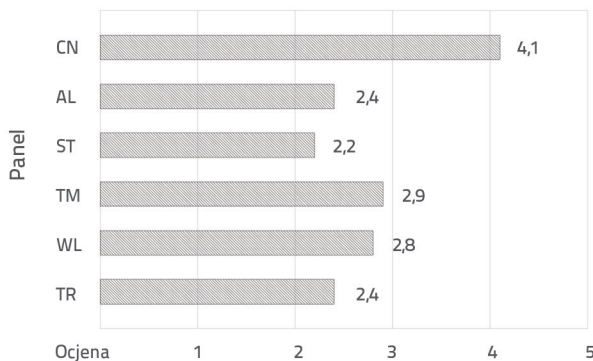
Prioritet - prosječni troškovi izgradnje



Prioritet - prosječni troškovi održavanja i izgradnje



Prioritet - prosječni troškovi životnog vijeka



Slika 5. Rezultati proračuna aritmetičkih i ponderiranih srednjih ocjena panela prema šest neakustičnih svojstava (kriterija)

Radi utvrđivanja prosječne ocjene prema prioritetnim kriterijima upravitelja infrastrukture pri odabiru materijala panela, osim aritmetičke srednje ocjene za svaki tip panela izračunano je i šest ponderiranih aritmetičkih srednjih ocjena. U njihovom je proračunu ponder od 0,5 dan prioritetnom kriteriju, a preostalim razmatranim kriterijima pridruženi su ponderi iznosa 0,1. Rezultati proračuna srednjih ocjena prikazani su dijagramima na slici 5.

5. Zaključak

Istraživanje opisano u radu potaknuto je činjenicom da će ulaganja u razvoj i modernizaciju cestovne i željezničke infrastrukture u sljedećim godinama zahtijevati povećanu izgradnju zidova za zaštitu od buke - najučestalije mjere zaštite od prometne buke u RH. Iako ih se još uvijek promatra kao prometnu opremu, zidovi za zaštitu od buke zahtijevaju velike količine resursa te imaju značajan učinak na izgrađeni okoliš. Zbog toga će trebati tijekom planiranja i projektiranja zidova obratiti veliku pozornost na odabir što trajnijega, sigurnijega i održivijega panela ispune.

Cilj istraživanja bio je smanjiti nesigurnost u odabiru materijala panela ispune zidova i unaprijediti proces upravljanja prometnom bukom u RH. Istraživanje svojstava panela izgrađenih od četiri osnovna materijala (betona, metala, drva i prozirnoga polimetakrilata) provedeno je uz pretpostavku da su osnovni akustični zahtjevi na konstrukciju zida potpuno zadovoljeni. Tako je istraživanje moglo biti usmjereno na šest neakustičnih svojstava panela (kriterija), koja su građevinski inženjeri dužni razmatrati.

Sistematizacijom i vrednovanjem podataka prikupljenih iz sekundarnih izvora utvrđeno je da betonski paneli ostvaruju najbolju ocjenu s obzirom na mehaničku otpornost i stabilnost, trajanje i troškove održavanja. Metalni i prozirni paneli su visoko reciklabilni, no prosječni troškovi uporabljivosti su im visoki. Iako vrlo dobri u pogledu niskih troškova izgradnje, drveni paneli po svim ostalim razmatranim neakustičnim svojstvima znatno zaostaju za betonskim, metalnim te prozirnima panelima.

Provedena višekriterijska analiza pokazala je da betonski paneli postižu najveću srednju ocjenu prema postavljenim neakustičnim svojstvima. Budući da je cijena nabave često najvažniji kriterij pri odabiru materijala panela, posebno su zanimljivi rezultati proračuna ponderirane ocjene visine srednjih troškova izgradnje zidova s obzirom na materijal panela. Oni pokazuju da je, unatoč većoj nabavnoj cijeni panela, primjena betonskih panela pri izvedbi konstrukcije zidova podjednako ekonomična kao i primjena metalnih ili drvenih panela. Prebacimo li težište sa cijene izgradnje na dugoročnu održivost panela promatranu kroz troškove održavanja i zamjene, betonski paneli su zbog svoje velike otpornosti i trajnosti ponovo u značajnoj prednosti. Odlično ponašanje konstrukcije zida izvedene uz primjenu betonskih panela te dobra reciklabilnost istih rezultira i najvećom ponderiranom ocjenom troškova uporabljivosti.

Prema rezultatima istraživanja, preporuka je da se pri izboru tipa panela ispune tijekom planiranja novih zidova za zaštitu od buke, posebice izvan naseljenih područja, prednost pruži betonskim panelima, a zatim metalnima (u uvjetima manje izloženosti atmosferilijama i na objektima), a primjenu drvenih i prozirnih panela preporučuje se ograničiti na područja visokovrijednih krajobraza.

LITERATURA

- [1] European Environment Agency (EEA). Managing Exposure to Noise in Europe, Briefing 01/2017, Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/managing-exposure-to-noise-in-europe> (accessed on 2.5.2020.)
- [2] Muzet, A.: Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med Rev*, (2007) 11:135-42, <https://doi.org/10.1016/j.smr.2006.09.001>
- [3] Zacarías, F.F., Molina, R.H., Ancela, J.L.C., López, S.L., Ojembarrena, A.A.: Noise exposure in preterm infants treated with respiratory support using neonatal helmets. *Acta Acustica united with Acustica*, 99 (2013) 4, pp. 590-597, <https://doi.org/10.3813/AAA.918638>
- [4] Hygge, S., Evans, G.W., Bullinger, M.: A prospective study of some effects of aircraft noise on cognitive performance in schoolchildren. *Psychol. Sci.*, 13 (2002), pp. 469-474, <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00483>
- [5] Lercher, P., Evans, G.W., Meis, M.: Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. *Environ. Behav.*, 35 (2003), pp. 725-735, <https://doi.org/10.1177/0013916503256260>
- [6] Chetoni, M., Ascari, E., Bianco, F., Fredianelli, L., Licitra, G., Cori, L.: Global noise score indicator for classroom evaluation of acoustic performances in LIFE GIOCONDA project. *Noise Mapp.*, 3 (2016), pp. 157-171, <https://doi.org/10.1515/noise-2016-0012>
- [7] Dratva, J., Phuleria, H.C., Foraster, M., Gaspoz, J.M., Keidel, D., Künzli, N., Liu, L.J. S., Pons, M., Zemp, E., Gerbase, M.W., Schindler, C.: Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults. *Environmental Health Perspectives*, 120 (2012) 1, pp. 50-55, <https://doi.org/10.1289/ehp.1103448>
- [8] Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N., Ising, H.: Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology*, 16 (2005), pp. 33-40, <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000147104.84424.24>
- [9] Babisch, W., Swart, W., Houthuijs, D., Selander, J., Bluhm, G., Pershagen, G., Dimakopoulou, K., Haralabidis, A.S., Katsouyanni, K., Davou, E.: Exposure modifiers of the relationships of transportation noise with high blood pressure and noise annoyance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132 (2012), pp. 3788-3808.
- [10] Miedema, H.M.E., Oudshoorn, C.G.M.: Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ Health Perspect*, 109 (2001) 409, 16
- [11] Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D., Vigotti, M.A.: Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Science of the total environment*, 568 (2016), pp. 1315-1325, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.071>

- [12] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise (END), Available online: <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/49/2020-03-25> (accessed on 2.5.2020.)
- [13] Dragčević, V., Lakušić, S., Ahac, S., Ahac, M.: Contribution to Optimization. of Noise Mapping Procedures. GRADEVINAR, 60 (2008) 9, pp. 787-795.
- [14] Science for Environment Policy - Noise Abatement Approaches, Future Brief 17: Produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol, 2017. Available online: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy> (accessed on 2.5.2020.)
- [15] Lakušić, S., Ahac, M.: Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas, Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 19 (2012) 2, pp. 427-435
- [16] Kay, D.H., Morgan, S.M. Bodapati, S.N.: Evaluation of Service Life of Noise Barrier Walls in Illinois. Final Report No. ITRC FR97-3 for the Project IIB-H1 FY97, Prepared for the Illinois Department of Transportation - Transportation Research Center, 1999. Available online: [https://idot.illinois.gov/Assets/uploads/files/Transportation-System/Research/Illinois-Transportation-Research-Center/1999.11.01 %20- %20Evaluation %20of %20Service %20Life %20of %20Noise %20Barrier %20Walls %20- %20IIB-H1 %20FY97.pdf](https://idot.illinois.gov/Assets/uploads/files/Transportation-System/Research/Illinois-Transportation-Research-Center/1999.11.01%20-%20Evaluation%20of%20Service%20Life%20of%20Noise%20Barrier%20Walls%20-%20IIB-H1%20FY97.pdf) (accessed on 2.5.2020.)
- [17] US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA) Technology Exchange Program. Quiet Pavements Systems in Europe. Report No. FHWA-PL-05-011, 2005. Available online: https://international.fhwa.dot.gov/pubs/quiet_pav/pl05011.pdf (accessed on 3.5.2020.)
- [18] Kotzen, B., English, C.: Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design, 2nd ed., Taylor & Francis, 2009
- [19] Grubeša, S., Petošić, A., Suhaneck, M., Đurek, I.: Zaštita od buke - zvučne barijere, Sigurnost, 61 (2019) 3, pp. 217-226.
- [20] Conference of European Directors of Roads (CEDR): State of the Art in Managing Road Traffic Noise: Noise Barriers. Technical Report 2017-02. 2017. Available online: <https://www.cedr.eu/download/Publications/2017/CEDR-TR2017-02-noise-barriers.pdf> (accessed on 14 May 2020).
- [21] Tumavičė, A., Laurinavicius, A., Vaitkus, A., Mikaliūnas, Š., Perveneckas, Z., Čiuprinskis, K.: Effectiveness analysis of mitigation measures against railway noise, GRADEVINAR, 69 (2017) 1, pp. 41-51, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.1877.2016>
- [22] Grubeša, S., Suhaneck, M., Đurek, I., Petošić, A. Combined acoustical and economical noise barrier optimization using genetic algorithms. GRADEVINAR, 71 (2019) 3, pp. 177-185, doi:10.14256/JCE.2523.2018.
- [23] Mijoski, G., Moslavac, D., Krakutovski, Z., Samardzioska, T.: The analysis and measuring the noise on the A2 motorway (E-65) "Mother Teresa" section: Skopje - Tetovo, GRADEVINAR, 72 (2020) 3, pp. 253-262, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.1680.2016>
- [24] Morgan, S.M., Kay, D.H.: Noise Barrier Material Selection. Transportation Research Record. Paper No. 01-2616. J. Transp. Res. Board 2001, doi:10.3141/1756-07.
- [25] Ahac, M., Ahac, S., Lakušić, S.: Long-Term Sustainability Approach in Road Traffic Noise Wall Design, Sustainability, 13 (2021), 536, <https://doi.org/10.3390/su13020536>
- [26] Zakon o zaštiti od buke (Narodne novine, 30/2009, 55/2013, 153/2013, 41/2016, 114/2018 i 14/2021)
- [27] Pravilnik o načinu izrade i sadržaju karata buke i akcijskih planova te o načinu izračuna dopuštenih indikatora buke (Narodne novine 75/2009, 60/2016)
- [28] Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave (Narodne novine 145/2004)
- [29] Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke s obzirom na vrstu izvora buke, vrijeme i mjesto nastanka (Narodne novine 143/2021)
- [30] Brero, G.: EU Noise Policy: European Noise Barrier Federation (ENBF) Expectations and Contributes. In Proceedings of the "Noise in Europe" Conference, European Commission, Brussels, Belgium, 24 April 2017. Available online: https://ec.europa.eu/info/events/noise-europe-2017-apr-24_en (accessed on 17 May 2020).
- [31] Clairbois, J.P., de Roo, F., Garai, M., Conter, M., Defrance, J., Oltean-Dumbrava, C.A., Durso, C.: QUIESST Guidebook to Noise Reducing Devices Optimisation. Report No. FP7-SST-2008-RTD-1. Prepared for the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement n°SCP8-GA-2009-233730. 2012. Available online: [https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid %3A16f7a829-5f5c-4523-ab35-1d6cce015cb1](https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid%3A16f7a829-5f5c-4523-ab35-1d6cce015cb1) (accessed on 10 June 2020).
- [32] Oltean-Dumbrava, C.A., Miah, A., Watts, G., Brero, G., Clairbois, J.P., Padmos, C., Auerbach, M., Hans, J., Schiopu, N.: QUIESST-Deliverable No.6.1 State of the Art Review and Report on the Sustainability of Noise Reducing Devices. Report No. FP7-SST-2008-RTD-1. Prepared for the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement n°SCP8-GA-2009-233730. 2010.
- [33] McAvoy, D.S., Theberge, R.: Comparison and Testing of Various Noise Wall Materials, Report No. FHWA/OH-2014/8, The Ohio Department of Transportation, Office of Statewide Planning & Research: Columbus, Ohio, USA, 2014.
- [34] Shahidan, S., Hannan, N.I.R.R., Maarof, M.Z.M., Leman, A.S., Senin, M.S.: A Comprehensive Review on the Effectiveness of Existing Noise Barriers Commonly Used in the Railway Industry. In MATEC Web Conf. Vol. 87, Proceedings of the 9th International Unimas Stem Engineering Conference (ENCON 2016) "Innovative Solutions for Engineering and Technology Challenges", Sarawak, Malaysia, 26-28 October 2016, Hasan, A., et al., Eds., EDP Sciences: 2017, doi:10.1051/mateconf/20178701007.
- [35] Bendtsen, H.: Noise Barrier Design - Danish and some European Examples, Danish Road Institute, Report 174, 2009
- [36] Ernst, D., Biton, L., Reichenbacher, S., Zgola, M., Adkins, C.: Guidelines for Selection and Approval of Noise Barrier Products. Final Report, Prepared for the National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 25-25, Task 40, Transportation Research Board. 2008. Available online: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/25-25\(40\)_fr.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/25-25(40)_fr.pdf) (accessed on 10 May 2020).
- [37] Lakušić, S.: How to Obtain EU Project Without an EU Partner - Example of RUCONBAR Project From the EU Program CIP ECO-Innovation. In Planning, Design, Construction and Renewal in the Civil Engineering, Proceedings of the INDIS 2012, Novi Sad, Srbija, 28-30 November 2012, Radonjanin, V., Folić, R., Lađinović, Đ., Eds, Publisher: Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Civil Engineering and Geodesy, 2012, pp. 2-15.
- [38] de la Red Bellvis, E.J.: Noise Barriers in Railways—A View on the State of Art. In Proceedings of the RailSpain Congress, Zaragoza, Spain, 14-16 June 2011.

- [39] Clairbois, J.P., Garai, M.: The European Standards for Roads and Railways Noise Barriers: State of the Art 2015. In Proceedings of the 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering: EuroNoise 2015, Maastricht, The Netherlands, 31 May-3 June 2015, pp. 45-50.
- [40] Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele, NN 119/2009
- [41] Pigasse, G., Kragh, J.: Optimised Noise Barriers: A State-of-the-Art Report. Report No. 194-2011. Prepared for the Vejdirektoratet—Danish Road Directorate of Ministry of Transport. 2011. Available online: <https://www.vejdirektoratet.dk/udgivelse/optimised-noise-barriers> (accessed on 5 May 2020).
- [42] Boothby, T.E., Burroughs, C.B., Bernecker, C.A., Manbeck, H.B., Ritter, M.A., Grgurevich, S., Cegelka, S., Hillbrich Lee, P.D.: Design of Wood Highway Sound Barriers. Research Paper FPL-RP-596. Prepared for the United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service. 2001. Available online: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp596/fplrp596.pdf> (accessed on 10 May 2020).
- [43] Ernst, D., Biton, L., Reichenbacher, S., Zgola, M., Adkins, C.: Guidelines for Selection and Approval of Noise Barrier Products. Final Report, Prepared for the National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 25-25, Task 40, Transportation Research Board. 2008. Available online: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/25-25\(40\)_fr.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/25-25(40)_fr.pdf) (accessed on 10 May 2020).
- [44] Öztürk, T., Öztürk, Z., Çalis, M.: A Case Study on Acoustic Performance and Construction Costs of Noise Barriers. Scientific Research and Essays, 7 (2012) 50, pp. 4213-4229, <https://doi.org/10.5897/SRE10.1134>.