

Primljen / Received: 16.9.2016.

Ispravljen / Corrected: 23.12.2016.

Prihvaćen / Accepted: 9.1.2017.

Dostupno online / Available online: 10.2.2017.

Analiza učinkovitosti mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

Autori:



¹Mr.sc. **Aja Tumavičė**
aja.tumavice@vgtu.lt



²Prof.dr.sc. **Alfredas Laurinavičius**
alfredas.laurinavicius@vgtu.lt



¹Izv.prof.dr.sc. **Audrius Vaitkus**
audrius.vaitkus@vgtu.lt



³Izv.prof.dr.sc. **Šarūnas Mikaliūnas**
sarunas.mikaliunas@vgtu.lt



⁴Mr.sc. **Zigmantas Perveneckas**
zigmantas.perveneckas@lra.lt



⁵Izv.prof.dr.sc. **Kęstutis Čiuprinskas**
kestutis.ciuprinskas@vgtu.lt

¹ Tehničko sveučilište Gediminas u Vilniusu, Zavod za prometnu infrastrukturu

² Tehničko sveučilište Gediminas u Vilniusu, Odjel za ceste

³ Tehničko sveučilište Gediminas u Vilniusu, Odjel za doktorske studije

⁴ Ministarstvo prometa i komunikacija Republike Litve

⁵ Tehničko sveučilište Gediminas u Vilniusu, Odjel za energetiku zgrada

Pregledni rad

Aja Tumavičė, Alfredas Laurinavičius, Audrius Vaitkus, Šarūnas Mikaliūnas, Zigmantas Perveneckas, Kęstutis Čiuprinskas

Analiza učinkovitosti mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

U radu je dan pregled mehanizama širenja buke, modela interakcije kotača i tračnica te europski propisi koji se odnose na buku od željezničkog prometa. Opisane su akustične i neakustične mjere za smanjenje razina buke te je procijenjena njihova učinkovitost. Dane su preporuke za definiranje kriterija za njihovo vrednovanje kako bi se u najvećoj mogućoj mjeri prilagodile lokalnim uvjetima. Analizirana je projektna dokumentacija litvanskih i međunarodnih željeznica kako bi se prikazalo koje su mjere zaštite primijenjene na toj lokaciji i kako bi se ocijenila njihova učinkovitost.

Ključne riječi:

interakcija kotača i tračnica, model, buka od kotrljanja, mjere smanjenja razina buke, učinkovitost

Subject review

Aja Tumavičė, Alfredas Laurinavičius, Audrius Vaitkus, Šarūnas Mikaliūnas, Zigmantas Perveneckas, Kęstutis Čiuprinskas

Effectiveness analysis of railway noise mitigation measures

The paper presents an overview of noise propagation mechanisms, wheel–rail interaction models, and the European legislation regulating noise emitted by railway traffic. Acoustic and non-acoustic methods for noise mitigation are described, and their effectiveness is evaluated. Recommendations are given about criteria that can be used for their evaluation so as to ensure the greatest possible level of their compliance with local conditions. The design documentation of Lithuanian international lines is analysed in order to determine noise mitigation measures applied in that region, and to assess their effectiveness.

Key words:

wheel–rail interaction, model, rolling noise, noise mitigation measure, effectiveness

Übersichtsarbeit

Aja Tumavičė, Alfredas Laurinavičius, Audrius Vaitkus, Šarūnas Mikaliūnas, Zigmantas Perveneckas, Kęstutis Čiuprinskas

Analyse der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduktion von Schienenlärm

In dieser Arbeit wird eine Übersicht von Mechanismen der Lärmausbreitung, Modellen der Räder-Schienen-Interaktion sowie europäischer Vorschriften bezüglich Schienenlärm gegeben. Akustische und nichtakustische Maßnahmen zur Lärmreduktion werden beschrieben und im Hinblick auf ihre Wirksamkeit beurteilt. Empfehlungen zur Definition von Kriterien für ihre Beurteilung werden gegeben, um sie so gut wie möglich den lokalen Bedingungen anzupassen. Die Projektdokumentation litauischer und internationaler Eisenbahnen wird analysiert und entsprechende lokale Schutzmaßnahmen werden aufgezeigt sowie hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt.

Schlüsselwörter:

Räder-Schienen-Interaktion, Model, Schienenlärm, Maßnahmen zur Lärmpegelreduktion, Wirksamkeit

1. Uvod

S porastom životnog standarda i poboljšanjem kvalitete življenja ubrzava se proces urbanizacije i povećava potreba za razvojem prometne infrastrukture, pri čemu buka od prometa postaje sve veći problem, a naročito u gusto naseljenim područjima. Iako je buka od cestovnog prometa najveći izvor buke iz okoliša (oko 90 % stanovništva pod je utjecajem razina buke većih od 65 dB(A)), utjecaj buke od željezničkog prometa također nije zanemarljiv (oko 1,7 % stanovništva je pod utjecajem razina buke većih od 65 dB(A)) [1], a posebice u gusto naseljenim područjima kroz koja željeznice prolaze. Istraživanje provedeno u zoni željezničkog kolodvora Paneriai u Litvi pokazalo je da su na toj lokaciji razine buke za 8 dB(A) više od dopuštenih [2]. Na takvim je lokacijama potrebno primijeniti odgovarajuće mjere zaštite kako bi se okolna naselja zaštitila od štetnog utjecaja buke zbog željezničkog prometa. Problem je što te mjere nisu uvijek prilagođene lokalnim uvjetima područja u kojima se primjenjuju. Cilj je ovog istraživanja da se procjenom lokalnih uvjeta definiraju kriteriji za odabir optimalnih mjera zaštite od buke zbog željezničkog prometa. Kako bi se definirala optimalna rješenja, u radu su razmatrani mehanizmi širenja buke i modeli interakcije kotača tračničkih vozila i tračnica. Analizirani su i europski propisi koji se odnose na buku od željezničkog prometa. Opisane su akustične i neakustične mjere za zaštitu od buke te je ocijenjena njihova učinkovitost.

U Litvi se upravo gradi nekoliko dionica željezničke pruge RAIL BALTICA, koja čini sastavni dio paneuropskog koridora I (Varšava-Kaunas-Riga-Tallinn-Helsinki). Izgradnja te željezničke pruge je nužna radi boljeg povezivanja s drugim europskim zemljama. RAIL BALTICA prolazi kroz nekoliko gusto naseljenih područja u kojima je potrebno primijeniti mjere za smanjenje razina buke (barijere za zaštitu od buke, zamjena prozora, i sl.). U budućnosti je planirana izgradnja još nekoliko dionica ove željezničke pruge. Stoga je posebno važno ocijeniti postojeće mjere zaštite kako bi se odredile najpovoljnije koje će se primjenjivati u budućnosti. Glavni problem je taj što se mjere zaštite često ne odabiru i ne provode pravilno. Na primjer, barijere za zaštitu od buke jesu učinkovite, no njihova primjena često nije u skladu s lokalnim uvjetima područja u kojima se izvode. Dodatno, barijere se često nepravilno projektiraju i ugrađuju.

U radu su definirani kriteriji za ocjenu mjera o zaštiti od buke kako bi se ocijenilo jesu li mjere sadržane u projektnoj dokumentaciji učinkovite i u drugim okolnostima. Ti su kriteriji najčešće primijenjeni u projektiranju litvanskih željeznica. Ocijenjeno je i kako prosječna deklarirana (projektirana) učinkovitost različitih materijala od kojih se izrađuju barijere za zaštitu od buke na željezničkoj pruzi RAIL BALTICA ovisi o udaljenosti barijere od osi kolosijeka.

2. Mehanizam i modeli buke uslijed interakcije kotača tračničkih vozila i tračnica

Buka od željezničkog prometa je najčešće uzrokovana interakcijom kotača tračničkih vozila i tračnica. Ta se buka, s obzirom na njezin uzrok, može podijeliti u tri grupe [3].

1. Buka od kotrljanja. Uzrok buke od kotrljanja, koja se javlja na dijelovima pruge u pravcu zbog neravnosti kotača i površine tračnice, pa nastaju relativne okomite vibracije. Buka od kotrljanja je u osnovi linearan proces.
2. Buka uslijed udara. To je teži oblik buke od kotrljanja. Takva buka nije linearni proces. Javlja se zbog pukotina (oštećenja) na površini kotača ili tračnice.
3. Buka cviljenja. Taj se oblik buke javlja u krivinama malih polumjera zbog bočnih sila između kotača vozila i tračnica.

Townes i drugi [4] buku koja nastaje uslijed međudjelovanja kotača tračničkog vozila i tračnica kategoriziraju nešto drugačije:

- buka kod kolosijeka u pravcu
- buka kod kolosijeka u krivini
- buka od udara koja se javlja na spojevima, na mjestima posebnih radova na kolosijeku i sl.

Buka od kotrljanja, čija frekvencija uobičajeno iznosi od 100 Hz do 5 000 Hz, javlja se češće od drugih oblika buke - one od udara ili cviljenja [5]. Četiri mehanizma nastajanja jednostavne buke od kotrljanja su [4]:

- neravnost kotača i tračnica
- razlike u parametrima ili modulima heterogenosti
- puzanje
- buka uslijed utjecaja aerodinamike.

Buka od kotrljanja, koja je primarni izvor buke od željezničkog prometa, razmatra se kasnije u radu. Buka od kotrljanja nastaje na mjestu kontakta kotača vozila i tračnice. Buku uzrokuje i tračnica i kotač [1]. Neravnost kotača i tračnice uzrokuje okomite (relativne) pomake između ta dva elementa [1, 6]. Okomite vibracije visoke frekvencije javljaju se na mjestu kontakta te prenose u obje strukture. Strukture vibriraju i prenose buku u okoliš [1].

Standardni linearni model širenja buke od kotrljanja na mjestu kontakta kotača i tračnice je paralelni model impedancije. Taj je model prikladan za normalnu buku od kotrljanja, u slučaju kada su kotači i tračnice u dobrom stanju. Ipak, ovaj model ne uključuje brojne situacije: nelinearne procese uzrokovane velikom neravnošću, bočne sile itd. [4].

Sustav kotač-tračnica sastoji se od dva dinamička sustava koji djeluju u točki i utječu jedan na drugoga prilikom pojave relativnog pomaka. Usporedno s tim sustavima javlja se i kontaktna opruga, koja je zaseban sustav [4].

Dva su glavna modela buke uzrokovane interakcijom kotača vozila i tračnica: model frekvencijskog područja i model vremenskog područja. Najiscrpniji i najšire primjenjivan model frekvencijskog područja razvio je P. Remington prije 40 godina. Kasnije je taj model unaprijedio D. J. Thompson. Frekvencijsko područje je linearni model koji ne ovisi o vremenu [7]. Taj se model zasniva na pretpostavci da međudjelovanje neravnosti površine tračnice i neravnosti površine kotača stvara vibraciju. Na taj način nastaje buka od kotrljanja. Na temelju tog modela razvijen je prije 25 godina

model TWINS (eng. *Track-Wheel Interaction Noise Software*) [5]. Pomoću TWINS modela može se predviđati buka kotača i kolosijeka (tračnica i pragova) koja se stvara prilikom prolaska vlakova. U TWINS model se mogu uključiti različiti teorijski modeli kako bi se ocijenili neravnost, interakcija kotača i tračnica, dinamička svojstva kotača, dinamička svojstva kolosijeka i širenje zvuka [6].

Provedena su brojna ispitivanja s ciljem provjere pouzdanosti predviđanja TWINS modela. Rezultati ispitivanja su sljedeći: ukupna razlika između izmjerene i predviđene razine buke relativno je mala [8-10]. Razlika između izmjerene i predviđene buke iznosi oko 2 dB, dok je standardna devijacija oko 2,0 dB [8, 9].

Kasnije je na tom modelu napravljeno nekoliko izmjena, kao što su mogućnost modeliranja tračnica na betonskim pločama, štitova na podvozju te niskih barijera koje se postavljaju uz tračnice [11]. Postupak proračuna TWINS modela unaprijeđen je i izradom RRNPS modela (eng. *Railway Rolling Noise Prediction Software*) koji sadrži grafičko korisničko sučelje. Usporedba RRNPS i TWINS modela je pokazala da se i RRNPS model može koristiti za predviđanje razina buke na europskim željeznicama. Taj se model može koristiti i za ocjenu dinamičkih svojstava podložnih pločica, i sl. [12].

Model frekvencijskog područja je prikladan za predviđanje buke od kotrljanja, a za predviđanje buke cviljenja i buke od udara (uslijed veće neravnosti i neujednačene površine tračnica) često se upotrebljava i model vremenskog područja [13]. Unutar oba se modela određena svojstva mogu uključiti i isključiti, npr. pojedinačni oslonci, parametarska pobuda i nelinearna kontaktna opruga [7]. U modelu frekvencijskog područja razina buke se relativno jednostavno i brzo računa. S druge strane, taj model ne uključuje nelinearne procese. Model vremenskog područja, koji uključuje i nelinearne procese, razvio je M. Heckl prije više od 20 godina.

Model vremenskog područja zasniva se na modeliranju s konačnim elementima [14]. Taj model može uključivati nelinearne procese svih vrsta. Nelinearni procesi primjenjuju se u slučaju velike neravnosti i/ili niskih statičkih predopterećenja [15]. Hertzov nelinearni kontaktni model se može primijeniti, no on daje manje realistične rezultate od diskretnog kontaktnog područja koje u obzir uzima i neravne površine. Kotač je kruto tijelo [7].

RRNPS model se može koristiti kao alat za predviđanje u istraživanju novih strategija za kontrolu i smanjenje razina buke od kotrljanja uslijed porasta naboranosti i neravnosti tračnica [16]. TWINS model se često koristi pri kreiranju novih elemenata koji proizvode tihe zvukove, npr. zvukove kotača, tračnica i dampera na kotačima. Također se koristi za vrednovanje učinkovitosti tih elemenata. TWINS i njemu slični modeli mogli bi se u budućnosti mogli koristiti za virtualna ispitivanja, koja bi mogla biti adekvatna zamjena za ona stvarna. TWINS model je osnova za izradu novih propisa koji se odnose na buku od željezničkog prometa, npr. Uredba Komisije (EU) br. 1304/2014 [5].

3. Propisi o buci od željezničkog prometa

Brojni propisi (neakustične mjere za smanjenje razina buke) doneseni su u nastojanju da se buka od željezničkog prometa i njezin štetan utjecaj na okoliš smanje. Direktiva 2008/57/EC [17] definira osnovne zahtjeve s aspekta utjecaja na okoliš: utjecaj željezničkog sustava na okoliš mora se procijeniti u fazi projektiranja. Dodatno, željezničke pruge moraju zadovoljiti sve uvjete vezane uz emisiju buke propisane postojećom regulativom.

Direktiva 2002/49/EC [18] nalaže da sve zemlje članice Europske unije moraju izraditi strateške karte buke. Europska komisija je 23. prosinca 2005. godine donijela odluku 2006/66/EC o tehničkoj specifikaciji za interoperabilnost podsustava "željeznička vozila - buka" transeuropskog konvencionalnog željezničkog sustava [19]. Tehnička specifikacija za interoperabilnost se koristi za mjerenje i reguliranje buke koju stvaraju teretni vagoni, lokomotive, željeznička vozila u nizu te putnički vagoni. U priopćenju Europske komisije Europskom parlamentu i Vijeću "Mjere za smanjenje buke od željezničkog prometa koje se odnosi na postojeća željeznička vozila" [20] navodi se da je najbolje rješenje za modernizaciju svih europskih teretnih vagona kombinirana primjena diferenciranih pristojbi koje se određuju ovisno o razini buke koju proizvedu izrazito bučna vozila prilikom korištenja željeznice, te proizvoljnih obaveza.

Podsustav "željeznička vozila - buka" TSI [21] odnosi se na sva željeznička vozila. U TSI-u su dane maksimalne dopuštene vrijednosti razine buke za različite tipove buke. Dodatno, TSI podsustav Kontrola-naredba i signalizacija [22] i TSS podsustav Kontrola, upravljanje i signali [23] propisuju da kontrolno-upravljačka oprema mora ispunjavati sve uvjete vezane uz emisiju buke propisane postojećom regulativom.

Svaka zemlja članica Europske unije propisuje vlastite dopuštene vrijednosti razina buke koje imaju negativan utjecaj na okoliš (tablica 1.).

Sadašnje dopuštene vrijednosti razina buke koje propisuju pojedine europske zemlje upućuju na to da te zemlje primjenjuju različite indikatore za ocjenu buke. Različite europske zemlje definiraju i različite dopuštene vrijednosti razina buke za iste indikatore. U nekim se zemljama postavljaju različiti zahtjevi za različite vrste prometa, dok se u drugim zemljama za buku od cestovnog i željezničkog prometa postavljaju isti zahtjevi. U određenim zemljama dopuštene razine buke ovise i o području i objektima koje treba štititi.

Prema litvanskoj normi HN 33:2011 [26], dopuštene vrijednosti razina buke se određuju mjerenjem i/ili modeliranjem. Rezultati mjerenja buke se uspoređuju s dopuštenim vrijednostima (tablica 11.). Postojeći litvanski propisi pomalo su nedosljedni. Prema normi HN 33:2011 [26] promjenjiva buka se u fazi projektiranja ocjenjuje pomoću ekvivalentne razine zvučnog tlaka u jedinici vremena ili pomoću godišnjih indikatora buke L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$ i L_{night} .

Tablica 1. Dopuštene vrijednosti razina buke u nekim državama Europske unije [24-28]

Zemlja	Područje primjene	L_{den} [dB(A)]	L_{day} [dB(A)]	$L_{evening}$ [dB(A)]	L_{night} [dB(A)]	L_{AeqT} [dB(A)]	L_{Amax} [dB(A)]
Austrija ¹	buka od željezničkog prometa	–	70	–	60	65-70 $L_{Aeq(day)}$ 55-60 $L_{Aeq(night)}$	–
Belgija (Flamanska regija)	buka od željezničkog prometa (vanjska)	–	–	–	–	40-60 $L_{Aeq(7-19)}$ 35-55 $L_{Aeq(19-22)}$ 30-55 $L_{Aeq(22-7)}$	–
Belgija (Valonska regija)	buka od željezničkog prometa (vanjska)	–	–	–	–	50-60 $L_{Aeq(7-19)}$ 45-55 $L_{Aeq(6-7&19-22)}$ 40-50 $L_{Aeq(22-6)}$	–
Belgija (Briselska regija)	buka od željezničkog prometa (vanjska)	–	–	–	–	65 (70) ² $L_{Aeq(7-22)}$ 60 (65) ² $L_{Aeq(22-7)}$	–
Danska ¹	buka od željezničkog prometa	–	–	–	–	63 $L_{Aeq(24h)}$ ³	85 ³
Estonija ⁴		–	–	–	–	–	–
Finska	buka od željezničkog prometa	–	–	–	–	58 $L_{Aeq(day)}$ 53 $L_{Aeq(night)}$	–
	stambena područja, i sl.	63	–	–	52	–	–
	nova stambena područja, i sl.	63	–	–	47	–	–
	naselja za odmor i sl.	53	–	–	42	–	–
Francuska	buka od željezničkog prometa	73	–	–	65	63 (60) ⁵ $L_{Aeq(day)}$ 58 (55) ⁵ $L_{Aeq(night)}$	–
Njemačka ¹	buka od željezničkog prometa	–	–	–	–	67 $L_{Aeq(day)}$ 57 $L_{Aeq(night)}$	–
Grčka	buka od željezničkog prometa	–	–	–	–	–	–
Mađarska	buka od željezničkog prometa	63	–	–	55	–	–
Latvija	buka od željezničkog prometa: stambena područja (sa samostojećim kućama), i sl.	–	50	45	40	–	–
	za stambena područja, i sl.	–	55	50	45	–	–
	za područja sa zgradama mješovite namjene	–	60	55	45	–	–
	za poslovna područja, javna područja, i sl.	–	60	55	50	–	–
Litva	stambene zgrade (kuće) i zgrade javnih službi (osim onih ugostiteljske i kulturne namjene) pod utjecajem prometne buke	65	65	60	55	65 $L_{Aeq(6-18)}$ 60 $L_{Aeq(18-22)}$ 55 $L_{Aeq(22-6)}$	70 $L_{Aeq(6-18)}$ 65 $L_{Aeq(18-22)}$ 60 $L_{Aeq(22-6)}$
Poljska	buka od željezničkog prometa: zdravstveni centri, bolnice smještene izvan gradova	–	50 L_{DWN}	–	45 LN	50 $L_{Aeq D}$ 45 $L_{Aeq N}$	–
	obiteljske kuće, bolnice smještene u gradovima, i sl.	–	64 L_{DWN}	–	59 LN	61 $L_{Aeq D}$ 56 $L_{Aeq N}$	–
	obiteljske kuće s više obitelji, rekreacijska područja izvan gradova, i sl.	–	68 L_{DWN}	–	59 LN	65 $L_{Aeq D}$ 56 $L_{Aeq N}$	–
	gradski centri (grad > 100 000 stanovnika)	–	70 L_{DWN}	–	65 LN	68 $L_{Aeq D}$ 60 $L_{Aeq N}$	–

Tablica 1. Dopuštene vrijednosti razina buke u nekim državama Europske unije [24-28] - nastavak

Zemlja	Područje primjene	L_{den} [dB(A)]	L_{day} [dB(A)]	$L_{evening}$ [dB(A)]	L_{night} [dB(A)]	L_{AeqT} [dB(A)]	L_{Amax} [dB(A)]
Portugal	buka od željezničkog prometa: zone osjetljive na buku (stambena područja, bolnice, škole)	55	–	–	45	–	–
	miješana zona, i sl.	65	–	–	55	–	–
	područja koja općina još nije klasificirala	63	–	–	53	–	–
	linija projektirana prilikom definiranja zone osjetljive na buku	60	–	–	50	–	–
Slovačka	buka od željezničkog prometa	60	–	–	50	–	–
Slovenija	buka od željezničkog prometa: za područja osjetljiva na buku (bolnice, i sl.)	–	54 (57) ²	–	44 (47) ²	–	–
	za područja manje osjetljiva na buku (isključivo stambena područja, itd.)	–	59 (63) ²	–	49 (53) ²	–	–
	Za područja manje osjetljiva na buku (poljoprivredna područja, i sl.)	–	64 (69) ²	–	54 (59) ²	–	–
	za područja koja nisu osjetljiva na buku (industrijska područja, i sl.)	–	69 (80) ²	–	59 (70) ²	–	–
Švedska	buka od željezničkog prometa	–	–	–	–	58 $L_{Aeq(24h)}$	45 L_{Amax} (unutarnja)
Nizozemska ¹	buka od željezničkog prometa	–	–	–	57	63 $L_{Aeq(day)}$ 58 $L_{Aeq(evening)}$ 53 $L_{Aeq(night)}$	–

¹ Za željeznice + 5 dB(A), ako se uspoređuje s dopuštenim razinama buke od cestovnog prometa. ² Novi izvori buke (trenutni izvori buke).
³ Nova željeznička linija. ⁴ Pojedinačne razine buke koje ovise o lokalnim uvjetima. ⁵ Vrijednosti u zagradama se odnose na linije TGV-a.
– podaci nisu dostupni.

Nakon izgradnje, promjenjiva buka se ocjenjuje pomoću ekvivalentne razine zvučnog tlaka (L_{AeqT}) i maksimalne razine zvučnog tlaka (L_{AFmax}). U fazi projektiranja učinkovitost mjera za smanjenje razina buke ocjenjuje se pomoću godišnjih indikatora buke L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$ i L_{night} , pa procjenitelju nije u potpunosti jasno kako tu učinkovitost provjeriti.

U Litvi postoji poseban slučaj TSI podsustava "željeznička vozila - buka" [21] u slučaju kada je širina kolosijeka 1520 mm. Za željeznička vozila koja koriste taj tip kolosijeka mogu se primijeniti nacionalni propisi.

4. Klasifikacija mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

4.1. Akustična klasifikacija mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

U svijetu se primjenjuju brojne mjere za smanjenje razina buke koje su usmjerene na izvor buke, put širenja buke te susjedne objekte. Na primjer, buka koja nastaje uslijed međudjelovanja

kotača vozila i tračnica može se smanjiti povećanjem područja kontakta između kotača i tračnica ili smanjenjem tvrdoće kontakta (smanjenje od 5 do 10 dB) [29]. Mjere za smanjenje razina buke se mogu koristiti i istovremeno, npr. preklapajuće barijere (štitovi na podvozju s niskim barijerama uz tračnice). Istraživanja u kojima je ispitivana učinkovitost niskih barijera ugrađenih uz tračnice zajedno sa štitovima na podvozju pokazala su da se najveća učinkovitost postiže u slučaju njihove istovremene primjene [30].

U tablici 2. su prikazane akustične i neakustične mjere za smanjenje razina buke. U skladu s međunarodnom praksom prikazana je i njihova očekivana učinkovitost.

Može se uočiti da je raspon raspoloživih mjera za smanjenje razina buke prilično širok. Mjere se mogu odabirati ovisno o tome koji tip buke se treba smanjiti. Na dijelu kolosijeka u pravcu prigušivači nisu naročito učinkoviti, no zato su učinkoviti u krivinama malih polumjera gdje smanjuju buku cviljenja. Na dijelovima kolosijeka u pravcu nije potrebno brusiti tračnice ili provoditi strojnu obradu kotača ako su tračnica i kotači u dobrom stanju [4].

Tablica 2. Mjere za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

Metoda	Grupa	Element	Mjera za smanjenje razina buke	Očekivana učinkovitost	
Akustične metode	na izvoru	željezničko vozilo	zamjena kočničkih blokova	8-10 dB(A) [31]	
			izgled kotača (oblik, promjer, itd.)	0-6 dB(A) [32]	
			materijal kotača (elastični, više materijala, itd.)	5-10 dB(A) [33]	
			prigušivači na kotačima	1-3 dB(A) ¹ [31]	
			mazalice ugrađene na vozilo [30]	–	
			učinkovito prigušenje ispušne buke dizelske lokomotive, rashladni sustavi koji emitiraju šum, kontrola buke smanjenjem udaljenosti od izvora do prijarnika (prigušivači, aktivni sustavi za kontrolu)	do 13 dB(A) [32]	
			poklopci	0-10 dB(A) [32]	
			pantografi koji proizvode malo buke (u električnim vlakovima za velike brzine), optimizacija oblika glave pantografa, specijalni materijali kao što je porozni premaz pantografa, postavljanje oklopa, itd.)	do 4 dB(A) ⁸ [32]	
			redovno održavanje (brušenje kotača, pregled kotača)	do 20 dB(A) [32]	
		kolosijek i donji ustroj ²	projektiranje kolosijeka (različite konstrukcije kolosijeka, itd.)	–	
			prigušivači na tračnicama	1-3 dB(A) ¹ [31]	
			sustavi za podmazivanje tračnica i mazalice [32]	–	
			elastični kolosijek (elastične podložne pločice, specijalni damperi na tračnicama, itd.) [34]	–	
			izbjegavanje oštih pomaka u zastoru ili kolosijeku [34]	–	
			zvučna apsorpcija nasipa sa sustavom pozitivne retencije	0-5 dB(A) [32]	
			kolosijek s betonskim umjesto s drvenim pragovima	1-3 dB(A) [35]	
			kolosijek sa zastornom prizmom i pragovima umjesto betonske podloge	4-5 dB(A) ³ [4]	
			kolosijek bez sastava	0-5 dB(A) ⁴ [32]	
			promjena lokacije signala u područjima osjetljivima na buku, itd. [25]	–	
	redovno održavanje (brušenje tračnica, itd.)	do 20 dB(A) [31]			
	na putu širenja	–	barijere (zidovi, nasipi, barijere modificiranog ruba, gabioni, nasadi, rovovi, usjeci, itd.) ⁵	0-15 dB(A) [31]	
			zatvoreni prostori	10-30 dB(A) ⁶ [31,36]	
		na susjednim objektima	–	izolacija prozora	10-30 dB(A) ⁷ [31]
				izolacija fasade (zeleni zid, dvostruka fasada, itd.)	–
				izolacija vrata	0-10 dB(A) [32]
	Neakustične metode	–	propisi	direktive o buci, granične vrijednosti, akcijski planovi, itd. [32]	–
		–	socioekonomske mjere	društvene mjere (obrazovanje javnosti, edukacija osoblja, itd.)	–
			ekonomske mjere (naplata korištenja željezničke infrastrukture izrazito bučnim vozilima, financijski poticaji, kompenzacija, itd.)	–	
–		prostorno planiranje i upravljanje	objekti udaljeni od izvora, oblikovanje objekta, položaj objekta (sobe), oblik i položaj zidova, orijentacija zgrade, uređenje parkova i zelenih površina, podjela u zone, objekti koji nisu osjetljivi na buku (npr. barijere za zaštitu od buke), itd.	do 20 dB(A) [32]	
na izvoru		kontroliranje željezničkog	ograničenje brzine vožnje vlakova, prometno planiranje, usmjeravanje prometa	do 20 dB(A) [32]	
na izvoru	projektiranje kolosijeka	korištenje alternativnih kolosijeka (koji su udaljeni od područja osjetljivih na buku) [25]	–		

¹ 4 do 8 dB(A) [37]. ² može se primijeniti posebna tehnologija željezničkih sustava, npr. princip magnetske levitacije ili elektrifikacija željeznice; ³ može se primijeniti poseban tip kolosijeka na krutoj podlozi, npr. zatvoreni kolosijek, elastične podložne ploče; obloženi pragovi kao što je sustav RHEDA, plutajući pločasti kolosijeci kao što je "Shinkansen", itd. [32]. ⁴ 2 do 10 dB(A) [33]. ⁵ može se primijeniti više mjera, npr. štitovi na podvozju zajedno s niskim barijerama postavljenim uz tračnice - do 10 dB(A) [34,37]. ⁶ u nekim se slučajevima buka može ukloniti u cijelosti; ⁷ 0 do 40 dB(A) [33]. ⁸ zaklanjanje pantografa – 5 do 10 dB(A) [34].

4.2. Mjere za smanjenje razina buke u projektnoj dokumentaciji litvanskih željeznica

U fazi planiranja/projektiranja mjera za zaštitu od buke, na dionici Kyviškės-Valčiūnų zaobilaznice željezničkog koridora IX B Vilnius i dionicama Kyviškės-Vaičiūnai i Vaidotai (Pušynas)-Paneriai, promjenjiva buka je ocijenjena pomoću ekvivalentne razine zvučnog tlaka u referentnom vremenskom intervalu L_{AeqT} . U projektnoj dokumentaciji dionice Naujoji Vilnia-Kaišiadorys i dionice Marijampolė-

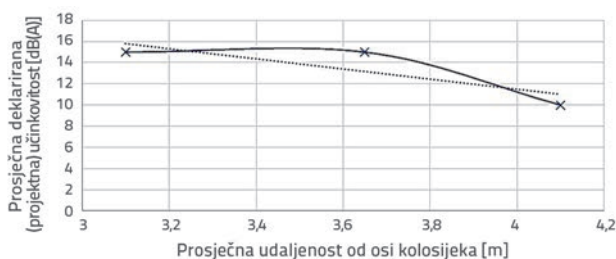
Šeštokai željezničke pruge RAIL BALTICA, promjenjiva buka je ocijenjena primjenom indikatora L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$ i L_{night} . Mjere za smanjenje razina buke i njihova deklarirana (projektna) učinkovitost u projektnoj dokumentaciji litvanskih željeznica (dionica Kyviškės-Valčiūnų na zaobilaznici željezničkog koridora IX B Vilnius, dionica Kyviškės-Vaičiūnai i Vaidotai (Pušynas)-Paneriai, dionica Naujoji Vilnia-Kaišiadorys, dionica Marijampolė-Šeštokai na željezničkoj pruzi RAIL BALTICA) prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Mjere za smanjenje razina buke u projektnoj dokumentaciji litvanskih željeznica

Projektirane mjere za smanjenje razina buke	Karakteristike mjera za smanjenje razina buke ¹	Deklarirana (projektna) učinkovitost mjera za smanjenje razina buke
RAIL BALTICA (ŽELJEZNIČKA DIONICA MARIJAMPOLĖ-ŠEŠTOKAI)²		
Barijera od neprozirnih aluminijskih apsorbirajućih panela	H = 2,0 m; L = 3,1 ³ -4,5 m	10-15 dB(A)
Barijera od prozirnih apsorbirajućih panela	H = 2,0-4,0 m; L = 4,2-9,6 m	2-20 dB(A)
Barijera od blokova tipa 'Durisol'	H = 2,0-3,5 m; L = 3,8-15 m	2-15 dB(A)
DIONICA KYVIŠKĖS-VALČIŪNŪ NA ZAIBILAZNICI ŽELJEZNIČKOG KORIDORA IX B VILNIUS		
Barijera od aluminija (1) ili barijera od aluminija (do 1 m visine) i prozirne plastike (2)	(1) H = 3,0-3,5 m; L = 4,0 m (2) H = 2,8 m; L = 4,0 m	25 dB(A)
Barijera od aluminija (1) ili barijera od aluminija (do 1 m visine) i prozirne plastike (2)	(1) H = 3,5 m; L = 3,8 m (2) H = 2,8 m; L = 3,8 m	30 dB(A)
Nasip na kojem su posađeni glog, oskoruša i drač	H = 5 m, širina-26/6	> 20 dB(A)
Drvodred tuja	Visina tuja H = 1,8 m posađenih na međusobnom razmaku od 1 m	5 dB(A)
Prozori s izolacijom i akustičnim oduškom		30 dB(A)
ŽELJEZNIČKA DIONICA NAUJOJI VILNIA-KAIŠIADORYS		
Barijera	H = 1,5-4,0 m	5-15
Dionice s prigušivačima na tračnicama	-	3 dB za putničke vlakove i 4 dB za teretne vlakove
Zamjena kočničkih blokova		8-10 ⁴
ŽELJEZNIČKE DIONICE KYVIŠKĖS-VAIČIŪNAI IR VAIDOTAI (PUŠYNAS)-PANERIAI		
Barijera	H = 2,5-3,5 m; L = 3,8 m; apsorpcija na jednoj strani – 0,6.	5-10 dB
Brušenje tračnica		Za teretne vlakove, 4-7 dB; za putničke vlakove, 6-12 dB; i za kombiniranu prugu, 7-8 dB
Zamjena prozora/dodatna stakla		<u>Sve zgrade</u> otvoreni prozori – 10 dB(A) <u>Hale</u> jednostruko staklo (zatvorene) – 20 dB(A) <u>Zidane zgrade</u> jednostruko staklo (zatvoreno) – 25 dB(A) Duplo staklo (zatvoreno) – 35 dB(A)
¹ H – visina mjere za zaštitu od buke [m]. L – udaljenost mjere za zaštitu od buke od osi kolosijeka [m]. ² promatrana projektna dokumentacija uključuje dionice kolosijeka bez sastava, no to nije bilo promatrano prilikom planiranja mjera zaštite. ³ na vijaduktima i mostovima. ⁴ međunarodna praksa.		

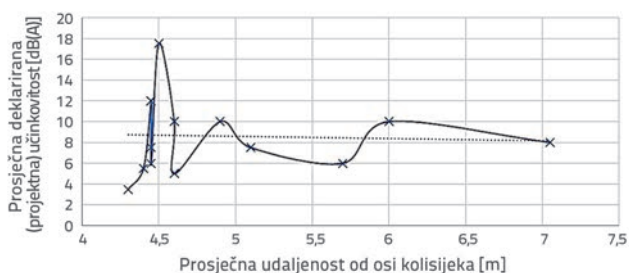
Analizirana je primjena barijera za zaštitu od buke u projektnoj dokumentaciji dionice Marijampolė-Šeštokai željezničke pruge RAIL BALTICA. Na toj su dionici modelirana tri tipa barijera napravljena od različitih materijala: aluminijski apsorbirajući paneli, prozirni apsorbirajući paneli i blokovi tipa "Durisol". Nakon analize tehničkog projekta željeznice, mogu se primijeniti sljedeće modifikacije. Prilikom modeliranja razina buke u blizini stambenih i javnih zgrada, receptori su postavljani na udaljenosti od 1 m od najbliže fasade te na visini većoj od 1,5 m iznad površine terena. Prilikom modeliranja razina buke na višim katovima, na visinu od 1,5 m dodavana su 3 m po katu.

Deklarirana (projektna) učinkovitost barijera za zaštitu od buke izrađenih od različitih materijala, na dionici "Marijampolė-Šeštokai" željezničke pruge RAIL BALTICA, i njihove prosječne udaljenosti od osi kolosijeka prikazane su na slikama 1. do 3.



Slika 1. Prosječna deklarirana (projektna) učinkovitost barijera od neprozirnih aluminijskih apsorbirajućih panela i njihova prosječna udaljenost od osi kolosijeka

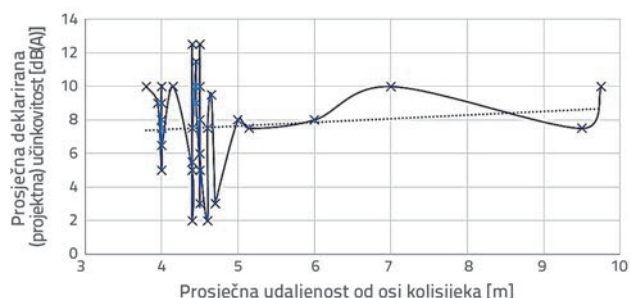
Deklarirana (projektna) učinkovitost barijera od neprozirnih aluminijskih apsorbirajućih panela djelomično ovisi o njihovoj udaljenosti od osi kolosijeka, odnosno o mjestu njihove ugradnje. Barijera ugrađena na najvećoj udaljenosti od osi kolosijeka bila je akustično najmanje učinkovita. S druge strane, na ovoj dionici željezničke pruge RAIL BALTICA izvedene su samo tri barijere ovog tipa pa je moguće da su na njihovu učinkovitost utjecali i drugi parametri, kao što su visina barijere i terena.



Slika 2. Prosječna deklarirana (projektna) učinkovitost barijera od prozirnih apsorbirajućih panela i njihova prosječna udaljenost od osi kolosijeka

Na temelju ocjene deklarirane (projektna) učinkovitosti barijera od prozirnih apsorbirajućih panela može se zaključiti da njihova učinkovitost ne ovisi isključivo o udaljenosti od osi kolosijeka.

Razlog tomu je činjenica što su najučinkovitija (~ 17 dB(A)) i najmanje učinkovita barijera (~ 3 dB(A)) bile gotovo jednako udaljene od osi kolosijeka (najučinkovitija ~4,5 m, a najmanje učinkovita 4,3 m). Iako su njihova udaljenost i materijal bili gotovo isti, učinkovitost im se razlikuje gotovo peterostruko. Štoviše, uočeno je da barijera na relativno velikoj udaljenosti od osi kolosijeka (~ 7 m) ima relativno veliku učinkovitost (~8 dB(A)). S obzirom na navedeno, sljedeći čimbenici trebali bi biti uzeti u obzir prilikom modeliranja: topografski uvjeti, površina terena, objekti (stambeni, javni), lokacija i dimenzije prometnih objekata (ceste, željeznice, itd.), nasadi, bazeni, lokalni atmosferski uvjeti, itd.



Slika 3. Prosječna deklarirana (projektna) učinkovitost barijera izrađenih od neprozirnih blokova tipa "Durisol" i njihova prosječna udaljenost od osi kolosijeka

Na isti se način može ocijeniti deklarirana (projektna) učinkovitost barijera izrađenih od neprozirnih blokova tipa "Durisol" (niti ona zapravo ne ovisi o udaljenosti barijere od osi kolosijeka). Učinkovitost osamnaest takvih barijera, ugrađenih na udaljenostima od 4,4 do 4,6 m od osi kolosijeka, iznosi od 2 dB(A) do 12 dB(A). Jedna je barijera ugrađena na udaljenosti od 9,8 m od osi kolosijeka, a njezina je učinkovitost relativno velika (~10 dB(A)).

Može se zaključiti da učinkovitost barijere ne ovisi isključivo o njezinoj udaljenosti od osi kolosijeka. Visoka učinkovitost može se postići i ugradnjom na velikoj i ugradnjom na maloj udaljenosti od izvora buke. Može se dogoditi i da barijera ugrađena na manjoj udaljenosti od osi kolosijeka bude manje učinkovita. Učinkovitost takve barijere vjerojatno ovisi o drugim uvjetima (terenu, susjednim objektima, itd.).

Može se zaključiti da učinkovitost barijere ponajviše ovisi o vrsti materijala od kojeg je izrađena. Analizom barijera ugrađenih na dionici Marijampolė-Šeštokaia željezničke pruge RAIL BALTICA utvrđeno je da su barijere izrađene od neprozirnih blokova tipa "Durisol" najmanje učinkovite (~7,6 dB(A)). Nešto veću prosječnu učinkovitost imaju barijere s transparentnim apsorbirajućim panelima (~8,6 dB(A)), dok su najučinkovitije barijere s neprozirnim aluminijskim apsorbirajućim panelima (~13,3 dB(A)). Ipak, potrebno je uzet u obzir da barijere s prozirnim apsorbirajućim panelima imaju brojne prednosti: osiguravaju bolju preglednost (npr. na raskrižjima); dobre su za primjenu u stambenim zonama kako stanovnici ne bi imali pogled na zid, itd.

5. Preporuke za odabir mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa

Na temelju ocjene mjera za smanjenje razina buke prikazanih u radu može se zaključiti da se izvori buke i mjere za smanjenje razina buke mogu značajno razlikovati. Stoga je vrlo važno odabrati optimalnu mjeru koja odgovara lokalnim uvjetima područja u kojem se ona primjenjuje. U praksi se mjere za smanjenje razina buke često odabiru na temelju kriterija učinkovitosti, odnosno prema tome koliko se od njih očekuje da će smanjiti razinu buke. Uočeno je da se ne mogu sve mjere ocjenjivati prema kriteriju učinkovitosti. Takav način ocjenjivanja otežava vrednovanje prolongiranih neakustičnih mjera za smanjenje razina buke (socioekonomske mjere, prostorno planiranje i upravljanje, itd.). Stoga je prilikom odabira mjere za smanjenje razina buke vrlo važno uzeti u obzir i druge kriterije, kao što su prometna sigurnost i ekonomski kriteriji.

Predlaže se da se ocjenjivanje mjera za smanjenje razina buke provede primjenom smjernica danih u tablici 4. U toj su tablici sadržane mjere koje se najčešće koriste pri projektiranju litvanskih željeznica.

Najpopularnija mjera za smanjenje razina buke u projektnoj dokumentaciji litvanskih željeznica jesu barijere za zaštitu od buke (tablica 3.). Ta je mjera akustično djelotvorna (0-15 dB(A)). S druge strane, ta mjera ima i negativne aspekte ukoliko se ocjenjuje prema drugim kriterijima. Kao što je prikazano u tablici

4., ugradnja i održavanje barijera prilično su skupi. Barijera može smanjiti preglednost u zoni raskrižja, a posebice ako je neprozirna. Čak i prozirna barijera može odopuštiti preglednost u slučaju određenih lokalnih uvjeta, npr. uslijed rose, snijega ili pojave blata. Barijere mogu narušiti prirodan izgled okoliša, a naročito ako se prilikom njihova projektiranja inženjeri ne konzultiraju s arhitektima, itd.

Druge mjere za smanjenje razina buke (npr. dionice s prigušivačima na tračnicama, brušenim tračnicama, itd.) u Litvi se rijetko projektiraju, pripremaju i primjenjuju. Neke se mjere rijetko primjenjuju na željeznicama, npr. mjere ekonomske i mjere prostornog planiranja (naplata pristojbi izrazito bučnim vozilima prilikom korištenja željezničke infrastrukture, financijske potpore, itd.). U budućnosti bi se potreba i mogućnost primjene drugih mjera trebale analizirati ocjenom drugih kriterija. S obzirom na činjenicu da je buka od kotrljanja koja nastaje uslijed interakcije kotača vozila i tračnica primarni izvor buke od željezničkog prometa, izuzevši utjecaj ravnosti (zamjenom prednjih kočnih sustava željezničkih vozila, konstantnim održavanjem tračnica i kotača - ravnanjem kotača i brušenjem tračnica), potrebno je razmotriti ne bi li umjesto uobičajenih barijera za zaštitu od buke bilo bolje primjenjivati niske barijere. Niske barijere se ugrađuju uz tračnice jer buka od kotrljanja nastaje u razini tla odnosno kolosijeka. Takve barijere su najučinkovitije uz primjenu štitova na podvozju.

Tablica 4. Ocjena mjera za smanjenje razina buke u projektnoj dokumentaciji litvanskih željeznica ovisno o različitim kriterijima

Kriterij	Mjere za smanjenje razina buke							
	zamjena prozora / dodatna stakla	barijera	nasip s nasadima	drvored tuja	dionice s prigušivačima na tračnicama	zamjena kočionih blokova (npr. LL - blokovi)	brušenje tračnica	kolosijek bez sastava (dugi trak tračnica)
Učinkovitost (projektna ili međunarodna praksa), dBA	0-30 (40) ¹	0-15	0-15	5 ²	0-6	8-10	1-3	0-10
Prometna sigurnost	0	- ³	- ⁴	- ⁴	0	0 ⁵⁾	0	0
Troškovi (ugradnja i održavanje)	Prosječni	Značajni	Prosječni	Prosječni	Značajni	Značajni	Prosječni	Značajni
Društvena prihvatljivost	+	- ⁷	+	+	0	0	0	0
Primjenjivost	+ ⁸	+ ⁹	- ¹⁰	- ¹¹	+	+	+	+
Utjecaj na okoliš	0 ¹²	- ¹³	+	+	0	0	0	0

¹ Djelotvorno samo nakon zatvaranja prozora ili pri korištenju posebnih otvora za ventilaciju. ² Da bi se ostvarila učinkovitost, pojas vegetacije mora biti širok, vrlo visok i debeo. ³ Preglednost na raskrižjima može biti narušena ako je barijera visoka. Preglednost može biti narušena i slučaju djelomično ili potpuno prozirnih barijera, naročito ako je panel zamagljen. ⁴ Preglednost na raskrižjima može biti narušena;

⁵ Sustavi kočnica se moraju testirati radi sigurnosti. ⁶ Može ograničiti prelazak pješaka preko kolosijeka. Može stvoriti vizualno zagađenje te zaklanjati pogled. Djelomično ili potpuno prozirne barijere su društveno prihvatljivije. ⁸ Štiti zgradu samo ako je pravilno zvučno izolirana;

⁹ Štiti i okolinu oko zgrade, npr. dvorište. ¹⁰ Zauzima mnogo prostora. ¹¹ Pojas vegetacije se mora proširiti kako bi se povećala učinkovitost.

¹² Može čak biti pozitivan – na taj se način mogu instalirati otporniji prozori čime smanjuje gubitak topline.

¹³ Može stvoriti vizualno zagađenje, naročito ako ih nisu oblikovali arhitekti; može zaustaviti protok zraka (kvaliteta zraka će se smanjiti).

Legenda: + pozitivan utjecaj; - negativan utjecaj; 0 bez utjecaja.

6. Zaključak

Glavni izvor buke od željezničkog prometa je međudjelovanje kotača vozila i tračnica. Stoga je prilikom planiranja mjera zaštite posebno važno uzeti u obzir taj čimbenik. Ispravna ocjena razina buke i pravilan odabir mjera zaštite naročito su važni u gradovima i drugim naseljenim područjima kroz koja prolaze željeznice.

Indikatori za ocjenu buke i dopuštene razine buke od željezničkog prometa variraju od države do države. U nekim zemljama dopuštene razine buke ovise o vrsti prometa, dok druge zemlje propisuju iste dopuštene vrijednosti i za cestovne i za željezničke prometnice. U Litvi je glavni problem u tome što se dopuštene razine buke koje se koriste u fazi projektiranja razlikuju od dopuštenih razina buke koje su propisane za izgrađenu infrastrukturu te ocjenu učinkovitosti primijenjenih mjera zaštite. Dodatni je problem ocjena mjera koje su projektirane primjenom godišnjih indikatora buke L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$ i L_{night} .

Na željeznicama se primjenjuju dvije osnovne metode za smanjenje razina buke: akustične (zamjena kočničkih blokova, uporaba manje bučnih željezničkih vozila, primjena kolosijeka bez zavera i prigušivača na tračnicama, redovno održavanje, barijere za zaštitu od buke, itd.) i neakustične (regulativa, socioekonomske mjere, prostorno planiranje, itd.). Može se zaključiti da postoji mnogo mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa i stoga ih je potrebno ispravno odabrati.

Zidovi za zaštitu od buke najpopularnija su mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa u Litvi. Analizom tehničke dokumentacije dionice "Marijampolė-Šeštokai" željezničke pruge RAIL BALTICA utvrđeno je da vrsta i materijal barijere više

utječu na smanjenje razina buke od njezinog položaja u odnosu na os kolosijeka. Prosječna učinkovitost barijera izrađenih od neprozirnih blokova tipa "Durisol" iznosi oko 7,6 dB(A). Barijere s prozirnim apsorberajućim panelima nešto su učinkovitije (8,6 dB(A)), dok su najučinkovitije barijere s neprozirnim aluminijskim apsorberajućim panelima (13,3 dB(A)).

U fazi projektiranja i modeliranja najčešće se barijere za zaštitu od buke odabiru na temelju njihove učinkovitosti. Nakon detaljne analize najboljih primjera iz prakse, predloženi su dodatni kriteriji za odabir mjera zaštite (prometna sigurnost, mogućnost primjene itd.). Prema tim je kriterijima ocijenjena učinkovitost najpopularnije mjere zaštite - barijera za zaštitu od buke. Utvrđeno je da su barijere skupa mjera, da u određenim slučajevima smanjuju preglednost u zoni raskrižja, te da se ne uklapaju dobro u okoliš. Nadalje, prilikom ocjenjivanja te mjere trebali bi se u obzir uzeti dodatni kriteriji, npr. konkurentnost, prostorni zahtjevi, relativna učinkovitost ocjene neakustičnih metoda, itd.

U Litvi se zasad ne primjenjuje mnogo različitih mjera za smanjenje razina buke od željezničkog prometa. Čak su i primjena prigušivača na tračnicama i brušenje tračnica sasvim rijetki. Kako bi se smanjio štetan utjecaj željeznice na okoliš, preporučuje se primijeniti širi spektar akustičnih (izgled kotača, prigušivači na kotačima, posebne konstrukcije kolosijeka, pričvrtni pribor, itd.) i neakustičnih mjera (socioekonomske mjere, prostorno planiranje i upravljanje, izgled kolosijeka, itd.). S obzirom na činjenicu da je glavni izvor buke od željezničkog prometa međudjelovanje kotača vozila i tračnica, trebalo bi razmisliti o učestalijoj primjeni niskih barijera ugrađenih uz tračnice, kao i štitova na podvozju koji bi mogli znatno povećati učinkovitost takvih barijera.

LITERATURA

- [1] Thompson, D., Jones, C., Gautier, P.E.: Railway noise and vibration, Mechanisms, modelling and means of control, First edition, Oxford, 2009.
- [2] Baltrėnas, P., Butkus, D., Grubliauskas, R.: Experimental research into the dispersion of railway traffic noise in the environment and its modelling, Ekologija, 54 (2008) 2, pp. 81-87.
- [3] Thompson, D.J., Jones, C.J.C.: A review of the Modelling of Wheel / Rail Noise Generation, Journal of Sound and vibration, 231 (2000) 3, pp. 519-536, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2542>
- [4] Townes, M.S., Banks, S.D., Blair, G.L., DeLiberio, S.A., Diridon, R.J., Draggoo, S., Gambaccini, L.J., Hampton, D., Hunter-Zaworski, K., Kiepper, A.F., Larrouse, P., Lingwood, R.G., Linton, G.J., Monroe, D.S., Nettleship, P.S., Paaswell, R.E., Paaswell, R.E., Reichert, J.P., Reuter, L.G., Toliver, P., Watson, L., Wilson, F.J., Wytkind, E., Millar, W.W., Slater, R.E., Francois, F.B., Skinner, Jr.R.E.: Wheel/Rail Noise Control Manual, First edition, Washington, 1997.
- [5] Thompson, D.J.: The role of theoretical models in shaping railway noise policy and mitigation strategies, Australian Acoustical Society Conference 2011: Acoustics 2011, Breaking New Ground, Gold Coast, pp. 1-8, 2011.
- [6] Thomson, D.J., Hemsworth, B., Vincent, N.: Experimental Validation of the Twins Prediction Program for Rolling Noise: Part 1: Description of the model and method, Journal of Sound and Vibration, 193 (1996) 1, pp. 123-135.
- [7] Nordborg, A.: Wheel/rail noise generation due to nonlinear effects and parametric excitation, The Journal of the Acoustical Society of America, 212 (1998) 1, pp. 1772-1781, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00093-6)
- [8] Thompson, D.J., Fodiman, P., Mahe, H.: Experimental Validation of the Twins Prediction Program for Rolling Noise, Part 2: Results, Journal of Sound and Vibration, 193 (1996) 1, pp. 137-147, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0253>
- [9] Jones, C.J.C., Thompson, D.J.: Extended validation of a theoretical model for railway rolling noise using novel wheel and track designs, Journal of Sound and Vibration, 267 (2003), pp. 509-522, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00711-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00711-9)
- [10] Kitagawa, T., Thompson, D.J.: Comparison of wheel/rail noise radiation on Japanese railways using the TWINS model and microphone array measurements, Journal of Sound and Vibration, 293 (2006), pp. 496-509, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.037>

- [11] Talotte, C., Gautier, P.E., Thompson, D.J., Hanson, C.: Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey, *Journal of Sound and Vibration*, 267 (2003) 3, pp. 447-468, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00707-7](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00707-7)
- [12] Jiang, S., Meehan, P.A., Thompson, D.J., Jones, C.J.C.: Railway rolling noise prediction under European conditions, *Australian Acoustical Society Conference 2011, Acoustics 2011, Breaking New Ground, Gold Coast*, pp. 1-8, 2001.
- [13] Knothe, K.L., Grassie, S.L.: Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies, *Vehicle System Dynamics*, 22 (1993), pp. 209-262.
- [14] Grassie, S.L.: Models of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies: Results of Benchmark Test, *Vehicle System Dynamics*, 25 (1996) 1, pp. 243-262, <https://doi.org/10.1080/00423119608969199>
- [15] Pieringer, A.: On the modelling of wheel/rail noise, *AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics, Merano*, pp. 56-59, 2013.
- [16] Jiang, S., Meehan, P.A., Bellette, P.A., Thompson, D.J., Jones, C.J.C.: Validation of a prediction model for tangent rail roughness and noise growth, *9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems, Chengdu*, pp. 261-272, 2012.
- [17] Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community, 2008.
- [18] 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 - Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise, 2009.
- [19] Commission decision (2006/66/EC) concerning the technical specification for interoperability relating to the sub-system 'rolling stock - noise' of the trans-European conventional rail system, 2006.
- [20] Communication from the commission to the European parliament and the council. 2008. Rail noise abatement measures addressing the existing fleet, 2008.
- [21] Commission regulation No 1304/2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock - noise' amending Decision 2008/232/EC and repealing Decision 2011/229/EU, 2014.
- [22] Commission decision (2006/679/EC) concerning the technical specification for interoperability relating to the control-command and signalling subsystem of the trans-European conventional rail system, 2006.
- [23] Commission decision (2012/88/EU) on the technical specification for interoperability relating to the control-command and signalling subsystems, 2012.
- [24] Sainz, M.: Limit values summary. Eionet Forum. ETC Spatial Information and Analysis, http://forum.eionet.europa.eu/etc-sia-consortium/library/noise_database/, 15.03.2016.
- [25] NSW EPA (State of NSW and Environment Protection Authority): Rail Infrastructure Noise Guideline, First edition, Sydney, 2013.
- [26] Lithuanian hygiene norm HN 33:2011. Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje, 2011.
- [27] Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku, 2014.
- [28] Verheijen, E., Elbers, F., Golde, W.: Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways. Part I: National and European legislation and analysis of different noise limit systems, First edition, Utrecht, 2011.
- [29] Remington, P., Webb, J.: Wheel/rail noise reduction through profile modification, *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1996) 1, pp. 335-348.
- [30] Jones, C.J.C., Thompson, D.J., Waters, T.P.: Application of numerical models to a system of train- and track-mounted acoustic shields, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 6 (2001) 4, pp. 185-192.
- [31] Oertli, J., Hubner, P.: Railway noise in Europe. A 2010 report in the state of art, First edition, Paris, 2010.
- [32] Estonian, Latvian & Lithuanian Environment.: Aplinkos triukšmo prevencijos veiksmy organizavimo ir įgyvendinimo pavyzdinis modelis, http://nvspl.lt/nvspl/m/m_files/wfiles/file221.pdf, 17.02.2016
- [33] Geležinkelių apsaugos centras: Lietuvos geležinkelių transporto sektoriaus ilgalaikės strategijos iki 2030 m., http://www.uabgac.lt/out_data/PDF/Pilna_SPAV_ataskaita/spav-ataskaita.pdf, 05.01.2016
- [34] Clausen, U., Doll, C., Franklin, F. J., Franklin, G. V., Heinrichmeyer, H., Kochsiek, J., Rothengatter, W., Sieber, N.: Reducing railway noise pollution, First edition, Brussels, 2012.
- [35] Esveld, C.: Modern railway track, Second edition, TU-Delft, 2001.
- [36] Wiebe, E., Sandor, J., Cheron, C., Haas, S.: ERRAC Roadmap WP 01 - The Greening of Surface Transport. "Towards 2030 - Noise and Vibrations Roadmap", sixth edition, Paris, Brussels, 2011.
- [37] Ögren, M.: Noise emission from railway traffic, <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:675304/FULLTEXT02>, 05.02.2016