

IZVORI I ZAŠTITA OD BUKE

Domitrović, Hrvoje

Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, Zavod za elektroakustiku, Unska 3
hrvoje.domitrovic@fer.hr

Sažetak: *Prevelika razina buke predstavlja danas jedan od najznačajnijih problema u zvučnoj zaštiti prostora u kojima ljudi rade i borave. Pogrešan odabir ili neispravno postavljanje uređaja u proizvodnim pogonima te razmještaj uređaja za reprodukciju glazbe u ugostiteljskim objektima ponekad dovode do naizgled nerješivih situacija. Prepoznavanje izvora problema i primjena rješenja koja omogućava suvremena tehnologija materijala za zvučnu izolaciju omogućavaju uspješnu primjenu zvučne izolacije i dovođenje razine buke u dozvoljene razine.*

Ključne riječi:

buka, zvučna izolacija,

1. UVOD

Definiravši buku kao svaki neželjeni zvuk koji čujemo, sa sigurnošću se može ustvrditi da je u svakodnevnom životu i radu svaki pojedinac izložen djelovanju buke. Izloženost buci, osim u ekscenim slučajevima vrlo visokih razina zvuka, ima akumulirajući karakter. To znači da do promjena u ljudskom organizmu uvjetovanih djelovanjem buke, ne dolazi odjednom nego tijekom dužeg vremena. U početku se one kod ljudi očituju kroz promjenu raspoloženja, umor, nesanicu, glavobolju, gubitak koncentracije što uzrokuje smanjenu radnu sposobnost te se u konačnici manifestiraju kao oštećenje sluha. Učinci trajne izloženosti buci tako imaju nepovratan učinak na ljudsko zdravlje, a tegobe koje prethode ovom terminirajućem oštećenju mogu posredno izazvati ozljede na radu uzrokovane upravo smanjenom mogućnošću koncentracije izazvane nesanicom ili glavoboljom.

2. IZVORI BUKE

Izvori buke su raznovrsni i radi njihovog kategoriziranja prilikom promatranja njihovog utjecaja na okolinu, promatraju se obzirom na vremenske i frekvencijske značajke. Kategorizacija koju koristimo prilikom proaćuna i modeliranja pomoću računala, zahtjeva još i korištenje njihovih usmjernih karakteristika.

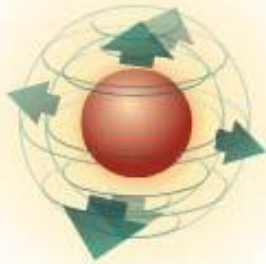
Prema vremenskim obilježjima zvuka koji proizvode, izvore buke djelimo na stacionarne (praktički nepromjenjive po spektru i razini) i povremene. Pokazalo se da osim vremenskih obilježja, spektralni

sastav buke također bitno utječe na ukupni subjektivni osjećaj smetnje te ga nikako ne treba zanemariti, nego uzeti u obzir kroz korekcije izmjerenih vrijednosti.

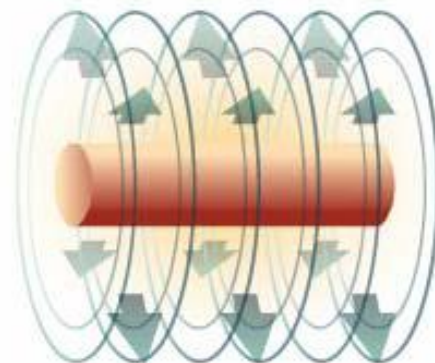
Budući da su izvori buke raznovrsni, pojedinac često nije svjestan što uzrokuje njegovu izloženost buci. Oni mogu biti vezani s prostorom u kojem ljudi rade i borave, tj. povezani s proizvodnim procesom ili okolinom u kojoj žive. Ovdje ubrajamo buku proizvodnih pogona i ostalih prostora u kojima se odvija neka vrsta uslužnih djelatnosti. Osobine buke proizvodnih prostora su da je praktički konstantne razine, a spektar buke izvora i statistički parametri uvjetovani uglavnom radnim vremenom i proizvodnim procesima. U ovu skupinu izvora, obzirom da su vezani uz djelatnost koja se u prostoru obavlja, ubrajamo i buku glazbe iz prostora restorana i raznih drugih prostora namjenjenih zabavi i provođenju slobodnog vremena.

Izvori buke mogu biti i vanjski i nevezani s radnom aktivnošću ljudi koji su njima izloženi. U ovom slučaju najčešće se radi o buci prometa, koja danas spada u najvažnije zagađivače okoliša. Sve veće i slobodnije kretanje ljudi i materijalnih dobara ima za posljedicu trajni rast svih vrsta prometa, pa je buka prometa (cestovni, željeznički, zračni, brodski) na prvome mjestu po veličini prostora i broju ljudi na koji utječe kroz premašene dozvoljene razine buke. Za razliku od buke proizvodnih pogona koja je pretežito stacionarna, buka prometa izrazito ovisi o vrsti prometnog sredstva, njegovoj brzini i broju vozila u jedinici vremena. Utjecaj buke, tj. osobna percepcija smetnje koju ona izaziva, ne ovisi samo o razini, nego o njenom sastavu i trajanju. Osjećaj neugode kojim se opisuje subjektivna percepcija buke danas je poznat pod pojmom "Kvaliteta zvuka" (Sound Quality). Ovaj pojam je osobito primjenjiv na buku koja dolazi od unutarnjih izvora buke u prostoru, kao što su kućni ili uredski uređaji ili na buku kojoj su izloženi putnici u prometnom sredstvu.

Prilikom proračuna utjecaja izvora buke na okolinu, kao i proračuna mjesta, količine i vrste primjenjene zaštite od buke potrebno je koristiti i podatke o smjeru zračenja izvora buke, tj. usmjerne karakteristike izvora buke. Većina izvora buke iz naše svakodnevice se može predstaviti kao točkasti i linijski izvor. Iz točkastog izvora zvuk se širi jednoliko (kuglasto) u svim smjerovima, slika 1., a iz linijskog izvora cilindrično, slika 2. Primjer linijskog izvora može biti prometnica promatrana s neke udaljenosti, dok se kuglastim izvorom buke redovito predstavljaju izvori industrijske buke.



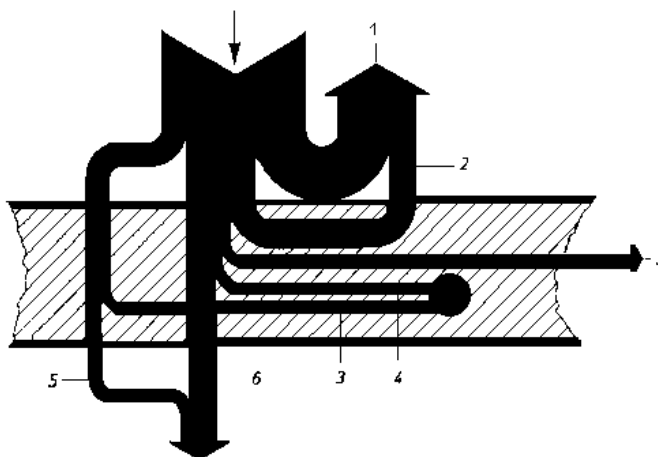
Slika 1. – Točkasti izvor



Slika 2. – Linijski izvor

3. ZVUČNA IZOLACIJA I APSORPCIJA

Putujući od izvora na kojem je nastao, zvuk se širi kroz prostor. Smjer širenja je određen oblikom i dimenzijama izvora. Nailaskom na prepreku, dio zvuka se odbija, a drugi dio ulazi u prepreku. Dio koji je ušao u prepreku dalje se djelom pretvara u vibracije i toplotnu energiju, da bi na kraju prepreke opet od vibracija nastao zvuk. Prilikom nailaska na svaku nehomogenost u mediju kroz koji se širi, dio zvuka se reflektira, a dio prolazi dalje. Nad slici 3. je prikazan model širenja zvučne energije prilikom nailaska na jedonstruki homogeni zid koji razdvaja dvije prostorije.



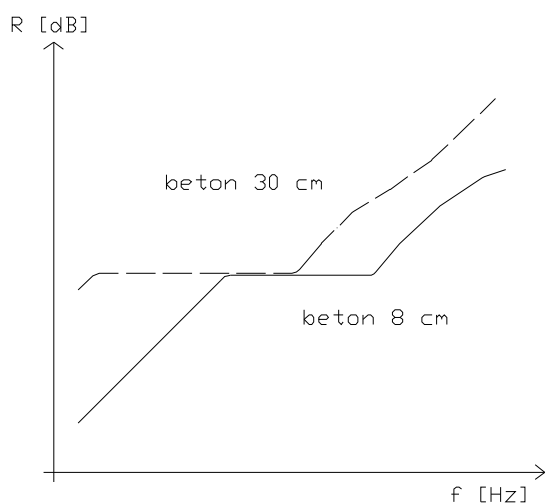
Slika 3. - Put prolaza zvuka kroz jednostavan jednostruki zid

Dio energije označen s "1" predstavlja izravnu refleksiju zvuka. Preostala energija zvuka ulazi u zid i pokreće zid na titranje poput velike membrane. Titranje zida se na obje strane zida pretvara u zvuk (dio "2" i "6"). Pri tome je dio "2" rezultat nehomogenosti medija koji zvuk doživljava na dodiru zida i zraka u prijemnoj prostoriji. Vidimo da je dio "2" puno manji od dijela "6" koji nastaje iz istog razloga ali prilikom prelaza iz zraka u zid. U praksi se za ovakav primjer pregrade "2" može zanemariti, no on upravo upućuje na mogućnost korištenja i dobitak koji se postiže višestrukim pregradama načinjenim od različitih materijala. Djelovi "3" i "4" putuju uzduž zida i pretvaraju se u toplotu odnosno u dio koji na ovaj način može proći u susjedne zidove. Dio "5" odgovara prolazu zvučne energije kroz sitne pore i loša brtvljenja zida i elemenata koji su u njega ugrađeni. Prema tome, važno je primjetiti da se dio zvuka reflektira, dio širi i prigušuje u zidu, a dio prolazi kroz pregradu.

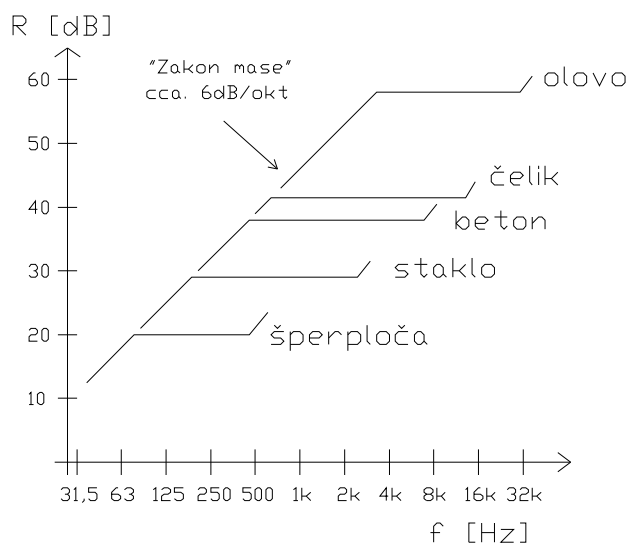
Odnos zbroja komponenti "1" i "2" prema ulaznoj energiji zvuka daje nam koeficijent apsorpcije materijala na koji zvuk udara. Kod materijala koji će nam služiti za zvučnu izolaciju povoljno je da zbroj komponenti "1" i "2" predstavlja većinu u odnosu na ostale komponente. S druge strane, kod materijala koji nam trebaju koristiti za apsorpciju ili upijanje zvuka povoljno će biti upravo obrnuto. Iz toga proizlazi da jednostavne konstrukcije ne mogu uspješno ispuniti oba zahtjeva.

Zvučna izolacija pregrade

Uvriježeno je mišljenje da zvučna izolacija raste s povećanjem mase pregrade. U stvarnosti krivulja koja opisuje zvučnu izolaciju ima tri dijela. Prvi dio koji počinje od najnižih frekvencija odgovara tzv. "Zakonu mase". U tom dijelu je jasno primjetno povećanje zvučne izolacije za 6 dB/oktavi za svako udvostručenje frekvencije. Ovaj zakon također pokazuje da, promatrano na istoj frekvenciji, udvostručenje mase pregrade će proizvesti dobitak u izolaciji od 6 dB. Karakteristiku koja prati "Zakon mase" u cijelom frekvencijskom području imaju samo vrlo plastični materijali poput olova.



Slika 4. – Zvučna izolacija za dva betonska zida različite debljine



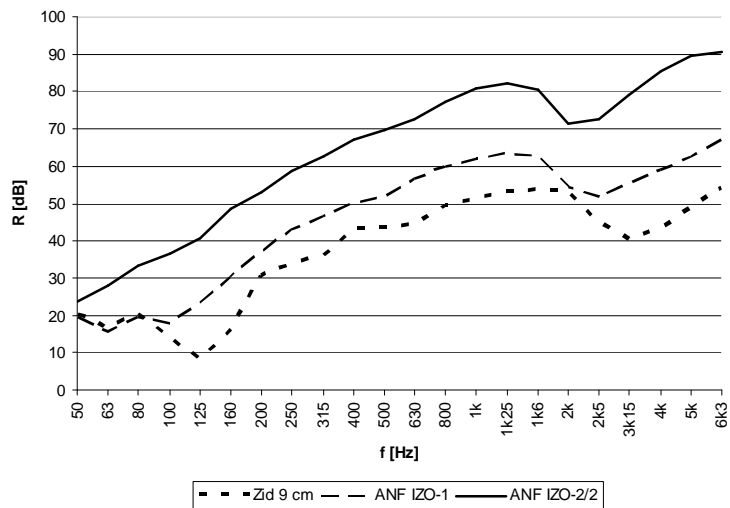
Slika 5. – Usporedba tipiziranih karakteristika zvučne izolacije za različite materijale

Za većinu stvarnih materijala ova krivulja dolazi u područje linearnog gušenja na frekvenciji koja je određena krutošću pregrade. U tom frekvencijskom području pregrada počinje titrati kao membrana. Frekvencija na kojoj se javlja ovaj efekt ovisi o masi pregrade, ali zvučna izolacija koja se može postići ovisi samo o vrsti materijala u pregradi. Na Slici 4. se vidi opisana pojava za dva betonska zida debljine 8 cm i 30 cm. Deblji i teži zid ima veću izolaciju na nižim i višim frekvencijama, ali u području gdje pregrade titraju kao membrane, zvučna izolacija oba zida je jednaka.

Frekvencijsko područje na kojoj pregrada titra kao membrana određeno je masom i krutošću materijala te unutarnjim prigušenjem vibracija u samom materijalu. Što je krutost manja, tj. materijal teže sklon vibracijama, frekvencija na kojoj se ova pojava primjećuje, bit će pomaknuta prema višim frekvencijama.

Treće frekvencijsko područje se nalazi iznad kritične frekvencije na kojoj prestaje membransko titranje. U ovom području tipičan je rast zvučne izolacije od 10 dB/oktavi.

Opisana pojava prostiranja zvuka u pregradi se dešava prilikom nailaska zvuka na svaku prepreku, pa otvara mogućnost poboljšanja zvučne izolacije, uz istovremeno ostvarivanje apsorpcije zvuka u prostoriji, korištenjem višeslojnih pregrada. Razlika između reflektirane i apsorbirane energije je to veća što je veća razlika između akustičkih osobina materijala koji se nalaze u pregradi. Kombinacijom krutih materijala, slojeva mekih materijala i slojeva neelastičnih materijala vrlo prigušenih za vibracije, dobivaju se željene karakteristike zvučne izolacije. Osim toga višeslojne pregrade omogućavaju postizanje potrebne razine zvučne izolacije uz debljinu pregrade manju nego jednostruke homogene pregrade jednakih svojstava.



Slika 6. – Usporedba zvučne izolacije tri različite pregrade

Na slici 6. su prikazane vrijednosti zvučne izolacije zida izvedena na tri različita načina. Debljina prva dva zida je 9 cm, a zvučne izolacije su im $R_w = 33$ dB, odnosno $R_w = 48$ dB. Drugi zid je izveden jednostrukim višeslojnim panelima ANF IZO-1. Korištenjem dvostrukih panela ANF IZO-2/2 kod kojih su stijenke elastično vezane, a unutrašnjost umrtvljena prigušnim materijalom postiže se zvučna izolacija od $R_w = 65$ dB, uz debljinu zida od 17 cm.

Za uspješno provođenje zvučne izolacije potrebno je ostvariti barem jedan od ovih zahtjeva:

1. smanjiti zvučnu snagu koju emitira izvor zvuka. To je moguće učiniti ako snaga izvora ne ovisi o apsorpciji (npr. uređaji u proizvodnom procesu). U slučaju prostora s glazbom to nije moguće jer je želja korisnika postići određenu glasnoću, pa će prigušenje uzrokovano apsorpcijom nadomjestiti povećanjem glasnoće na pojačalu.
2. smanjiti površinu zida koja veže dvije prostorije. Ovaj zahvat upućuje na razmatranje mogućnosti stvaranja međuprostora između dvije kritične prostorije.
3. povećati zvučnu izolaciju postojeće pregrade. Zahvaljujući suvremenim materijalima moguće je povećanje uz minimalne gubitke prostora i korištenjem suhomontažne tehnike gradnje.
4. povećati apsorpciju u prijemnoj prostoriji, ako to odgovara potrebama i mogućnostima korisnika

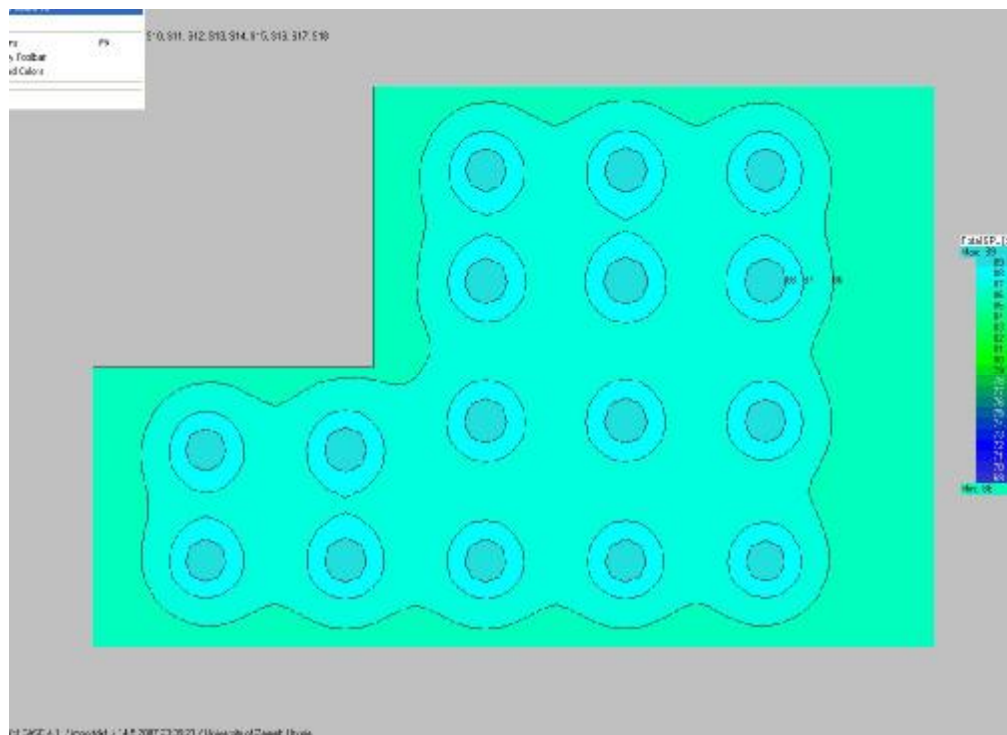
Promatrajući točku 1. prikazat ćemo ovdje vrlo jednostavan način kako djelotvorno smanjiti emisiju buke iz jednog prostora u drugi, a da svi budu zadovoljni. Kao primjer smo uzeli lokal dimenzija 30 m x 20 m. Želja je postići u svim djelovima lokala prosječnu razinu glazbe od 86 dB. Ploha promatranja je na visini 125 cm od poda, što odgovara prosječnoj razini uha osobe koja sjedi. U prvom slučaju je to ostvareno s 2 zvučnika smještena u kutevima prostorije. Raspodjela zvučnog tlaka prikazana na Slici 7 pokazuje da je u

većini prostorije postignuta željena razina. U osi zračenja zvučnika razina iznosi 89 dB. Drugi način rješenja je ugradnja kvalitetnih stropnih zvučnika. Raspodjela zvučnog tlaka za ovaj slučaj je prikazana na Slici 8.



Slika 7. – Raspodjela zvučnog tlaka uz ozvučenje s 2 zvučnika

Pogledamo li kolika je razina na 1 m od samog zvučnika, onda za prvi slučaj ova razina iznosi 105 dB, a za drugi 95 dB. Prilikom rješavanja zvučne izolacije u prvom slučaju imamo izvor koji 10 dB glasniji od drugog slučaja, pa će i zahtjev za zvučnom izolacijom biti 10 dB veći. Uzmimo li da to odgovara odnosu 1:3 cijene kvadratnog metra pregrade, lako ćemo izračunati koji je sustav u konačnici povoljniji.



Slika 8. – Raspodjela zvučnog tlaka uz ozvučenje sa stropnim zvučnicima

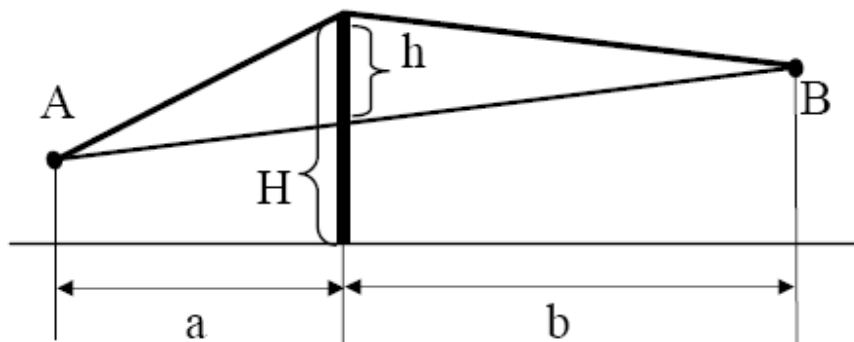
Zvučne barijere

Prometna buka je najznačajniji tip buke gledano obzirom na veličinu kontaminiranog područja i broja ljudi. Značajan parametar na početku projektiranja zaštite su mjerenja buke na kritičnim točkama uz prometnice. Ovo je pouzdan način utvrđivanja kontaminiranosti kod postojećih prometnica, no zaštitu od buke potrebno je predvidjeti i izvesti pogotovo uz nove prometnice, redovito predviđene za veće količine vozila i veće brzine. Zbog toga se izrađuju studije utjecaja buke na okoliš. Pri tome se koriste različiti algoritmi predviđanja razine buke koji se razlikuju se po broju i vrsti parametara koji se koriste pri proračunima te u metodi proračuna koji se razlikuju od zemlje do zemlje. Najčešće korišteni parametri u dosadašnjim proračunima su prosječni godišnji dnevni promet i udio teretnih vozila u ukupnom broju vozila. Osim tih parametara, za proračun su važne i korekcije ovisne o vrsti ceste (autocesta, državna cesta,...), vrsti podloge (beton, asfalt,...), nagibu ceste, brzini vozila te udaljenosti od raskrižja.

Kod algoritma predviđanja razine buke postoje četiri osnovne nesigurnosti koje treba uzeti u obzir. To su: nesigurnost ulaznih parametara modela, nesigurnost modela širenja, nesigurnosti u strukturi samih modela i nesigurnost modela za predikciju. Nesigurnost ulaznih parametara nastaje zbog nedovoljno dobro definiranih ulaznih parametara koji se koriste u proračunu. Nesigurnost modela širenja nastaje zbog loše definiranih parametara širenja zvuka. Nesigurnost modela povezana je s različitim načinima proračuna koji se koriste u modelu, a nesigurnost u modelu za predikciju ovisi o pouzdanosti početnih mjerenja podataka s kojima vršimo usporedbu. Da bi se točnost podataka dobivenih proračunom povećala, potrebno je uvesti dodatne parametre i modificirati model proračuna. Prije svega, potrebno je razdvojiti parametre izvora buke od parametara propagacije zvuka, a zatim izdvojiti parametre izvora buke i finije ih podijeliti. Prosječni godišnji dnevni promet i dalje ostaje jedan od ključnih parametara, no, potrebno je detaljnije kategorizirati vozila i time zamijeniti dosadašnje dvije kategorije (osobna i teretna

vozila) većim brojem novih. Prema novoj podjeli, vozila će biti podijeljena na motorkotače, osobna vozila, terenska vozila, kombi vozila, osobna vozila s prikolicom, cisterne, teretna vozila s ceradom i ostala vozila uz detaljan opis. Osim same brzine vozila, uvodi se ubrzanje vozila kao novi korekcijski parametar. U dosadašnjim modelima širenja zvuka jedini relevantni parametar bila je udaljenost od izvora zvuka. No, na širenje zvuka utječu i meteorološki uvjeti koji dosada nisu bili dovoljno detaljno opisani. Neki od meteoroloških uvjeta su brzina i smjer vjetra u odnosu na izvor. Do sada je najveći pomak napravljen na području definiranja utjecaja meteoroloških uvjeta na propagacijski model. Na taj način je smanjena pogreška proračuna i do 3 dB. U Republici Hrvatskoj još nisu kategorizirani meteorološki uvjeti koje treba koristiti. Prilikom mjerenja koja smo provodili tijekom 2005. godine na autocesti Rijeka - Zagreb, uočili smo da izmjerene vrijednosti odstupaju od rezultata proračuna i do 10 dB, što je neprihvatljivo velika razlika, tim više što izravno utječe na višestruko povećanje troškova kasnije zaštite od buke.

Zvučne barijere mogu se definirati kao zvučno neprozirne prepreke između izvora zvuka i promatrača, preko kojih ili oko kojih se zvuk širi. Smanjenje zvučne razine koje se postiže zvučnom barijerom nazivamo dodatnim smanjenjem razine zvuka (sound insertion loss), jer će se ona prvenstveno smanjiti zbog udaljenosti od izvora i apsorpcije zraka, a još dodatno zbog same zvučne barijere. Dodatno smanjenje razine zvuka predstavlja razliku između zvučnih tlakova koji se mjere na mjestu promatrača prije i nakon postavljanja zvučne barijere.



Slika 9. – Prikaz parametara zvučne barijere

Da bismo postigli dodatno smanjenje razine zvuka postavljanjem zvučne barijere, njezina visina mora biti takva da upada u vidno polje između izvora zvuka i promatrača. Smanjenje buke zbog postojanja zvučne barijere, odnosno gubici uslijed prolaza zvuka kroz barijeru (sound transmission loss), mora biti najmanje 6 dB veće od proračunatog dodatnog smanjenja razine zvuka za tu barijeru, koje ovisi o nekoliko faktora, a to su efektivna visina barijere, spektar izvora zvuka (niske frekvencije se slabije prigušuju), vrsta izvora zvuka (gušenje je veće za točkasti nego za linijski izvor), položaj zvučne barijere u odnosu na izvor i promatrača, apsorpcijska svojstva tla s obje strane zvučne barijere te meteorološki uvjeti (vjetar, kiša, snijeg...). Na slici 9. vidimo izvor zvuka A, promatrača B i zvučnu barijeru čija je efektivna visina označena s h . Efektivna visina je udaljenost između vrha barijere i točke u kojoj se sijeku barijera i pravac koji spaja izvor zvuka i promatrača. Odmah možemo vidjeti da efektivna visina nije isto što i stvarna visina barijere H . Smanjenje razine zvuka zbog postavljanja zvučne barijere je 3 dB veće ako je $a \ll b$. Minimalna visina zvučne barijere dana je formulom:

$$H_{\min} = \frac{H^* a}{a + b}$$

4. ZAKLJUČAK

Zbog sposobnosti adaptacije ljudskog organizma, zagađenje bukom nije lako uočljivo i često se prihvaća kao posljedica tehnološkog razvoja ili promjene običaja života i načina rada. Za razliku od mnogih drugih zagađivača, prestankom postojanja izvora buke, trenutno prestaje i njeno djelovanje na ljude i okoliš. Zbog ove pozitivne perspektive, otkrivanje kritičnih mjesta s prevelikom razinom buke i provedba zaštite nakon toga, opravdava napore koji se ulažu u ovom području.

Prepoznavanje izvora problema i primjena rješenja koja omogućava suvremena tehnologija materijala za zvučnu izolaciju omogućavaju uspješnu primjenu zvučne izolacije i dovođenje razine buke u dozvoljene razine.

5. LITERATURA

1. Jelaković, T., *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*, Školska knjiga, Zagreb 1978.
2. Cavanaugh, W.J., Wilkes, J.A., *Architectural Acoustics: principles and practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
3. Egan, D.M., *Architectural Acoustics*, McGraw Hill, 1988.
4. *Akustički paneli IZO-Z*, Fran d.o.o., Zagreb, 2005.