

Akustički odziv fudbalskog stadiona

Dragana Šumarac Pavlović
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
dsumarac@etf.rs

Nikola Jokić
Profakustika d.o.o.
Beograd, Srbija
nikolajokic@profakustika.rs

Tatjana Miljković
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
tm@etf.rs

Miloš Bjelić
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
bjelic@etf.rs

Filip Batić
Profakustika d.o.o.
Beograd, Srbija
filipbatic@profakustika.rs

Miomir Mijić
Profakustika d.o.o.
Beograd, Srbija
emijic@etf.rs

Marija Ratković
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički
fakultet
Beograd, Srbija
rm@etf.rs

Miodrag Stanojević
Profakustika d.o.o.
Beograd, Srbija
office@profakustika.rs

Apstrakt — Savremeni fudbalski stadioni moraju imati adekvatan audio sistem za ozvučavanje koji je, prema pravilima FIFA, obavezan deo šireg sistema za obaveštavanje u slučaju vanrednih okolnosti. Kao takav, sistem se koristi i za emitovanje raznih informacija od značaja za praćenje fudbalske utakmice i za emitovanje muzike u pauzama igre. Sa takvom funkcijom, osnovni parametar kojim se definiše kvalitet audio sistema na stadionu je razumljivost emitovanog govora koja se postiže. Stadion kao fizičko okruženje zadovoljava uslove da se pri pobudi zvukom u njemu generiše specifičan reverberacioni proces koji negativno utiče na tu razumljivost. Zbog toga je poznavanje akustičkog odziva stadiona značajno za dizajn zvučnih sistema. Da bi se jasnije sagledao taj inženjerski aspekt organizovana je analiza akustičkog odziva na stadionu „Rajko Mitić“ u Beogradu (poznat kao Stadion Crvene zvezde ili „Marakana“). U ovom radu su prikazani rezultati sprovedene analize i neke akustičke specifičnosti stadiona kao ambijenta za reprodukciju zvuka.

Ključne reči— Fudbalski stadion, impulsni odziv, razumljivost govora, vreme reverberacije,

I. UVOD

Fudbalski stadioni su specifična vrsta građevinskih objekata čije su fizičke karakteristike uslovljene propisanim dimenzijama terena na kome se odvija igra i potrebom da se gledaocima obezbede kvalitetni uslovi za posmatranje onoga što se na tom terenu dešava. U građevinskom smislu objekat stadiona uključuje travnati teren, tribine oko njega, a po nekada i krov iznad tribina, u celini ili samo parcijalno. Za objekte najvišeg ranga fudbalskih mečeva dimenzije terena su zadate sa relativno uskim tolerancijama, pa se to može smatrati konstantom bez obzira na sve ostale arhitektonske i druge okolnosti. Sve druge karakteristike stadiona mogu biti varijabilne, određene zahtevima projektnog zadatka.

Ono što je za savremene fudbalske stadione karakteristično sa inženjerskog aspekta jeste obaveza da na njima postoji sistem za ozvučavanje preko koga se emituju razna obaveštenja. Ona su važan deo utakmice kao događaja u kome učestvuju sportski timovi, ali i veliki broj posmatrača koji moraju biti informisani o onome što se dešava na terenu i na stadionu u celini. Sistem za ozvučavanje je u funkcionalnom smislu sastavni deo

bezbednosnih sistema stadiona. To su definisano u dokumentima koje je publikovala FIFA (Fédération Internationale de Football Association) [1,2]. U njima je razumljivost emitovanog govora na tribinama, ali na i svim drugim delovima stadiona, utvrđena kao osnovni zahtev koji se mora postići ugrađenim audio sistemom. Postoji potreba da se govorne poruke koje bi se emitovale u slučaju vanrednih okolnosti evakuacije stadiona odlično razumele na svim mestima gde se nalaze gledaoci. U tom smislu pitanje akustičkog odziva fudbalskog stadiona postaje značajno za dizajn audio sistema. Činjenica je da sistem ozvučenja na stadionu ima i druge funkcije kao što su objavljivanje informacija tokom utakmica, reprodukcija muzike i slično. Ostali uobičajeni zahtevi koji su deo projektnog zadatka svakog sistema za ozvučavanje – dovoljan nivo zvuka i ujednačenost odziva po tribinama gde su slušaoci – takođe se razmatraju i analiziraju u procesu dizajna, ali se razumljivost govora ističe kao najznačajnija odlika koja se mora zadovoljiti.

U literaturi je prikazan jedan zanimljiv pregled kako su se zahtevi u odnosu na postignuća sistema za ozvučavanje stadiona menjali u poslednjih dvadesetak godina. Interesantno je da se u tom radu primećuje da najnovija stremljenja u okviru organizacije FIFA postaju u izvesnom smislu „nerealna“. Tako se navodi da su najavljeni kriterijumi za razumljivost govora postignutog audio sistemom na stadionu suviše visoki. Tako se pominje da sistem za ozvučavanje treba da ostvari razumljivost emitovanog govora na tribinama koja odgovara uslovu $STI \geq 0,75$ [3]. Sve to ima odraza i na način na koji se u procesu projektovanja moraju tretirati akustičke karakteristike stadiona.

Zanimljivo je da se tema akustičkog odziva stadiona u lokalnoj stručnoj javnosti aktuelizovala sa početkom izgradnje Nacionalnog stadiona u Beogradu. Idejno rešenje je napravio španski biro *Fenwick Iribarren Architects SLP* [4]. U tom procesu došao je na red i izbor koncepta audio sistema za ozvučavanje tribina koji će na njemu biti instalisan. Prema važećim planovima stadion treba da bude završen do kraja 2026 godine i mora biti realizovan prema UEFA standardima za utakmice međunarodnog ranga. Za kvalitetno inženjersko rešenje koje će zadovoljiti takav uslov potrebno je, između

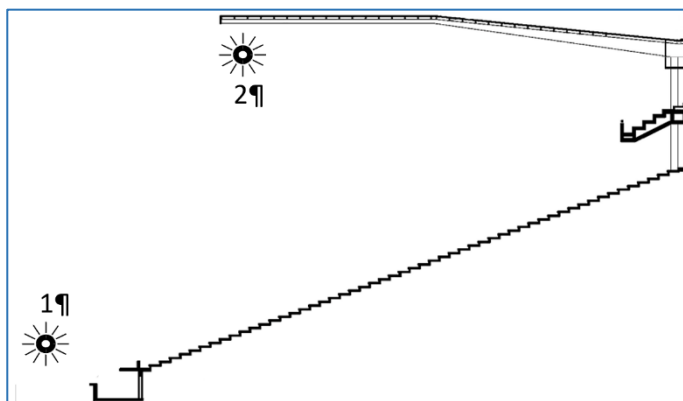
ostalog, dovoljno tačno proceniti akustički odziv prostora stadiona u kome će sistem raditi i razumeti sve njegove specifičnosti.

II. FIZIČKI FAKTORI KOJI ODREĐUJU AKUSTIČKI ODZIV FUDBALSKOG STADIONA

Na fudbalskim stadionima postoje tri građevinska elementa koji pri zvučnoj pobudi u njima određuju strukturu impulsnog odziva, a to znači reverberacioni proces koji tada nastaje. To su:

- manje ili više strma stepenasta površina tribina (dimenzije zavise od usvojenog nivoa komfora gledalaca pri projektovanju tribina) i
- krov iznad tribina (ako postoji) koji ih u većoj ili manjoj meri prekriva,
- vertikalni zid iza poslednjeg reda sedišta (ako postoji na stadionu).

Strmina tribina određena je zahtevom da se omoguće dobre vizure prema terenu sa svih sedišta, a u izvesnoj meri zavisi i od odluke o nivou komfora koji se usvaja za gledaoce (širina prolaza ispred sedišta, fizički gabariti pojedinačnih sedišta i slično). Krov iznad tribina postoji na novije građenim stadionima, pogotovo na onim koji se planiraju za najviši rang fudbalskih mečeva. Na nekim stadionima pokrivanje krovom samo je na zapadnoj tribini, a na nekima je to samo delimično, što znači da je deo tribina van krova. Promenom veličine krova menjaju se i fizički uslovi za formiranje akustičkog odziva stadiona kada se pobuđuje sistemom za ozvučavanje. U okolnostima kada je stadion popunjen ljudima udeo tribina u odzivu se smanjuje jer one postaju apsorpciona površina. To znači da je udeo površine tribina u akustičkom odzivu stadiona pri radu sistema za ozvučavanje varijabilni faktor, a očekuje se da taj sistem obezbedi visoku razumljivost govora u svim okolnostima.



Sl. 1 Presek kroz zapadnu tribinu stadiona Rajko Mitić; označeni su mogući položaji zvučnih skupina na stadionima: 1 – na ivici terena i 2 – na ivici krova.

Šematski prikaz građevinskih elemenata stadiona koji određuju njegov akustički odziv prikazan je na slici 1 na primeru preseka kroz zapadnu tribinu stadiona „Rajko Mitić“ u Beogradu. Budući da je uvek napravljena od vrlo masivnog materijala, stepenasta forma tribina pogođena zvučnim talasom vraća pri refleksijama zvučnu energiju u prostor kroz dva akustička fenomena: kao spekularne refleksije od manjih horizontalnih i vertikalnih ravnih površina na tribinama i

raspršavanjem (*scattering*) od takve reljefne forme koja deluje kao difuzor. Zanimljivo je da se relevantne informacije o pojavi refleksija od stepenastih površina mogu naći u člancima koji prikazuju rezultate istraživanja jedne čuvene piramide u Meksiku iz vremena Maja u drevnog gradu Čičen-ica (Chichen-Itza) [5,6]. Spekularne refleksije od stepenastih površina očekivano se dešavaju na frekvencijama gde je talasna dužina dovoljno mala u odnosu na dimenzije stepenika. U tim člancima o stepenicama na piramidi pokazano je da se takve refleksije javljaju u oblasti frekvencija za koju važi da je:

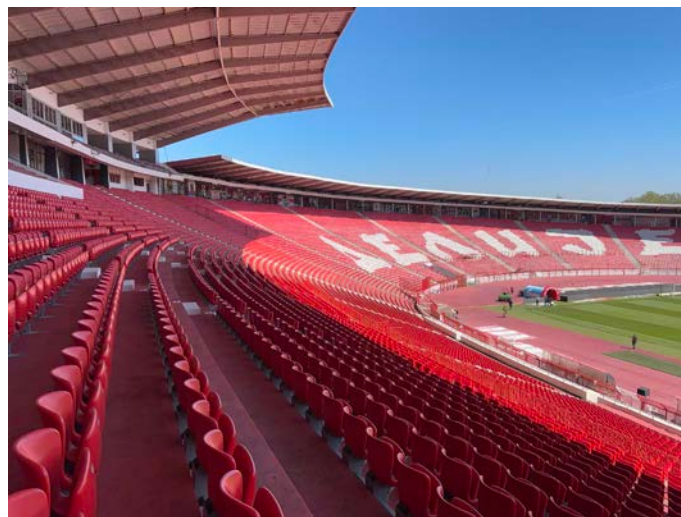
$$f \geq \frac{c}{2D} \quad (1)$$

gde je c brzina zvuka u vazduhu (m/s) a D rastojanje između sredina dva susedna stepenika na tribinama. Raspršavanje zvučne energije pri refleksiji od površine tribina stadiona dešava se ispod te granične frekvencije. Podrazumeva se da je prelazak iz zone raspršavanja u zonu spekularnih refleksija postepen, pa tako treba razumeti i pokazani izraz za graničnu frekvenciju.

Sa krovom iznad čitave tribine ili samo jednog njenog dela formira se specifičan poluzatvoren prostor u kome se neumitno odvija neki reverberacioni proces. Krovovi na stadionima su iz statičkih razloga, po pravilu, pokriveni nekim relativno lakim materijalima radi minimizacije ukupne težine njihove konstrukcije. Pri tome, krov se iz razumljivih razloga statika krova na stadionu ne može rešavati eventualnim stubovima oslonjenim na tribinama zbog vizura. Danas postoje novi objekti stadiona koji su pokriveni samo naduvanim formama od ETFE folija [7].

III. POSTUPAK SNIMANJA IMPULSNIH ODZIVA STADIONA „RAJKO MITIĆ“

Snimanje impulsnih odziva radi analize reverberacionog procesa i prepoznavanja njegovih odlika karakterističnih za objekte stadiona izvršeno je na primeru stadiona „Rajko Mitić“ u Beogradu. To je objekat poznatiji kao „Stadion Crvene zvezde“ ili „Marakana“. Na slici 2 prikazan je izgled tribina tog stadiona. Pozicije pobude i prijema pri snimanju akustičkog odziva prikazane su na slici 3.



Sl. 2 Izgled tribina stadiona „Rajko Mitić“

Za pozicioniranje zvučne pobude korišćeno je nekoliko tačaka koje su na licu mesta mogle biti fizički dostupne sa

raspoloživim sredstvima. Te tačke su na slici 3 označene slovom P. Tokom snimanja u najvećoj meri je korišćena tačka P1, što odgovara poziciji zvučnog izvora 1 sa slike 1. Takva pozicija približno odgovara mestu gde se, u nedostatku drugih mogućnosti, sada postavljaju prenosni zvučnici za ozvučavanje prilikom održavanja utakmica. Tačka 2 sa iste slike u datim okolnostima nije bila dostupna. Naime, na tom mestu se ranije nalazila zvučnička skupina starog, demontiranog sistema za ozvučavanje stadiona. Međutim, u okviru konstrukcije krova nisu napravljene „mačije staze“ kojim bi se moglo prići toj zoni. Pored mesta na ivici tribine, za pobudu su korišćena još i dva mesta na samim tribinama (P2 i P3), kao i jedno mesto na ivici tribine sa suprotne strane stadiona (P4).



Sl. 3 Pozicije mesta koja su korišćena za pobudu (P1 do P4) i mesta na kojima je vršeno snimanje odziva (M1 do M4)

Snimanje impulsnih odziva je vršeno direktnom metodom, što znači da su za zvučnu pobudu prostora stadiona korišćeni zvučni impulsi. S obzirom na veličinu prostora koji treba pobuditi zvučnom energijom, za pobudu su korišćene petarde. Ranije je u literaturi pokazano da petarde imaju praktično neusmereno zračenje i relativno dobru ponovljivost zvučnog impulsa [8]. Prilikom snimanja odziva petarde su postavljane u posebno napravljen držač formiran kao spirala od tanke sajle tako da se ne remeti uniformnost zračenja zvuka u svim pravcima. Takav držač je bio postavljen na dužu teleskopsku motku. Na taj način je omogućena manipulacija i podešavanje pozicije mesta pobude pre opaljenja, kao i podizanje petarde na izvesnu visinu od tla.

Za registrovanje akustičkog odziva stadiona korišćena su četiri prijemna mesta relativno uniformno raspoređena u jednom pravcu duž prolaza na sredini zapadne tribine. Njihove pozicije su na slici 3 označene slovom M. Ukupna širina tribine od ograde na ivici terena do zadnjeg zida sa ložama nešto je veća od 40 m. Na tolikoj dužini četiri prijemna mesta su raspoređena na međusobnim rastojanjima od po 10 m, pri čemu je prvo prijemno mesto (M1) pozicionirano na 10 m od ograde tribine prema terenu.

Prilikom snimanja odziva signali su registrovani neusmerenim mernim mikrofonomima. Oni su se nalazili približno na visini oko 1,5 m od tla, to jest od površine tribina. Signali iz

mikrofona zapisivani su na digitalnim snimačima da bi se omogućila naknadna laboratorijska analiza. Pri zapisivanju je bila raspoloživa dinamika koju omogućava konverzija signala sa 24 bita. Korišćena je frekvencije 48 kHz. Pre početka snimanja na svim snimačima je izvršeno podešavanje nivoa kako bi se sprečilo klipovanje signala, jer pobudni zvučni impuls koga stvara petarda dostiže u maksimumu veoma visoki nivo zvučnog pritiska.

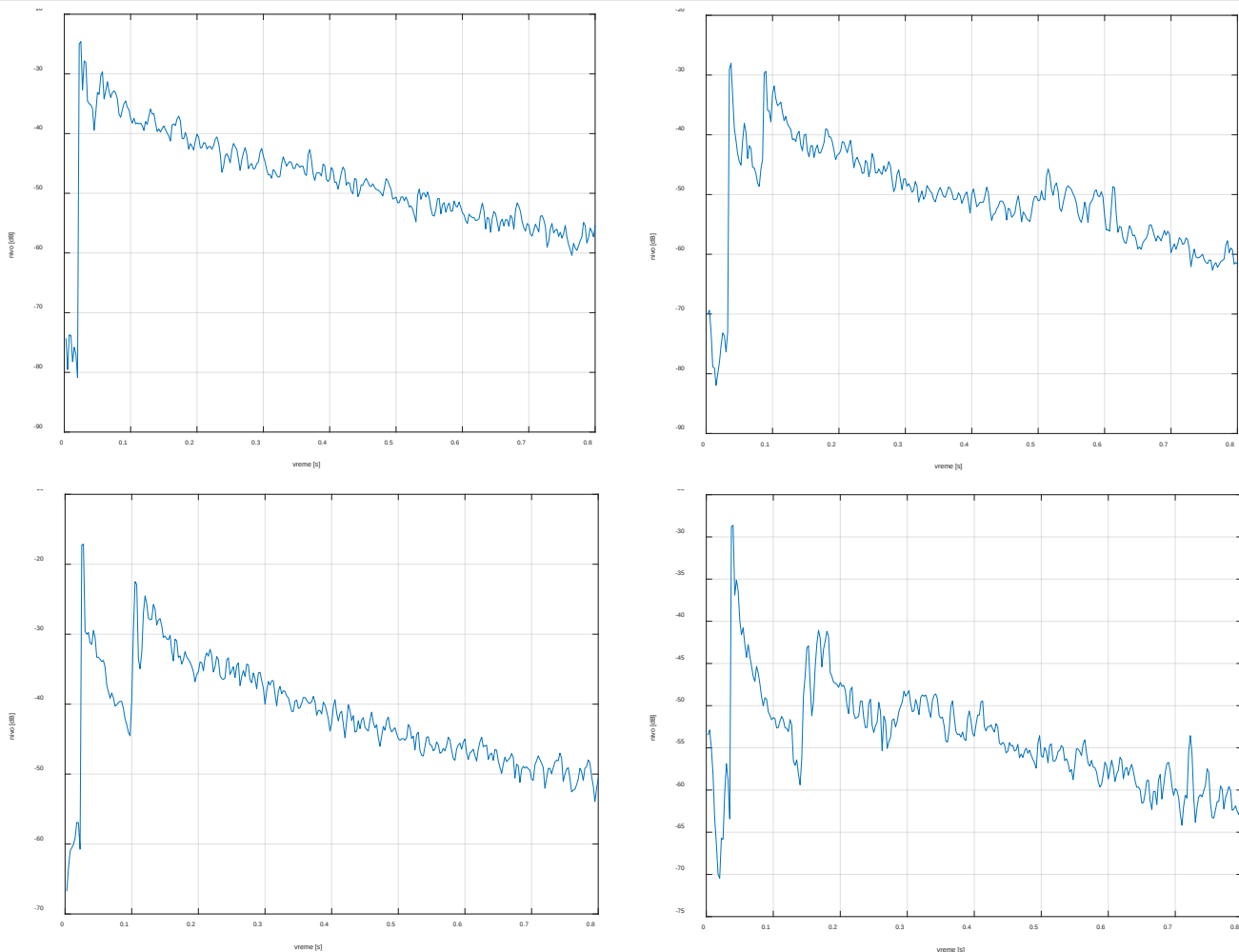
IV. ANALIZA SNIMLJENIH IMPULSNIH ODZIVA

Signali iz svih snimača su prikupljeni i propušteni kroz osnovu proceduru grafičkog prikazivanja vremenskog oblika radi vizuelne analize. Na slici 4 prikazani su neki odabrani karakteristični oblici širokopojasno snimljenih odziva. Oni su, nezavisno od mesta ponude i prijema, odabrani tako da prikažu skalu mogućih karakterističnih slučajeva širokopojasnog odziva na skupu napravljenih snimaka. Vidi se da oblici odziva mogu imati različite vremenske forme koje se menjaju od skoro pravilnog reverberacionog procesa, kao što je primer prikazan na slici 4 gore levo, pa do odziva u kome se prepoznaje značajno izdvojen početni deo koji ima tok opadanja drugačiji od ostatka odziva, kao što je primer na istoj slici prikazan dole desno. Iz toga proizilazi da će pri takvim razlikama i perceptivne osobine odziva stadiona, posebno kada se emituje govor, nesumnjivo biti različite u zavisnosti od položaja zvučnog izvora u prostoru i mesta slušaoca na tribinama.

Osnovni pokazatelj akustičkih karakteristika prostora stadiona je vreme reverberacije T30. U svim projektima sistema za ozvučavanje stadiona koji su bili dostupni za uvid primećeno je da su njihovi projektanti taj parametar koristili kao informaciju o prostoru u kome će raditi zvučničke skupine. Može se pretpostaviti da je to uobičajeni ulazni parametar u simulaciji rada zvučnih sistema. Zbog toga je iz svih snimljenih odziva, za sve kombinacije pobudnih i prijemnih mesta na stadionu, izračunato vreme reverberacije T30. Pri tome je korišćena metoda integrisanog impulsnog odziva (Šrederova metoda). Rezultati takve analize prikazani su na slici 5.

Dijagram izmerenog vremena reverberacije prikazan na slici 5 pokazuje nekoliko osobina koji karakterišu proces reverberacije na ovom stadionu.–

- Vrednost vremena reverberacije na srednjim frekvencijama (500 Hz – 1 kHz) dostiže vrednosti preko 3 s. Takav rezultat u skladu je sa podacima o reverberaciji praznog stadiona koji se mogu videti u raznim projektima njihovih sistema za ozvučavanje, a u koje je bilo moguće ostvariti uvid. U tim projektima podatak o vremenu reverberacije dobijan je softverskom simulacijom za definisanu geometriju tribina i krova. Za to su korišćeni uobičajeni softverski alati za projektovanje audio sistema.
- Sa dijagrama je uočljivo smanjenje vrednosti vremena reverberacije na nižim frekvencijama, počevši od oktave sa centralnom frekvencijom 250 Hz. S obzirom da su tribine stadiona „Rajko Mitić“ izgrađene na tlu, što znači da su veoma masivne, koeficijent apsorpcije njihove površine je vrlo mali i približno konstantan po frekvencijama. Zbog toga je jasno da smanjenje vremena reverberacije na niskim frekvencijama može biti samo posledica uticaja krovnog pokrivača. Koliko se moglo videti, krov je napravljen od



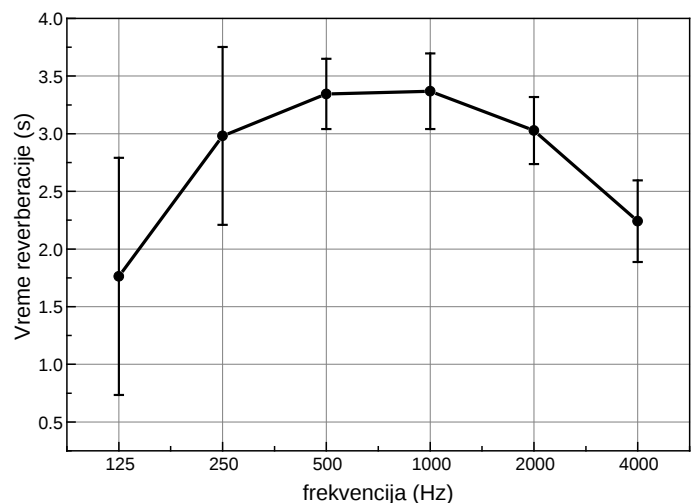
Sl. 4 Neki karakteristični primeri impulsnih odziva; kombinacije pobudnih i prijemnih mesta su označene u skladu sa slikom 3: gore levo M4-P3, gore desno M4-P1, dole levo M3-P1, dole desno M2-P4

nekih lima ili panela da bi bio dovoljno lagan. Takva površina ka nižim frekvencijama postaje u izvesnoj meri transparentna za zvuk, odnosno koeficijent apsorpcije te površine raste sa snižavanjem frekvencije. Otuda i izmereno smanjenje T30 na niskim frekvencijama.

- Na dijagramu je vertikalnim linijama prikazan opseg vrednosti u kome se kreću pojedinačni izmereni rezultati za razne kombinacije predajnog i prijemnog mesta. Te varijacije su posebno velike na niskim frekvencijama. Jedan od mogućih razloga za takve varijacije je i varijabilnost oblika reverberacione krive u okviru snimljenih odziva i njihov složeni tok opadanja nivoa u vremenu.
- Opadanje vrednosti vremena reverberacije na višim frekvencijama očekivana je pojava usled porasta uticaja disipacije u vazduhu sa frekvencijom.

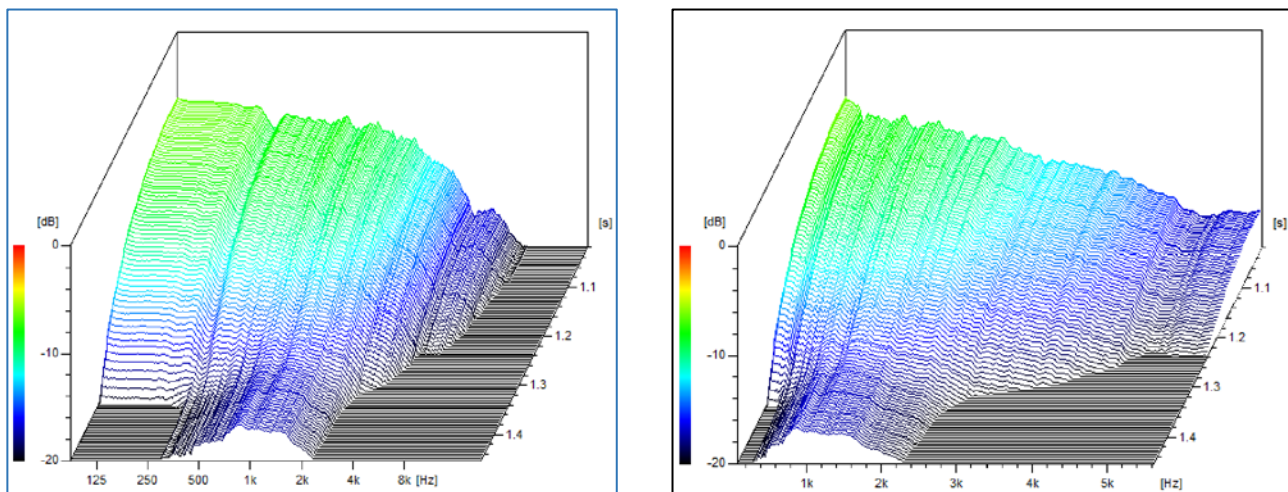
Zanimljiva pojava u snimljenim odzivima na stadionu su razlike u procesu opadanja koje postoje između početnog dela reverberacione krive i njenog ostatka. Ove razlike su vidljive i u primerima prikazanim na slici 4. U početnim trenucima odziva opadanje nivoa zvuka je mnogo brže od ostatka, što znači da je i vreme reverberacije koje odgovara tim delovima procesa opadanja manje od izračunatog T30. U nekim slučajevima, kao što su primeri u donjem redu na slici 4, period bržeg opadanja traje relativno dugo, približno 80 – 100 ms. To je dovoljno

dugačak interval da se proces percepcije reverberacije zasniva na njemu, a da se reverberacioni rep koji sledi nakon toga subjektivno doživljava kao nezavistan auditorni događaj.



Sl. 5 Rezultat analize vremena reverberacije T30 iz snimljenih odziva

Ovakva pojava u odzivu posledica je velikih dimenzija stadiona kao građevinskog objekta koji ograničava fizički prostor zvučnog polja. U njemu velike dužine slobodnih putanja



Sl. 6 Primeri odziva snimljenih na stadionu, prikazani kao slap u vremensko-frekvencijskom prostoru

zvučne energije, statistički posmatrano, mogu biti značajno zastupljene u ukupnoj strukturi dužina putanja zvuka. Takođe, raspodela dužina slobodnih putanja može se značajno menjati sa promenama kombinacija pobudne i prijemne tačke. Na taj način se mogu objasniti velike razlike u oblicima snimljenih krivih opadanja zvuka, demonstrirane primerima sa slike 4.

Uticaj raspodele dužina slobodnih putanja na tok opadanja nivoa zvuka u jako velikim prostorima opisan je ranije u literaturi na primeru prostora Beogradske arene [9,10]. U njoj postoji geometrijski oblik prostora koji je fizički ograničen tribinom pod nagibom i krovom koji se spušta prema liniji njihovog spoja. Ista konfiguracija postoji i na ovom stadionu, jer je to karakteristično za sportske objekte. U akustički neobrađenoj areni izmerena vrednost T30 je skoro 9 s na srednjim frekvencijama, ali početni nagib krive opadanja nivoa zvuka u prvih 0,5 s odgovara vrednosti vremena reverberacije od samo 1,5 – 2 s. Konstatovano je da takva pojava u odzivu može imati pozitivnog uticaja na razumljivost govora čak i kada je vrednost parametra T30 relativno velika.

U analizi akustičkog odziva snimljenih na stadionu očekivan je specifičan uticaj stepenaste površine tribina. Ona se može predstaviti kao niz manjih, međusobno jednakih refleksionih površina ekvidistantno raspoređenih u prostoru. U analizi akustičkog odziva stepenica na piramidi iz vremena Maja takav niz refleksionih ravni koje formiraju površine stepenika označene su kao „line array“ refleksionih ravni [5,6]. Na tom primeru je bilo moguće izolovano analizirati efekat refleksija jer ne postoje druge refleksione površine koje bi usložnjavale odziv i maskirale efekat koji stvaraju stepenica. Zbog ujednačenog kašnjenja refleksija od ekvidistantno postavljenih refleksionih površina subjektivni doživljaj takvog odziva označen je kao „cvrkutavi eho“ (*chirp echo*) [6].

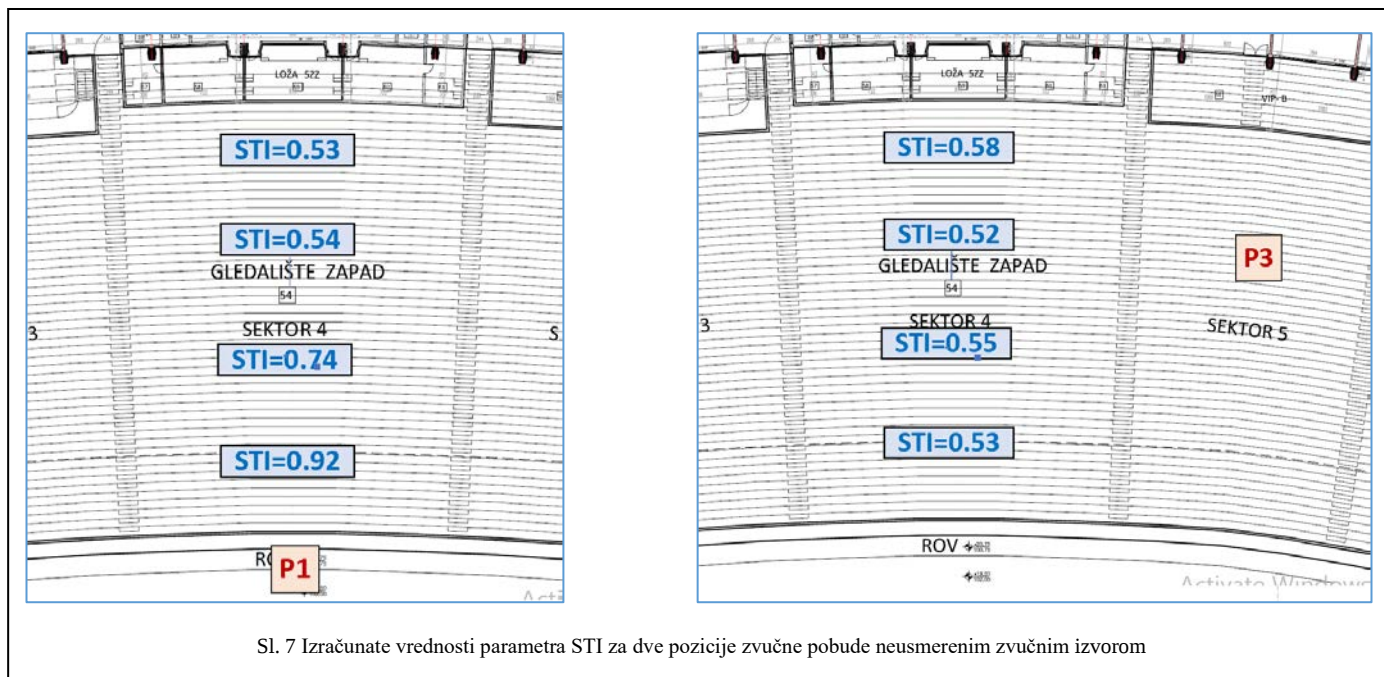
Na osnovu takvih saznanja u analizi snimljenih odziva otvorilo se pitanje da li stepenasta forma tribina može u akustičkom odzivu stadiona proizvesti neki sličan efekat kao u slučajevima usamljenih kamenih stepenica prikazanih u literaturi. Zbog toga su snimljeni odzivi posmatrani i u vremensko-frekvencijskom prostoru koji se može predstaviti sonogramom ili slapom. Na slici 6 prikazani su primeri odziva

snimljenih na stadionu predstavljeni u vremensko-frekvencijskom prostoru kao slap. Primećuje se izvesna zatalasanost spektra duž frekvencije ose. Takva pojava ne postoji u zvuku koji proizvodi petarda pri eksploziji, pa to može biti samo posledica koherentnog superponiranja refleksija koje nastaju od površina tribina ekvidistantno distribuiranih u prostoru. Za razliku od stepenica na piramidi koje su relativno usamljene u otvorenom prostoru, na stadionu postoje i širi uticaji reflektovanog zvuka koji u izvesnoj meri umanjuju izraženost takvog efekta.

S obzirom da je dobra razumljivost govora osnovni zahtev pri projektovanju sistema za ozvučavanje stadiona, u sprovedenoj analizi snimljenih odziva izvršeno je i izračunavanje parametra STI. Neki od tih rezultata prikazani su na slici 7. Dobijene vrednosti treba tumačiti u svetlu činjenice da je petarda kao primenjeni zvučni izvor praktično neusmerena [8]. To znači da se takvi rezultati mogu primeniti kao indikatori mogućeg ishoda za slučaj da se na stadionu koriste zvučnici bez izražene usmerenosti (to jest zvučnički sistemi jednostavnog zračenja klipne membrane).

Ako se izuzme rezultat sa mernog mesta koje je u relativnoj blizini mesta pobude, sa slike 7 se vidi da su vrednosti STI tek nešto veće od 0,5. To pokazuje da postojeća reverberacija na stadionu onemogućava postizanje prihvatljive razumljivosti govora sa neusmerenim zvučničkim sistemima. Takvom stanju sigurno doprinose i specifične forme u strukturi odziva vidljive sa slike 4. Odatle proizilazi da je za dobru razumljivost govora neophodno da se u sistemima za ozvučavanje stadiona primenjuju zvučnički sistemi sa velikom usmerenošću, to jest izvori zvuka složenog zračenja kojim se to postiže.

Brojni primeri projekata koji su analizirani pokazuju da se u projektovanju audio sistema za stadione i slične objekte sa velikim auditorijumom usmerenost izvora zvuka posmatra, pre svega, u kontekstu postizanja dovoljno visokih vrednosti nivoa zvuka i njegove ujednačenosti po površini. Prikazani rezultati pokazuju da svu projektantsku pažnju treba posvetiti, pre svega, postizanju što veće razumljivosti govora. Eventualni nedostatak u tom domenu svaki čovek na stadionu će primetiti. Istovremeno,



eventualna nejednačenost postignutog nivoa zvuka po tribinama ostaće prisutnim ljudima neprimetna.

V. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u ovom radu, kao i drugi rezultati koji proizilaze iz prikupljenih snimaka impulsnih odziva, pokazuju neke specifičnosti akustičkog odziva fudbalskog stadiona. Dobijeni podaci mogu imati primenu u projektovanju audio sistema za takve objekte, posebno za izbor vrste primenjenih zvučnih skupina i njihovog pozicioniranja u prostoru. Važan zaključak je i da razumljivost govora mora biti osnovi parametar koji se u procesu dizajna podešava, i da se svi drugi uobičajeni parametri koji se razmatraju u dizajnu audio sistema moraju podrediti tome. Rezultati takođe skreću pažnju da je u projektima arhitekture fudbalskih stadiona racionalno razmotriti i moguće intervencije za podešavanje akustičkog odziva na način kojim se to razmatra pri projektovanju drugih auditorijuma, a to znači nekim arhitektonskim sredstvima.

ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se firmi LSD, a posebno kolegi Milanu Živkoviću, koji su nam omogućili realizaciju merenja na stadionu "Rajko Mitić" u Beogradu.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Stadium Safety and Security Regulations, FIFA, www.FIFA.com
- [2] Football Stadiums Guidelines 2022, FIFA, www.FIFA.com
- [3] W. Ahnert, „Stadium sound systems and FIFA regulations“, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 38. Pt 2, 2016.
- [4] Bowl Audio Simulations Report for New National Belgrade Football Stadium, Belgrade, Republic of Serbia, Fenwick Iribarren Architects SLP, IDR Description
- [5] J.A.C.Calleja, Acoustics phenomena in Chichen Itza: new adjustments to reflection and diffraction scattering considerations in acoustical models, 15th International Congress on Sound and Vibration, 2008, Daejeon, Korea.
- [6] N.Declercq, J.Degrieck, R.Briers, O.Leroy, A theoretical study of special acoustic effects caused by the staircase of the El Castillo pyramid at the

Maya ruins of Chichen-Itza in Mexico, Journal of Acoustical Society of America, **116** (6), December 2004.

- [7] ETFE Foil – Guide to design, Architen Landrell, october 2020.
- [8] D.Mašović, Osnovne karakteristike petarde kao izvora zvučnog impulsa, 16. Telekomunikacioni forum TELFOR 2008, novembar, 25.-27, 2008, 960-963
- [9] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Acoustic design of the Belgrade Arena hall", FORUM ACUSTICUM, Budimpešta, 2005. Proceedings, 2399-2404
- [10] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Lokalni efekti u akustičkom odzivu veoma velikog zatvorenog prostora", XLVII Konferencija za ETRAN, Igalo, 2003, Zbornik radova,

ABSTRACT

Modern football stadiums must have an adequate audio system for sound reinforcement, which, according to FIFA rules, is a mandatory part of the wider communication system in case of emergency situations. As such, the system is also used for broadcasting various information related to the football match and for playing music during breaks. Given this function, the primary parameter defining the quality of the audio system at the stadium is the intelligibility of the reproduced speech. A stadium, as a physical ambient, meets the conditions where a specific reverberation process is generated when excited by a sound source, which negatively impacts the speech intelligibility. Therefore, understanding the acoustic response of the stadium is important for designing loudspeaker systems. For better insight into this engineering aspect, an analysis of the acoustic response at the 'Rajko Mitić' stadium in Belgrade (known as the Red Star Stadium or 'Marakana') was organized. This paper presents the results of such an analysis and some acoustic characteristics that define stadiums as environments for sound reproduction are presented.

ACOUSTIC RESPONSE OF FOOTBALL STADIUMS

Dragana Šumarac Pavlović, Miloš Bjelić, Nikola Jokić, Marija Ratković, Filip Batić, Miodrag Stanojević, Miomir Mijić