

AKUSTIČKI DIZAJN HALE "BEOGRADSKE ARENE"

Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Husnija Kurtović
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Sadržaj – Ovaj rad predstavlja "case study" akustičkog dizajna hale "Beogradske arene". Prikazani su rezultati merenja akustičkog odziva prostora hale u njenom početnom stanju, postupak modelovanja zvučnog polja, specifični neakustički zahtevi koji su postavljani, problemi koji su se u rešavanju akustičke obrade javljali, kao i rezultati proračuna dobijeni na softverskom modelu. Nakon završetka radova na akustičkoj obradi u objektu izvršena su merenja čiji su rezultati upoređeni sa rezultatima predikcije.

1. UVOD

Sportska hala "Beogradska arena" (ranije nazivana "Limes") predstavlja najveći zatvoreni objekat za sportske i druge spektakle kod nas. Približne spoljašnje dimenzije su 100 x 130 m, sa unutrašnjom zapreminom od oko 300.000 m³. Predviđeno je da hala omogući sve vrste sportskih događaja sa terenom do dimenzija atletike u dvorani, održavanje koncerata i sličnih scenskih spektakla. Sa postavljenim terenom za male sportove, na primer za košarku, ona prima oko 20.000 gledalaca.

Objekat "Beogradske arene" započet je krajem osamdesetih godina sa tadašnjim neposrednim ciljem da bude mesto održavanja međunarodnog košarkaškog prvenstva 1992. godine. Sticajem raznih istorijskih okolnosti završena je tek ove, 2005. godine, ponovo za jedno košarkaško prvenstvo. U takvom istorijskom sledu događaja osnovna građevinska konstrukcija objekta postoji još od početka devedesetih godina, ali se njeno konačno dovršavanje, započeto izradom finalne verzije projekata, odvijalo u periodu od 2002. godine do danas.

U okviru izrade projekata "Beogradske arene" Laboratorija za akustiku Elektrotehničkog fakulteta je angažovana na akustičkom projektovanju zvučne zaštite i prostorne akustike. Najznačajniji segment toga posla bila je akustička obrada prostora hale. Potreba za akustičkom obradom hale javlja se iz dva razloga. Prvo, evropska košarkaška federacija FIBA ima u svojim dokumentima definisan zahtev da vreme reverberacije u prostorima za najviši rang takmičenja bude manje ili jednako 2,7 s. Drugo, zahtevi koji se postavljaju kada su u pitanju prostori za održavanje koncerata podrazumevaju kontrolu impulsnog odziva u celini, što pre svega znači kontrolu prvih refleksija pri radu sistema za ozvučavanje.

Veoma velike dimenzije prostora čine da je hala ambijent u kome je modelovanje zvučnog polja posebno delikatan zadatak. Ranije su u literaturi ovakve prostorije označavane kao "nesabinski prostori", što ukazuje na složenost modelovanja i opisivanja zvučnog polja u njima. U prethodnom radu istih autora publikovani su rezultati istraživanja nekih specifičnih lokalnih fenomena detektovanih u prostoru hale [1]. U ovom radu je prikazan postupak dizajna akustičke obrade hale, specifični problemi i

zahtevi koji su se pri tome javljali, kao i dobijeni rezultat koji je utvrđen merenjem u izvedenom objektu.

2. KRITERIJUMI AKUSTIČKE OBRADNE HALE

Akustički dizajn hale imao je dva osnovna kriterijuma: svođenje vremena reverberacije ispod graničnih vrednosti utvrđenih dokumentima sportskih saveza i podešavanje akustičkog odziva u njegovim detaljima prema kriterijumima kvaliteta rada sistema za ozvučavanje. Kao kriterijum za potrebno vreme reverberacije iskorišćene su preporuke Evropske košarkaške federacije FIBA [2]. Prema tom dokumentu u halama gde se graju košarkaški mečevi međunarodnog ranga maksimalna dopuštena vrednost vremena reverberacije je 2,7 s. Kriterijumi koji prozilaže iz primene sistema za ozvučavanje odnose se na kontrolu jakih prvih refleksija koje bi, ako dovoljno kasne, uticale na smanjenje razumljivosti govora emitovanog preko sistema za ozvučavanje ili koje bi, ako su brze, uticale na boju zvuka.

Nezavisno od akustičkih kriterijuma, prilikom definisanja akustičke obrade hale nametali su se i razni neakustički kriterijumi koji su morali biti ispoštovani. Najznačajniji među njima su:

- apsorpcioni materijali koji bi se nalazili na plafonu hale ne smeju prekomerno opterećivati noseću konstrukciju krova (zbog veoma velike površine i najlakša forma materijalizacije akustičke obrade koja je primenjena ima težinu 57.000 kg);
- iz estetskih razloga obrada ne sme zaklanjati rešetkastu betonsku strukturu konstrukcije krova koja je vidljiva iznutra;
- elementi obrade koji se nalaze u zonama koje su dohvatne sa terena ili sa tribina moraju imati mehaničku robustnost;
- svi elementi obrade moraju se uklapati u koncept enterijera hale koji je definisan pre pristupanja ovom poslu;
- svi elementi obrade moraju zadovoljavati protivpožarne i bezbednosne zahteve.

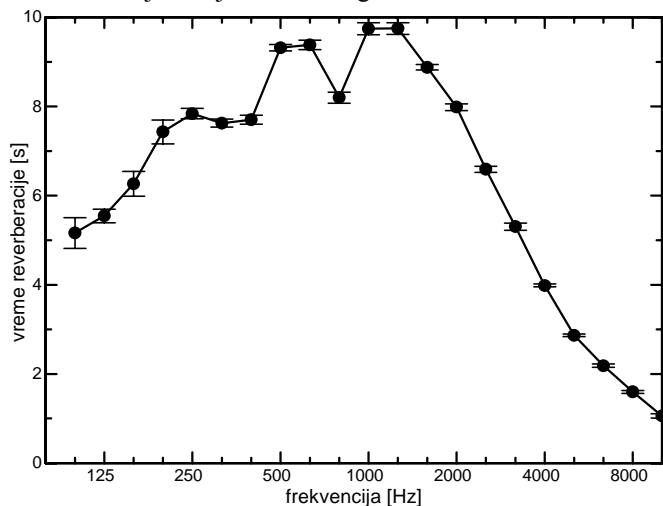
3. ANALIZA POČETNOG STANJA

Specifična okolnost u realizaciji ovog projektantskog zadatka bila je činjenica da je u građevinskom smislu objekat bio prethodno već izgrađen. To je omogućilo da se obave potrebna merenja u zatečenom stanju i definišu polazni parametri potrebni za izradu modela zvučnog polja. Nakon svega, pokazalo se da je to bila i veoma srećna okolnost, jer je ekstremno veliki zatvoren prostor kakva je ova hala u svom akustičkom odzivu pokazao i neke specifične osobine koje verovatno ne bi sve bilo moguće predvideti klasičnim projektantskim metodama.

Analiza akustičkog odziva u početnom stanju obuhvatila je opsežno merenje impulsnih odziva za sve pretpostavljene kombinacije pobudnih i prijemnih mesta. Prilikom merenja pobuda je vršena eksplozivnim punjenjima, jer se pokazalo da se samo tako može dobiti adekvatan dinamički opseg signala u okolnostima tako velike zapremine. Iz snimljenih impulsnih

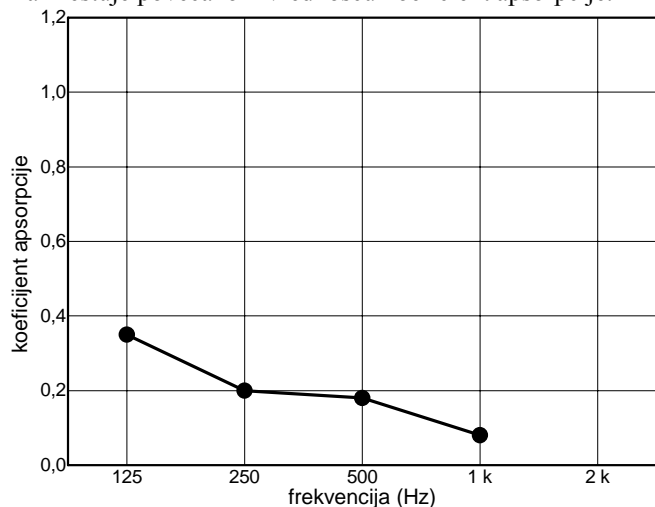
odziva analizirano je vreme reverberacije i pojava eventualnih izolovanih jakih refleksija.

Rezultat merenja vremena reverberacije (T30) u početnom stanju hale prikazan je po opsezima 1/3 oktave na slici 1. Vidi se da je vreme reverberacije na srednjim frekvencijama dostizalo vrednost od oko 10 s. Opadanje vrednosti na višim frekvencijama je uobičajeno usled delovanja disipacije u vazduhu. Lokalni minimumi koji se vide na dijagramu u oblasti frekvencija 400 Hz i 800 Hz posledica su rezonantnih pojava između redova stolica, koje su u ovoj fazi izgradnje već bile stavljene u jednom delu gledališta.



Slika 1 - Vreme reverberacije izmereno u zatečenom stanju hale pre početka rada na projektu.

Kao karakteristična pojava pojavljuje se i značajno smanjenje vrednosti T30 na niskim frekvencijama. Pregledom objekta utvrđeno je da je ova pojava posledica povećanog koeficijenta apsorpcije krovnog pokrivača na niskim frekvencijama. Naime, gotovo sve unutrašnje površine u hali su tom njenom početnom stanju bile betonske, osim velike površine krovnog pokrivača (oko 13.000 m²). On je napravljen kao sendvič koji se sastoji od dva sloja lima sa mineralnom vunom između njih. Izolaciona moć ovakve pregrade na niskim frekvencijama nije velika, što se manifestuje povećanom vrednošću koeficijenta apsorpcije.



Slika 2 - Procenjena vrednost koeficijenta apsorpcije limenog sendviča na krovu hale.

Organizovano je posebno merenje vremena reverberacije hale koje je imalo za cilj da omogući estimaciju koeficijenta apsorpcije limenog sendviča. Preciznost merenja je uglavnom

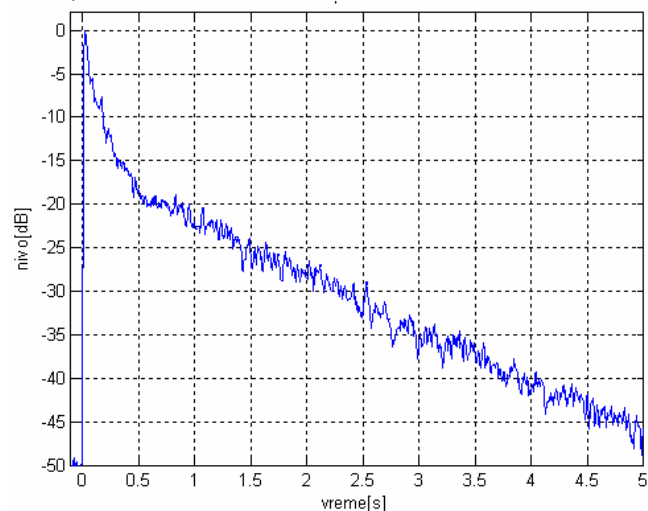
bila uslovljena mogućnostima procene apsorpcije u tom trenutku nedovršenih površina u hali, kao što su neke staklene pregrade, nezatvoreni građevinski spojevi i slično. Rezultat ove estimacije je prikazan na slici 2.

Druga vrsta analize imala je za cilj procenu koeficijenta raspršavanja (*scattering coefficient*) tribina, s obzirom da je to parametar koji značajno utiče na odziv hale. Tribine su, pored krova, najveća površina u hali, pa je modelovanje njihovog ponašanja od velikog značaja za preciznost softverskog modela. Na slici 3 prikazana je fotografija izgleda završenih tribina da bi se ilustrovala specifičnost mikro geometrija ove površine.



Slika 3 - Izgled tribina sa geometrijom koja utiče na vrednost koeficijenta raspršavanja pri refleksiji zvuka.

Procenjena vrednost koeficijenta raspršavanja tribina kao refleksione površine je oko 0,5. Upoređivanje rezultata merenja odziva hale i odziva dobijenih pomoću softverskog modela pokazali su da se pri takvim vrednostima ovog koeficijenta postižu njihova najbolja slaganja. Takođe je pokazano da se ova vrednost ne menja bitno u opsegu frekvencija posmatranom u proračunima (od 100 Hz do 8 kHz).



Slika 4 - Tipičan izgled krive opadanja nivoa zvuka u obodnom delu prostora hale [1].

U jednom prethodnom radu istih autora pokazan je fenomen lokalnog efekta koji je zabeležen u rezultatima merenja sprovedenih u početnom stanju hale [1]. On je ilustrovan jednom od snimljenih kriva opadanja prikazanoj na slici 4. Kriva je dobijena pri zvučnoj pobudi u zoni zvučnika opšteg ozvučenja hale, što je u tehničkoj zoni ispod krova, a

sa prijemom u gornjem delu tribina, u zoni zadnjih redova. Vidi se da u početnom delu odziva, čije je trajanje reda veličine 0,4-0,5 s, brzina opadanja nivoa zvuka odgovara vrednost T30 između 1,5 s i 2,5 s na srednjim frekvencijama. To je značajno manje od opšte brzine opadanja nivoa zvuka u prostoru hale za koju se odgovarajuće vrednosti T30 mogu videti na slici 1.

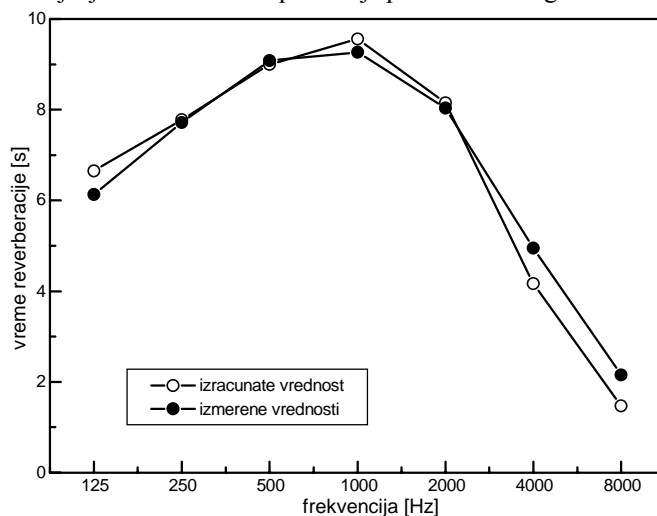
4. METODOLOGIJA PROJEKTOVANJA I KONCEPT AKUSTIČKE OBRADE HALE

Za predikciju odziva hale i efekte projektovane akustičke obrade korišćen je softverski paket ODEON. Napravljen je softverski model hale koji je trimovan koristeći rezultate merenja u početnom stanju. Na slici 5 prikazani su uporedni rezultati merenja u hali i rezultati predikcije pomoću napravljenog softverskog modela. Vidi se da je postignuto njihovo relativno dobro slaganje.

Početak akustičkog dizajna hale bila je analiza mogućnosti primene apsorpcionih materijala na pojedinim površinama, poštujući sva nametnuta ograničenja. Istovremeno je trebalo zadovoljiti uslov da se intervencije apsorpcionim materijalima što uniformnije rasporede u prostoru hale radi postizanja monotonosti reverberacione krive i izbegavanja nepovoljnih lokalnih efekata. Tako je usvojeno da se sredstva akustičke obrade postave u četiri zone koje su šematski označene na slici 6. Ove obrade su različite fizičke strukture i nalazi se na sledećim površinama:

- na plafonu hale (1),
- na zadnjem zidu iza poslednjeg reda gledalaca (2),
- na plafonu ispred loža (3) i
- na vertikalnim površinama oko borilišta (4).

Na plafonu hale primenjen je standardni materijal za spuštene plafone od presovane mineralne vune u tablama debljine 2,5 cm, gustine oko 100 kg/m^3 , koje su postavljene na rastojanju od oko 40 cm ispod donje površine limenog krova.

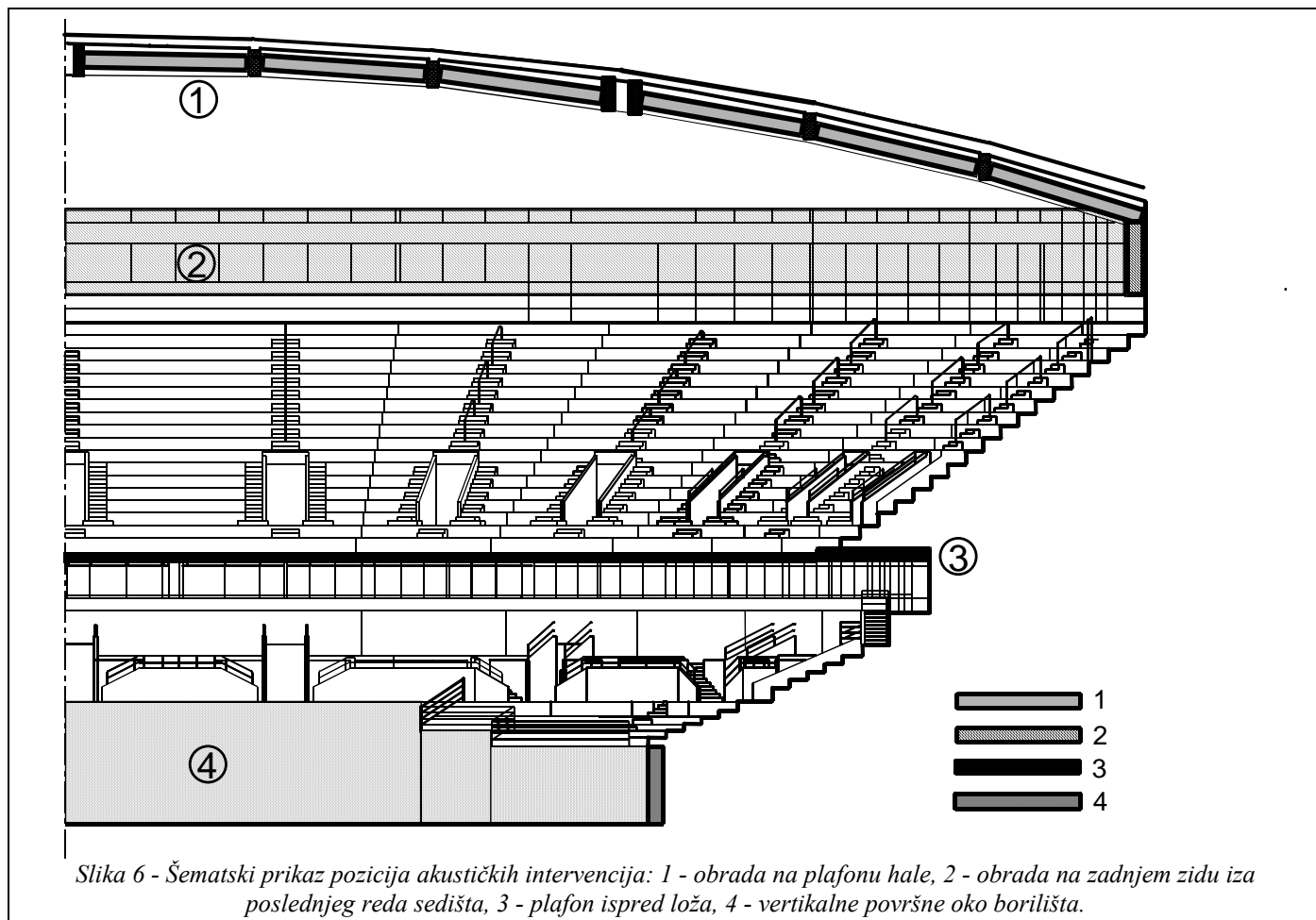


Slika 5 - Izmereno vreme reverberacije u hali i vreme reverberacije iste hale izračunato na napravljenom softverskom modelu

Zadnji zid iza poslednjeg reda tribina napravljen je kao konstrukcija od perforiranog lima, sa 10 cm mineralne vune iza njega. Ovaj lim je korugovan da bi se postogla i izvesna difuznost pri refleksiji dela energije koja se ne apsorbuje.

Ispred loža koje su postavljene oko čitave hale postoji ispušni otvor. Njegova donja strana, odnosno plafon, pokriveni su perforiranim gipsanim pločama.

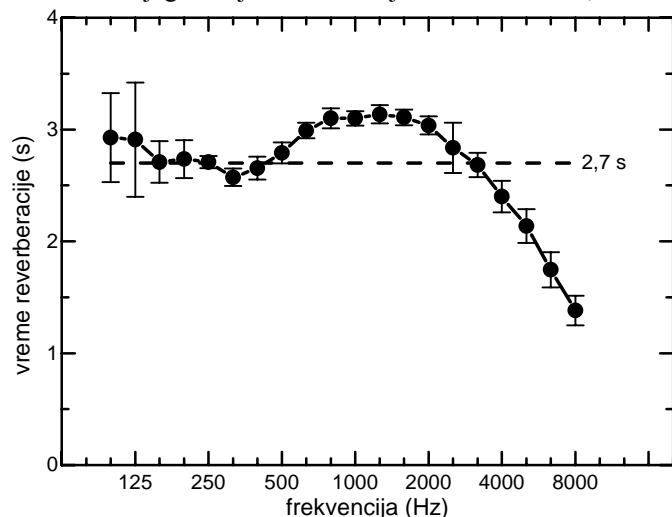
Sve vertikalne betonske površine oko borilišta pokriveni



su akustičkom obradom koja je fomirana sa pločama od presovanih drvenih vlakana postavljenih na podkonstrukciji, sa mineralnom vunom u međuprostoru iza njih.

5. OSTVARENI REZULTATI

Hala "Beogradske arene" je u enterijerskom smislu danas završena, što je omogućilo da se provere pretpostavke iz projekta i uspešnost usvojenih rešenja. Rezultat merenja vremena reverberacije u završenoj praznoj hali prikazan je na slici 7. Na dijagramu je ucrtana i ciljana vrednost od 2,7 s.



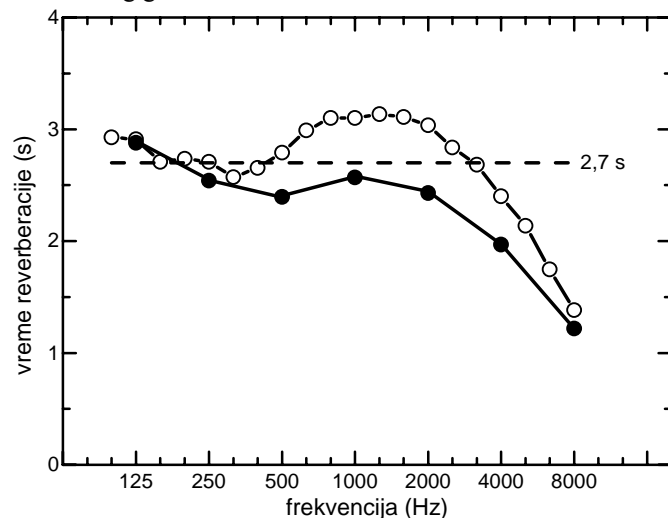
Slika 7 - Rezultat merenja vremena reverberacije u praznoj hali nakon završetka akustičke obrade.

Do sada nije bilo mogućnosti da se merenjem proveri stanje akustičkog odziva hale u prisustvu publike. Zbog toga je pomoću softverskog modela, a koristeći rezultate merenja, izvršen proračun promene vrednosti vremena reverberacije koja će biti u punoj hali. Predikcija koeficijenta apsorpcije površine sa publikom izvršena je na osnovu podataka iz literature [3].

Na slici 8 prikazan je rezultat ovakvog proračuna. Vidi se da je obradom postignuto da se traženo vreme reverberacije od 2,7 s ostvari u okolnostima popunjene hale. Takav pristup je usvojen iz ekonomskih razloga, da bi se minimizirala investicija u ovaj segment objekta.

Analiza početnog vremena reverberacije (EDT) je pokazala da je i u praznoj hali njegova vrednost manja ili jednaka 2,7 s, što je značajno za ostvarivanje razumljivosti govora koji će biti emitovan preko sistema za ozvučavanje. Jedna probna upotreba hale za *ad-hoc* održan košarkaški

turnir, za koji je privremeno postavljen jednostavan iznajmljen sistem za ozvučavanje, pokazao je da je razumljivost emitovanog govora veoma dobra. Sa primenom usmerenih zvučnih sistema, kakvi su inače projektom predviđeni (*line array*), očekuje se da će kvalitet prijema emitovanog govora biti odličan.



Slika 8 - Proračun vremena reverberacije za punu halu (radi poređenja je ucrtana i izmerena kriva sa slike 7).

LITERATURA

- [1] M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, "Lokalni efekti u akustičkom odzivu veoma velikog zatvorenog prostora", XLVII Konferencija ETAN-a, Herceg novi (2003) Zbornik radova 430-433
- [2] "Guide to basketball facilities for high-level competitions", FIBA
- [3] E. Meyer, D. Kunstman, H. Kuttruff, "Ber einige Messungen zur schallabsorption von Publikum", Acustica, Vol. 14 (1964) 119-124

Abstract – This paper presents a case study of the acoustic design of "Belgrade's Arena" hall. Paper presents the results of acoustic measurements in hall before start the work at designing its acoustic adaptation and methodology of designing procedure using software model of the hall. After all designed acoustic measures had been installed in enterier, measurements performed shown results of this acoustical enterprise.

ACOUSTIC DESIGN OF "BELGRADE'S ARENA" HALL
Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Husnija Kurtović



Slika 9 - Spoljašnji izgled "Beogradske arene" danas.