Sveučilište u Zagrebu

Fakultet elektrotehnike i računarstva

**Mjerenje i analiza razumljivosti govora - primjena STI metode**

Student: Boris Boronjek

Mentor: Marko Horvat

Zagreb, 2025

# 1. Sadržaj

[1. Sadržaj 2](#_Toc198403672)

[2. Uvod 3](#_Toc198403673)

[3. Faktori koji utječu na razumljivost govora 4](#_Toc198403674)

[3.1 Kvaliteta sustava ozvučenja 4](#_Toc198403675)

[3.2 Zvučni tlak (SPL) 4](#_Toc198403676)

[3.3 Ambijentalna buka 4](#_Toc198403677)

[3.4 Vrijeme odjeka (RT60) 4](#_Toc198403678)

[3.5 Frekvencijski odziv sustava 4](#_Toc198403679)

[3.6 Maskiranje 4](#_Toc198403680)

[3.7 Utjecaj prisutnih osoba 5](#_Toc198403681)

[3.8 Praktična provedba STIPA mjerenja 5](#_Toc198403682)

[4. STI metoda 6](#_Toc198403683)

[4.1 IEC 60268-16:2020 standard 6](#_Toc198403684)

[4.2 Opis metode 7](#_Toc198403685)

[4.3 Matematička osnova 7](#_Toc198403686)

[4.4 STIPA 7](#_Toc198403687)

[5. Primjena STI metode 8](#_Toc198403688)

[5.1 Vrste sustava i prostora gdje se koristi STI 8](#_Toc198403689)

[5.2 Postupak mjerenja 8](#_Toc198403690)

[6. Ograničenja i alternative 10](#_Toc198403691)

[7. Zaključak 12](#_Toc198403692)

[8. Literatura 13](#_Toc198403693)

[9. Sažetak 14](#_Toc198403694)

# 2. Uvod

Govor je temeljni oblik međuljudske komunikacije. Njegova razumljivost ključna je za uspješan prijenos informacija, osobito u kontekstima gdje točnost i brzina prijenosa poruke imaju važnu ulogu — primjerice u javnim sustavima ozvučenja, sigurnosnim sustavima za evakuaciju, obrazovnim prostorima te sustavima daljinske komunikacije. Međutim, govorni signal često prolazi kroz prijenosni kanal koji ga može degradirati, zbog čega dolazi do smanjenja razumljivosti na strani slušatelja. Na tu degradaciju mogu utjecati različiti faktori poput akustike prostora, pozadinskog šuma ili tehničkih karakteristika samog sustava.

Kako bi se kvantificirala takva degradacija i omogućila objektivna procjena kvalitete prijenosa govora, razvijena je metoda mjerenja poznata kao Speech Transmission Index (STI). Ova metoda koristi posebno generiran testni signal koji se reproducira kroz kanal ili sustav, a zatim analizira primljeni signal kako bi se izračunala vrijednost STI-a — brojčani pokazatelj razumljivosti govora u rasponu od 0 (nerazumljivo) do 1 (potpuno razumljivo).

STI metoda prvi put je razvijena 1970-ih godina i od tada je prošla kroz niz usavršavanja. Danas je definirana i standardizirana u međunarodnom standardu IEC 60268-16:2020, koji osigurava pouzdanost i konzistentnost mjerenja u različitim aplikacijama. Zbog svoje učinkovitosti i praktične vrijednosti, STI metoda je široko prihvaćena diljem svijeta i koristi se u projektiranju i evaluaciji audio sustava u raznim akustičkim okruženjima.

Unatoč brojnim prednostima, STI metoda ima i određena ograničenja. Kako bi se spriječilo pogrešno tumačenje rezultata, važno je da korisnici ove metode razumiju njezina teorijska načela, područje primjene i granice točnosti. Cilj ovog rada je upravo to — pružiti detaljan pregled STI metode, njezine primjene i važnosti u vrednovanju razumljivosti govora.

# 3. Faktori koji utječu na razumljivost govora

Razumljivost govora nije isključivo rezultat kvalitete samog govora, već je posljedica složenog međudjelovanja akustičkih uvjeta, tehničkih karakteristika prijenosnog sustava te okoline u kojoj se govor prenosi. Prilikom ocjenjivanja razumljivosti govora s pomoću STI metode, važno je razumjeti koji sve faktori mogu pozitivno ili negativno utjecati na konačnu ocjenu.

## 3.1 Kvaliteta sustava ozvučenja

Jedan od najvažnijih tehničkih čimbenika jest kvaliteta i podešenost sustava javnog ozvučenja (PA sustava). Sustav mora biti sposoban reproducirati govorni signal bez značajnih izobličenja i s ravnomjernom pokrivenošću prostora. Loša usmjerenost zvučnika, neprilagođen odabir opreme i neadekvatna instalacija mogu znatno umanjiti razumljivost.

## 3.2 Zvučni tlak (SPL)

Razina zvučnog tlaka mora biti dovoljno visoka kako bi se govor mogao čuti iznad ambijentalne buke, ali ne preglasna da izazove nelagodu ili izobličenje. Previsok SPL može smanjiti razumljivost uslijed distorzije ili neugodnog slušnog doživljaja, dok prenizak SPL može dovesti do maskiranja govora.

## 3.3 Ambijentalna buka

Pozadinski šum, bilo da dolazi od prometa, publike, strojeva ili ventilacijskih sustava, može ozbiljno umanjiti razumljivost govora. Šum konkurira govornom signalu i može ga djelomično ili potpuno maskirati, osobito ako se nalazi u istom frekvencijskom opsegu kao i glas govornika.

## 3.4 Vrijeme odjeka (RT60)

Reverberacija, tj. vrijeme potrebno da se zvuk smanji za 60 dB nakon što izvor prestane emitirati, jedan je od ključnih akustičkih parametara. Predugo vrijeme odjeka uzrokuje preklapanje slogova i riječi, čime se smanjuje jasnoća govora. S druge strane, premalo refleksija može učiniti govor neprirodnim, stoga je važno pronaći optimalnu ravnotežu.

## 3.5 Frekvencijski odziv sustava

Govorni signal sadrži bitne informacije u rasponu od oko 250 Hz do 4 kHz. Sustavi koji imaju neuravnotežen frekvencijski odziv, npr. previše niskih frekvencija (basa), mogu zamutiti artikulaciju riječi. Smanjenje viših frekvencija također vodi do gubitka jasnoće suglasnika, koji su ključni za razlikovanje riječi.

## 3.6 Maskiranje

Maskiranje se događa kada jedan zvuk zaklanja drugi zbog preklapanja u frekvenciji i vremenu. U kontekstu govora, maskiranje najčešće uzrokuje pozadinska buka koja dijeli slične frekvencijske komponente s govorom. Ova pojava otežava slušatelju da razluči pojedine foneme, što drastično smanjuje razumljivost.

## 3.7 Utjecaj prisutnih osoba

Zanimljivo je primijetiti da sama prisutnost ljudi u prostoru može imati dvostruki učinak. S jedne strane, ljudi proizvode šum, ali s druge strane, njihova tijela apsorbiraju zvuk, što može pomoći u smanjenju odjeka i opće razine buke, poboljšavajući razumljivost govora u određenim slučajevima.

## 3.8 Praktična provedba STIPA mjerenja

Za provedbu STIPA (Speech Transmission Index for Public Address systems) mjerenja nije potrebna složena oprema. U osnovi, potrebno je imati mjerni uređaj sa STIPA funkcionalnosti, izvor STI testnog signala i alat za izradu izvještaja. Samo mjerenje uključuje puštanje STI signala na mjestu koje želimo analizirati i mjerenje odgovora prijenosnog sustava. Međutim, točnost i pouzdanost rezultata ovise o kvaliteti korištene opreme, ali i o iskustvu osobe koja provodi mjerenje.

# 4. STI metoda

## 4.1 IEC 60268-16:2020 standard

Standard IEC 60268-16:2020 je šesnaesti dio serije međunarodnih standarda o zvučnim sustavima. Ovaj dio specifično se bavi objektivnim ocjenjivanjem razumljivosti govora primjenom indeksa prijenosa govora (STI). Standard pruža sveobuhvatan okvir za definiciju STI modela, testnih signala, metoda mjerenja i predviđanja razumljivosti.

IEC 60268-16 namijenjen je širokom spektru korisnika u području elektroakustike, uključujući proizvođače zvučnih sustava, komunikacijskih uređaja, akustičkih materijala, kao i audio tehničare i inženjere. Glavni cilj standarda je osigurati jedinstvenu metodologiju za procjenu kvalitete prijenosa govora, uzimajući u obzir različite akustičke i elektroakustičke smetnje koje mogu utjecati na razumljivost.

STI metoda propisana ovim standardom koristi specifičan testni signal koji se primjenjuje na prijenosni kanal. Analizom primljenog signala izračunava se vrijednost STI-ja između 0 i 1, čime se može odrediti očekivana razumljivost govora.

Važno je naglasiti da ovaj standard:

* ne definira kriterije za certifikaciju sustava (npr. za evakuacijske razglase), ali pruža tipične vrijednosti STI-ja za praktične primjene
* sadrži upozorenja i ograničenja mjernih metoda u slučajevima kao što su privatnost govora, odjek ili digitalna kompresija zvuka
* ne pokriva izravno utjecaj promjenjive (fluktuirajuće) buke na STI, ali uključuje komentare o tom složenom pitanju

U verziji iz 2020. godine, standard donosi nekoliko važnih izmjena u odnosu na prethodnu verziju iz 2011., uključujući:

* promjenu spektra muškog testnog govora, sa značajnim smanjenjem razina u frekvencijama 125 Hz i 250 Hz;
* uklanjanje spektra i pondera za ženski govor;
* dodatne informacije o predikcijskim i mjernim postupcima;
* ispravke formula i dopune vezane za verifikaciju mjernih uređaja.

Zahvaljujući svojoj jasnoći i primjenjivosti, IEC 60268-16:2020 danas je ključni referentni dokument za sve koji se bave dizajnom, provjerom i optimizacijom govorno orijentiranih komunikacijskih sustava.

## 4.2 Opis metode

Indeks prijenosa govora (engl. Speech Transmission Index, STI) predstavlja kvantitativnu mjeru razumljivosti govora u određenom akustičkom prostoru ili putem elektroakustičkog sustava. Razumljivost govora ovisi o kvaliteti prijenosnog kanala, a STI metoda omogućuje ocjenu tog kanala bez uključivanja varijabli vezanih uz govornika ili slušatelja. Vrijednosti STI-ja izražavaju se u rasponu od 0 do 1, pri čemu je vrijednost bliža 1 pokazatelj veće razumljivosti govora. Visoka razumljivost je ključna u situacijama gdje točna i brza interpretacija govorne poruke može utjecati na sigurnost, kao što su hitni razglasi, evakuacijski sustavi ili komunikacija u složenim industrijskim sustavima.

## 4.3 Matematička osnova

STI se temelji na analizi prijenosa modulacije govornog signala kroz prijenosni kanal. Govor se prirodno sastoji od varijacija u jačini zvuka, odnosno amplitude, koje se nazivaju modulacijama. Tijekom prijenosa, ove modulacije mogu biti oslabljene zbog raznih čimbenika poput pozadinske buke, odjeka (reverberacije) ili neadekvatnog frekvencijskog odziva sustava. Za izračun STI-ja koristi se odnos između ulazne i izlazne dubine modulacije po frekvencijskim pojasevima i modulacijskim frekvencijama. Rezultati se ponderiraju prema važnosti pojedinih pojaseva za razumljivost govora. Rezultat je brojčana vrijednost STI-ja, koja se može interpretirati prema tablicama razumljivosti.

## 4.4 STIPA

STIPA (engl. Speech Transmission Index for Public Address) predstavlja pojednostavljenu verziju STI metode prilagođenu praktičnoj primjeni u stvarnim prostorima. Dok Full STI zahtijeva izvođenje 98 odvojenih mjerenja s različitim modulacijskim frekvencijama, STIPA koristi jedinstveni testni signal temeljen na moduliranom ružičastom šumu. STIPA mjeri promjene modulacije u dva frekvencijska pojasa po oktavi, što omogućuje da se pouzdano mjerenje STI-ja izvede u vremenu kraćem od 20 sekundi. Ova metoda postala je industrijski standard jer omogućuje brzo i točno ocjenjivanje sustava javnog razglasa, evakuacijskih sustava i sličnih rješenja gdje je brzina i učinkovitost mjerenja od velike važnosti.

# 5. Primjena STI metode

## 5.1 Vrste sustava i prostora gdje se koristi STI

Primjena STI metode je od ključne važnosti u prostorima i sustavima gdje razumljivost govora može izravno utjecati na sigurnost, orijentaciju i donošenje odluka. Takvi sustavi uključuju:

* Sustavi za uzbunjivanje i evakuaciju
  + Voice Alarm – VA
* Javni razglasni sustavi
  + Public Address - PA
* Sustavi u industriji
  + tvornice, elektrane, naftne platforme
* Prostori s velikim brojem ljudi:
  + zračne luke, željezničke stanice, stadioni, trgovački centri, bolnice, muzeji, konferencijske dvorane
* Obrazovne i kulturne institucije
  + predavaonice, koncertne kino dvorane

U svim ovim prostorima ključna je mogućnost prijenosa jasnih govorenih poruka koje će korisnici moći razumjeti u bilo kojem trenutku, bez obzira na buku ili akustičke smetnje.

## 5.2 Postupak mjerenja

Postupak mjerenja govorne razumljivosti s pomoću STI metode temelji se na analizi promjene modulacije testnog signala tijekom prijenosa kroz akustički ili elektroakustički kanal. Mjerenje se može izvesti koristeći punu STI metodu ili znatno učinkovitiju i danas široko prihvaćenu STIPA (Speech Transmission Index for Public Address systems) metodu.

1. Generiranje testnog signala

Kod STIPA metode koristi se sintetizirani testni signal u obliku moduliranog ružičastog šuma, koji sadrži dvije modulacijske frekvencije po oktavnoj traci, pokrivajući frekvencijski raspon od 125 Hz do 8 kHz. Signal može biti emitiran na dva načina:

* Akustički: s pomoću kalibriranog zvučnika (npr. TalkBox) koji oponaša karakteristike ljudskog govora.
* Elektronički: izravnim umetnutim signalom na linijski ulaz audio sustava.

2. Postavljanje mjernog uređaja

Na pozicijama predviđenim za slušatelje (npr. u auditorijima, hodnicima, radnim prostorima), postavlja se mjerni mikrofon povezan s analizatorom koji mjeri modulacijski prijenosni indeks (MTI) po pojedinim frekvencijskim trakama. Tipični uređaji koriste digitalne signalne procesore (DSP) za detekciju i analizu razina modulacije.

3. Izračun STI vrijednosti

Na temelju usporedbe modulacijske dubine između emitiranog i primljenog signala, izračunava se STI vrijednost za svaki kanal. Faktor modulacije umanjen reverberacijom, bukom i drugim izobličenjima ulazi u algoritam prema IEC 60268-16 specifikaciji. Dobivena STI vrijednost je decimalni broj između 0 i 1, gdje veće vrijednosti ukazuju na bolju razumljivost.

* 0.00 – 0.30: loša razumljivost
* 0.30 – 0.45: slaba razumljivost
* 0.45 – 0.60: zadovoljavajuća razumljivost
* 0.60 – 0.75: dobra razumljivost
* 0.75 – 1.00: vrlo dobra razumljivost

4. Dodatni parametri

Uz STI, moderni analizatori istovremeno mjere i razinu pozadinske buke, vrijeme odjeka i signal-to-noise ratio koji su ključni faktori u tumačenju rezultata. Neki uređaji omogućuju i prikaz prostorne raspodjele STI vrijednosti u obliku mapa razumljivosti.

5. Verifikacija i interpretacija

Rezultati mjerenja uspoređuju se s preporukama za pojedine vrste prostora. Verifikacija uključuje ponavljanje mjerenja na više točaka i analiza homogenosti akustičkog pokrivanja.

# 6. Ograničenja i alternative

Iako je STI metoda široko prihvaćena kao standard za mjerenje razumljivosti govora, postoje brojna ograničenja i specifične situacije u kojima može davati netočne ili nepouzdane rezultate. U nastavku su istaknuta najvažnija tehnička ograničenja te preporučene alternative i nadopune mjerenju:

* Signalni prekidi i dropout-ovi: Kod bežičnog prijenosa signala, selektivno slabljenje može uzrokovati povremene gubitke signala (dropout). Iako STI rezultat može ostati relativno visok, subjektivna razumljivost može biti znatno narušena. Preporučuje se analiza fine strukture signala kako bi se detektirali i izostavili dropout-ovi iz izračuna.
* Jitter: Varijacije u vremenskom sinkroniziranju (jitter), prisutne u digitalnoj transmisiji, mogu značajno smanjiti STI, iako ne utječu na subjektivnu razumljivost govora. STI u takvim slučajevima podcjenjuje stvarnu razumljivost.
* Digitalna kompresija govora: Sustavi za digitalnu kompresiju često su temeljeni na modelima ljudskog govora i mogu potisnuti STI test-signale koji se baziraju na moduliranom šumu. Kao rezultat toga, STI nije prikladan za kanale koji koriste ovu vrstu kompresije, osim ako se dokaže da signali ostaju nepromijenjeni (npr. kod viših bitrate-ova).
* Prenisko pozadinsko šumno okruženje: Ako se mjerenja provode bez realne razine pozadinske buke ili s nerealno niskim pragovima percepcije, STI može biti nerealno visok. Model podrazumijeva prisutnost određene razine šuma, stoga simulacije i mjerenja moraju uključivati realne razine ambijentalne buke.
* Frekvencijski odziv sustava: Neujednačen frekvencijski odziv prijenosnog kanala može značajno utjecati na percepciju tonalne ravnoteže i razumljivosti, iako STI to ne prikazuje precizno. Preporučuje se dodatno mjerenje frekvencijskog odziva s visokom rezolucijom (npr. 1/3 oktave) kako bi se osigurala točna procjena.
* Jeka i sekundarne refleksije: Odgođeni odjeci mogu smanjiti razumljivost, iako STI može ostati visok. Sekundarne refleksije utječu na MTF kao „notch“ filter, stvarajući lokalne padove u modulaciji. Potrebno je koristiti dodatne metode analize refleksija u prostorima s izraženim jekom.
* Kompresija i AGC: Brza kompresija signala može smanjiti dubinu modulacije, utječući na STI, ali ne nužno i na razumljivost. AGC (Automatic Gain Control) sustavi imaju sporije reakcije i generalno ne utječu na kratkoročni dinamički raspon. Kompresija se može koristiti u korist razumljivosti, osobito kod korisnika sa slušnim oštećenjima.
* Nelinearna izobličenja: STI je osjetljiv na nelinearna izobličenja, ali mjerni rezultati ovise o konkretnoj metodi mjerenja.
* Slušatelji sa slušnim oštećenjima: Standardni STI model ne predviđa točno razumljivost za osobe sa slušnim oštećenjima bez specifičnih prilagodbi (npr. promjena pragova percepcije, isključenje maskirajućih funkcija).
* Impulsna i fluktuirajuća buka: Prisutnost impulsne ili nestabilne buke može narušiti točnost mjerenja. Fluktuirajuća buka može uzrokovati podcjenjivanje STI rezultata jer slušatelji često „hvataju“ govor u pauzama između šumova. Preporučuje se da uređaji za STI mjerenje detektiraju i označe prisutnost ovakvih smetnji.

Zaključno, iako je STI konzervativan pokazatelj razumljivosti, njegova ograničenja zahtijevaju pažljivu interpretaciju rezultata. U određenim slučajevima preporučuje se dopuna mjerenja dodatnim metodama kao što su analiza frekvencijskog odziva, detekcija refleksija i subjektivno testiranje s korisnicima.

# 7. Zaključak

Metoda Speech Transmission Index (STI) predstavlja jedan od najvažnijih alata za objektivno mjerenje razumljivosti govora u različitim akustičkim i komunikacijskim sustavima. Standardizirana prema normi IEC 60268-16:2020, STI metoda omogućuje dosljednu i ponovljivu procjenu utjecaja različitih faktora poput šuma, reverberacije i izobličenja na prijenos govora. Kroz jednostavno načelo analize modulacijskog prijenosa, STI pruža kvantitativnu vrijednost razumljivosti govora, što je od ključnog značaja pri projektiranju, optimizaciji i evaluaciji komunikacijskih sustava, prostora i uređaja.

Unatoč svojoj praktičnosti i širokoj primjeni, metoda nije bez nedostataka. Kao što je prikazano u poglavlju o ograničenjima, postoje brojni scenariji u kojima STI može podcijeniti ili precijeniti stvarnu razumljivost, osobito u prisutnosti jeke, fluktuirajuće buke, nelinearnih izobličenja ili kompresije govora. Također, standardni STI model nije uvijek pouzdan za specifične korisničke skupine, poput osoba s oštećenjem sluha.

Alternativne metode i nadopune, uključujući subjektivna testiranja, dodatna mjerenja frekvencijskog odziva ili korištenje poboljšanih algoritama analize signala, mogu u određenim slučajevima pružiti precizniju sliku stvarne razumljivosti govora. Ipak, zahvaljujući jednostavnosti implementacije i interpretacije, STI ostaje široko prihvaćena i korisna metoda za evaluaciju kvalitete govorne komunikacije.

U budućnosti, daljnje istraživanje i nadogradnja STI metode, uključujući bolju prilagodbu stvarnim uvjetima sluha i razvoju novih tehnologija prijenosa, bit će ključni za održavanje njezine relevantnosti i točnosti u brzo mijenjajućem akustičkom i komunikacijskom okruženju.

# 8. Literatura

1. „oprema audiosustava - 16.dio: objektivno vrednovanje razumljivosti govora s pomoću indeksa razumljivosti govora (IEC 60268-16:2020; EN IEC 60268-16:2020)“

2. <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/basics-of-sti-measurement>

3. <https://xiengineering.com/speech-intelligibility-index-sti-stipa-speech-intelligibility-measurements/>

4. <https://knowledge.bsigroup.com/products/sound-system-equipment-objective-rating-of-speech-intelligibility-by-speech-transmission-index-3>

# 9. Sažetak

U ovom seminarskom radu obrađena je metoda za mjerenje razumljivosti govora poznata kao Speech Transmission Index (STI). Riječ je o objektivnoj metodi koja se koristi za kvantificiranje kvalitete prijenosa govora u različitim komunikacijskim i akustičkim sustavima, a standardizirana je prema međunarodnoj normi IEC 60268-16:2020. Kroz prikaz osnovnog principa rada metode, opisano je kako se iz modulacijskog prijenosa izvodi STI vrijednost koja odražava razumljivost govora na ljestvici od 0 do 1.

Posebna pažnja posvećena je vrstama sustava i prostora u kojima se metoda koristi, kao što su javni razglasni sustavi, prostori za evakuaciju, željezničke postaje i slični akustički zahtjevni okoliši. Također je detaljno prikazan praktični postupak mjerenja, uključujući potrebnu opremu, uvjete i parametre koji se uzimaju u obzir pri provedbi ispitivanja.

Rad završava kritičkim osvrtom na mogućnosti i ograničenja STI metode, naglašavajući važnost razumijevanja konteksta u kojem se koristi te potrebu za pažljivom interpretacijom rezultata.