

# Evaluacija adaptivnih AI modela za poboljšanje SNR i razumljivosti govora u slušnim aparatima

Vesna Simikić  
Fakultet tehničkih nauka  
Univerzitet u Kragujevcu  
Čačak, Srbija  
simikic.vesna.85@gmail.com

Vanja Luković  
Fakultet tehničkih nauka  
Univerzitet u Kragujevcu  
Čačak, Srbija  
[vanja.lukovic@ftn.kg.ac.rs](mailto:vanja.lukovic@ftn.kg.ac.rs)

**Sažetak**—Gubitak sluha je stanje smanjene sposobnosti percepcije zvukova ili govora. Može biti privremen ili trajan, djelimičan ili potpun, te zahvatiti jedno ili oba uva. Savremeni slušni aparati sve češće primjenjuju adaptivne algoritme zasnovane na vještačkoj inteligenciji (AI) radi poboljšanja slušanja u složenim i bučnim okruženjima. Cilj rada je procjena uticaja AI algoritama na unapređenje odnosa signal-šum (SNR), razumijevanje govora i smanjenje napora kod korisnika slušnih aparata. Istraživanje je sprovedeno na uzorku od 30 ispitanika i izvršeno je poređenje rezultata upotrebe uređaja bez i sa AI funkcijama. Rezultati ukazuju na statistički značajno poboljšanje SNR-a, bolje razumijevanje govora i smanjenje subjektivnog napora pri upotrebi uređaja sa AI algoritmima, te potvrđuju potencijal adaptivnih AI modela za poboljšanje performansi slušnih aparata i kvaliteta života korisnika.

**Keywords**—slušni aparati, vještačka inteligencija, SNR, razumijevanje govora, napor slušanja

## I. UVOD

Gubitak sluha predstavlja jedan od najčešćih senzorskih poremećaja savremenog društva i značajno utiče na kvalitet života, komunikaciju i socijalnu uključenost pojedinaca. Iako su tradicionalni slušni aparati omogućili osnovno pojačanje zvuka, njihova efikasnost u bučnim i dinamičnim akustičnim okruženjima ostaje ograničena. Razvoj vještačke inteligencije (eng. Artificial Intelligence – AI) omogućio je implementaciju adaptivnih algoritama za automatsko prepoznavanje zvučnog okruženja, redukciju šuma i poboljšanje razumljivosti govora.

Poseban izazov predstavlja objektivna i subjektivna evaluacija ovih tehnologija u realnim uslovima korištenja. Cilj ovog rada je evaluacija performansi adaptivnih AI modela u komercijalno dostupnim slušnim aparatima kroz analizu poboljšanja odnosa signal-šum (eng. Signal-to-Noise Ratio - SNR), razumijevanja govora i smanjenja napora slušanja, primjenom dizajna mjerenja prije i poslije AI funkcija. Na osnovu definisanog cilja, postavljene su hipoteze da primjena adaptivnih AI algoritama značajno poboljšava SNR i razumijevanje govora, uz istovremeno smanjenje napora slušanja kod korisnika slušnih aparata. Postoji snažna pozitivna korelacija između poboljšanja SNR-a i razumijevanja govora kod korisnika slušnih aparata. Poboljšanje SNR-a ostvareno primjenom AI algoritama statistički je značajno povezano sa smanjenjem subjektivnog napora slušanja.

Ovaj rad organizovan je u šest poglavlja. Drugo poglavlje bavi se prikazom karakteristika savremenih slušnih aparata i pregledom ranijih istraživanja, dok se u trećem poglavlju pojašnjava metodologija po kojoj je istraživanje sprovedeno. U četvrtom poglavlju dati su numerički rezultati istraživanja koji kroz statističke analize potvrđuju poboljšanje performansi slušnih aparata nakon aktivacije adaptivnih AI algoritama. U

petom poglavlju diskutovani su rezultati iz četvrtog poglavlja. Zaključak ovog rada dat je u šestom poglavlju.

## II. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Savremeni slušni aparati predstavljaju sofisticirane sisteme za obradu govora čiji je osnovni cilj poboljšanje razumljivosti govora u različitim akustičnim okruženjima [12], [16]. Ključna metrika u ovom kontekstu jeste odnos signal-šum (SNR), koji direktno utiče na inteligibilnost govora kod korisnika sa oštećenjem sluha [1], [12]. U uslovima smanjenog SNR-a, naročito u prisustvu pozadinske buke, korisnici slušnih aparata često doživljavaju povećan kognitivni napor i smanjenu efikasnost komunikacije [11], [12]. Zbog toga je optimizacija SNR-a centralni zadatak algoritama ugrađenih u slušne aparate [2], [10]. Integracija naprednih signalnih karakteristika, kao što su wavelet i sub-band analize, dodatno unapređuje performanse AI modela, kako smatraju Wu i Hung (2025) [14], potvrđujući njihovu superiornost u odnosu na konvencionalne slušne aparate po mišljenju Ausilija i ostalih (2025) [8], [9]. Poboljšanje prethodno navedene metrike ne utiče samo na akustički kvalitet, već i na subjektivni doživljaj slušanja i kvalitet života korisnika [1], [4].

Tradicionalni slušni aparati oslanjali su se na klasične tehnike redukcije šuma, koje se temelje na statističkim pretpostavkama o govoru i šumu [7], [12]. Iako ovi algoritmi mogu poboljšati kvalitet signala u relativno stabilnim uslovima, njihova primjena je ograničena u dinamičnim realnim okruženjima, poput razgovora u bučnim javnim prostorima [2], [15]. Lazim i ostali (2020), kao i Park i ostali (2020) smatraju da tradicionalne metode redukcije šuma, poput Wiener filtera i klasične adaptivne eliminacije šuma, imaju ograničenu efikasnost u promjenjivim akustičkim uslovima [7], [12], što je dovelo, po tvrdnji Sonija (2025), do intenzivne primjene AI i modela dubokog učenja, kao i po tvrdnji Steinmetza i ostalih (2025), za preciznije razdvajanje govora i šuma [2], [5], [15]. Neadekvatna procjena šuma može dovesti do izobličenja govora i smanjene prirodnosti zvuka [7], [12]. Takva ograničenja posebno su izražena kod korisnika slušnih aparata, jer degradacija govora dodatno otežava perceptivnu obradu [9]. Kao rezultat, klasični pristupi često ne uspijevaju obezbijediti zadovoljavajući nivo razumljivosti u složenim akustičnim scenarijima [12].

Uvođenje vještačke inteligencije u slušne aparate omogućilo je primjenu adaptivnih modela zasnovanih na dubokom učenju i drugim metodama mašinskog učenja [2], [5], [10]. Duboke neuronske mreže trenirane su na velikim bazama realnih zvučnih scena, što im omogućava da precizno razlikuju govor od šuma i prilagode obradu signala u realnom vremenu [5], [15]. Ovi modeli mogu dinamički optimizovati parametre poput pojačanja, usmjerenosti mikrofona i stepena

redukcije šuma [3], [13]. Pristupi zasnovani na učenju pojačanjem omogućavaju sistemima da kontinuirano uče iz interakcije sa okruženjem i korisnikom [13]. Al-Jame i Tasil (2025) smatraju da se posebna prednost AI sistema ogleda u njihovoj adaptivnosti, pri čemu modeli zasnovani na „reinforcement learning-u“ omogućavaju dinamičko prilagođavanje različitim akustičkim scenarijima i individualnim potrebama korisnika, uz poboljšanje SNR-a i energetske efikasnost, kako tvrde Ogundairo i ostali (2025) [3], [13]. Takva adaptivnost čini slušne aparate sa AI znatno efikasnijim u odnosu na tradicionalna rješenja [2], [16].

Primjena AI tehnologija u slušnim aparatima rezultuje značajnim poboljšanjem SNR-a i očuvanjem ključnih karakteristika govornog signala [2], [14], [15]. Ovo se direktno odražava na povećanu inteligibilnost govora i smanjenje subjektivnog napora slušanja kod korisnika [4], [10], [12]. Savremene evaluacije obuhvataju i objektivne metrike (SNR, PESQ, STOI), ali i subjektivne mjere poput percepcije kvaliteta zvuka i napora slušanja kako tvrde Høydal i ostali (2020), što omogućava personalizovanu slušnu asistenciju i veće prihvatanje tehnologije po mišljenju Drakula i ostalih (2025) [4], [10], [16]. Smanjeno kognitivno opterećenje posebno je važno za stariju populaciju i osobe sa dugotrajnim oštećenjem sluha [1], [11].

AI algoritmi omogućavaju i automatsku klasifikaciju akustičnih okruženja, čime se eliminiše potreba za ručnim podešavanjem aparata [4], [10]. Stoga se integracija vještačke inteligencije smatra ključnim korakom u razvoju inteligentnih, personalizovanih i kontekstualno svjesnih slušnih aparata [5], [10], [16]. Svjetska zdravstvena organizacija tvrdi da gubitak sluha predstavlja značajan javnozdravstveni problem koji negativno utiče na komunikaciju, kvalitet života i kognitivno zdravlje, posebno kod starije populacije [1], [11]. Alexander (2021) smatra da jedan od glavnih izazova u rehabilitaciji sluha jeste razumijevanje govora u bučnim okruženjima, pri čemu nizak odnos signal–šum (SNR) značajno smanjuje govornu razumljivost [12]. Zbog toga savremeni slušni aparati sve češće integrišu adaptivne algoritme zasnovane na vještačkoj inteligenciji (AI) s ciljem poboljšanja SNR-a i smanjenja napora slušanja.

### III. METODOLOGIJA

Istraživanje je sprovedeno kao prospektivna kvantitativna studija sa intraindividualnim dizajnom ponovljenih mjerenja, u okviru kvaziekperimentalnog pretest–posttest pristupa, pri čemu su ispitanici testirani u identičnim uslovima prije i poslije upotrebe aparata sa AI funkcijama. Trideset odraslih učesnika oba pola (prosječna starost 52 godine, raspon 20-88 godina) sa aktivnom upotrebom slušne amplifikacije jednostrano ili dvostrano, učestvovalo je u ispitivanju performansi slušnih aparata bez i sa ugrađenom vještačkom inteligencijom. Ispitanici su koristili jedan ili dva slušna aparata i imali različito iskustvo u korištenju asistivnih slušnih tehnologija. Dio ispitanika je bio izložen bučnim radnim okruženjima, što je omogućilo realističnu evaluaciju performansi aparata.

Ispitanici su koristili komercijalno dostupne slušne aparate proizvođača Phonak, Oticon, Bernafon, Unitron i drugih, kako standardne, tako i one opremljene adaptivnim AI algoritmima za redukciju šuma i automatsko prilagođavanje zvučnom okruženju. Testiranja su vršena sa uređajima bez AI funkcija (prije AI) i sa AI funkcijama (poslije AI). Mjerenja su sprovedena u bučnom ili simuliranom bučnom okruženju.

Svaki ispitanik je testiran u istim uslovima prije (sa običnim slušnim aparatom) i poslije (sa slušnim aparatom sa AI) kako bi se obezbijedila uporedivost rezultata. Podaci su prikupljeni pomoću strukturisanog upitnika.

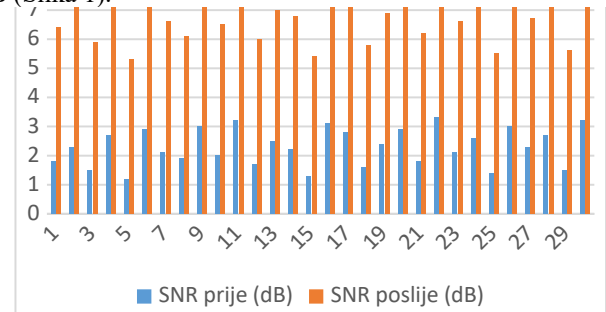
Evaluirane su sljedeće karakteristike:

- SNR (u dB) prije i poslije upotrebe slušnih uređaja sa AI;
- Razumijevanje govora (%) prije i poslije upotrebe slušnih uređaja sa AI;
- Napor slušanja (skala 0–10) prije i poslije upotrebe slušnih uređaja sa AI;
- Trajanje baterije (sati);
- Preciznost AI prilagođavanja (%).

Razumijevanje govora i napor slušanja predstavljaju subjektivne procjene korisnika, dok su SNR i trajanje baterije objektivne mjere. Podaci su analizirani korištenjem deskriptivne statistike (srednje vrijednosti, minimalne i maksimalne vrijednosti) i inferencijalne statistike. Za poređenje mjerenja prije i poslije AI obrade korišten je parni t-test, dok je korelacijska analiza primijenjena za ispitivanje odnosa između SNR poboljšanja, razumijevanja govora i napora slušanja.

### IV. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

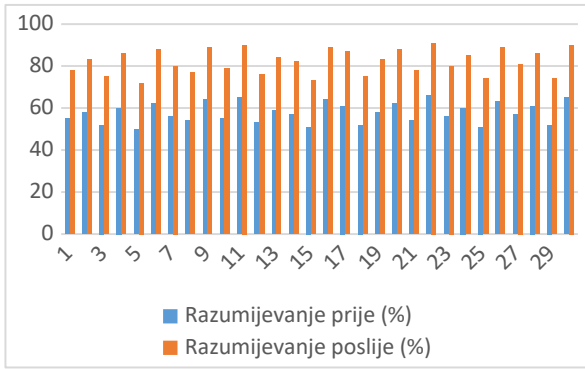
Rezultati istraživanja pokazuju jasno poboljšanje performansi slušnih aparata nakon aktivacije adaptivnih AI algoritama. Prosječna vrijednost SNR-a porasla je sa približno 2 dB prije korištenja algoritama AI na oko 7 dB nakon aktivacije AI, što predstavlja prosječno poboljšanje od oko 5 dB (Slika 1).



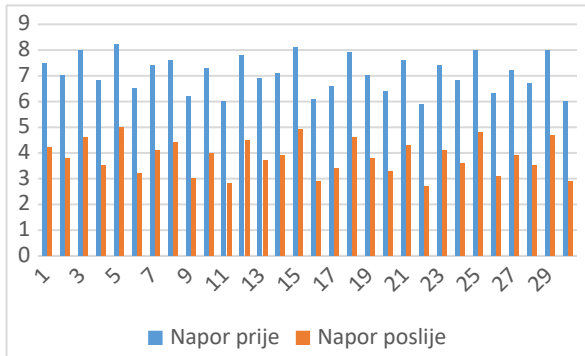
Slika 1. SNR prije i poslije upotrebe AI

Slika 2 prikazuje dijagram razumijevanja govora prije i poslije upotrebe adaptivnih AI algoritama. Na dijagramu se može primijetiti da je procenat razumijevanja ispitanika koji nose slušne aparate sa AI povećan sa prosječnih 55–60% na 80–90%.

Dijagram subjektivnog napora slušanja prikazan je na Slici 3. Može se vidjeti da je prisutno smanjenje napora slušanja ispitanika koji nose slušne aparate sa AI u odnosu na ispitanike koji nose slušne aparate bez AI i to sa vrijednosti oko 7–8 na vrijednosti ispod 4 na skali 0–10.



Slika 2. Razumijevanje prije i poslije upotrebe AI

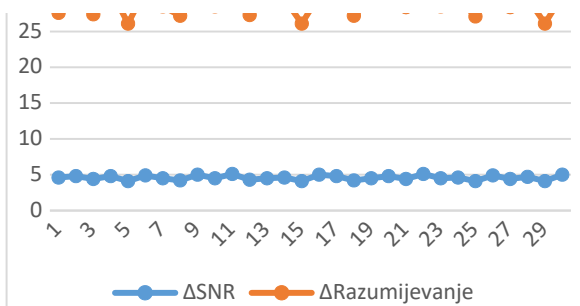


Slika 3. Subjektivni napor slušanja

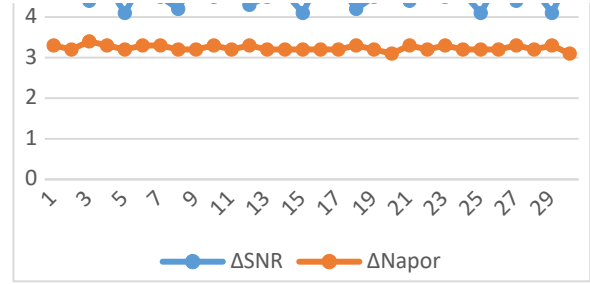
Statistička analiza, odnosno parni t-test, pokazao je izuzetno značajnu razliku između mjerenja prije i poslije AI obrade ( $p < 0.001$ ). Dobijena p-vrijednost ( $1.8 \times 10^{-35}$ ) ukazuje na vrlo snažan efekat primijenjenih AI algoritama.

Na Slici 4 prikazani su rezultati korelacione analize koja je pokazala snažnu pozitivnu vezu između poboljšanja SNR-a i razumijevanja govora ( $r = 0.83$ ). Slika 5 prikazuje rezultate dobijene takođe korelacionom analizom koja je pokazala umjerenu negativnu korelaciju između SNR-a i napora slušanja ( $r = -0.36$ ).

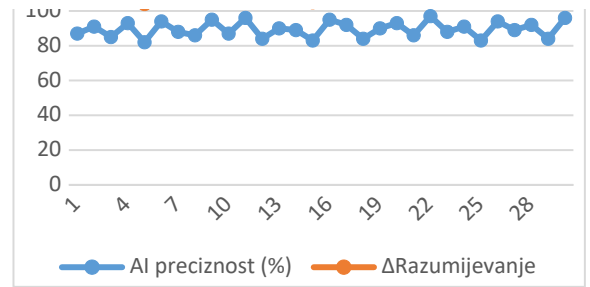
Utvrđena je veoma snažna pozitivna korelacija između preciznosti AI prilagođavanja i razumijevanja govora ( $r = 0.87$ ) (Slika 6), što potvrđuje efikasnost adaptivnih AI algoritama u realnim uslovima slušanja.



Slika 4. Uticaj SNR poboljšanja na razumijevanje govora

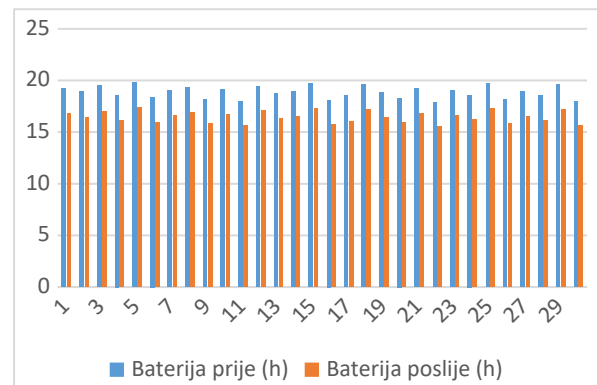


Slika 5. Korelacija između SNR-a i napora slušanja



Slika 6. Korelacija između preciznosti AI prilagođavanja i razumijevanja govora

Aktivacija AI funkcija dovela je do smanjenje trajanja baterije u prosjeku za 2–3 sata (Slika 7), što predstavlja prihvatljiv kompromis u odnosu na dobijena poboljšanja kvaliteta slušanja. Visok procenat preciznosti automatskog prilagođavanja dodatno potvrđuje efikasnost adaptivnih AI modela u realnim akustičnim uslovima.



Slika 7. Trajanje baterije

## V. DISKUSIJA

Dobijeni rezultati potvrđuju da adaptivni AI modeli značajno unapređuju performanse slušnih aparata u bučnim akustičnim okruženjima [2], [10], [16]. Posebno je značajno smanjenje napora slušanja, jer ono direktno utiče na dugotrajno zadovoljstvo korisnika i smanjenje kognitivnog zamora [4], [11], [12].

Iako subjektivne procjene mogu varirati između ispitanika, statistički značajni trendovi jasno ukazuju na prednosti AI-

bazirane obrade zvuka [10], [16]. Ograničenje istraživanja ogleda se u relativno malom uzorku i oslanjanju na subjektivne mjere, što predstavlja smjernicu za buduća istraživanja sa većim brojem ispitanika i dodatnim objektivnim metrikama [9], [12].

Razumijevanje govora i napor slušanja procijenjeni su subjektivno od strane korisnika korištenjem standardizovane skale [4], [12], dok su SNR i trajanje baterije objektivne mjere [3], [13]. Subjektivne procjene analizirane su statistički u cilju identifikacije trendova i korelacija [11], [16].

Rezultati pokazuju da primjena vještačke inteligencije povećava odnos signal–šum (SNR), što direktno doprinosi boljem razumijevanju govora i smanjenju napora prilikom slušanja [2], [5], [14], [15]. Što je AI algoritam precizniji, to je poboljšanje SNR-a veće, a samim tim i razumijevanje govora kvalitetnije [5], [10], [16].

## VI. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenog istraživanja može se zaključiti da adaptivni AI algoritmi u savremenim slušnim aparatima značajno poboljšavaju odnos signal–šum, razumijevanje govora i smanjuju napor slušanja kod korisnika. Dizajn mjerenja prije i poslije upotrebe slušnih aparata sa AI funkcijama omogućio je jasnu identifikaciju pozitivnog efekta vještačke inteligencije na kvalitet slušanja. Statistički značajni rezultati potvrđuju da povećanje SNR-a direktno utiče na bolje razumijevanje govora i manji subjektivni napor, dok je smanjenje trajanja baterije prihvatljivo u odnosu na ostvarene dobitke. Ovaj rad potvrđuje da vještačka inteligencija predstavlja ključni pravac razvoja budućih pametnih slušnih aparata, sa posebnim potencijalom za dalju personalizaciju i optimizaciju energetske efikasnosti.

## ZAHVALNOST

Zahvalnost upućujemo Specijalističkom zdravstvenom centru „S+Medico“ Bijeljina, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, koji je omogućio sprovođenje ovog istraživanja.

## LITERATURA

- [1] WHO, "Deafness and Hearing Loss". Dostupno na: <https://www.who.int/newsroom/factsheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
- [2] Soni, S. S. B. B. "Artificial Intelligence Based Noise Reduction in Audio Signals for Communication Systems-A Review". *Artificial Intelligence*. 2025. Dostupno na: <https://www.ijcsejournal.org/wp-content/uploads/2025/09/IJCSE-V9I5P2.pdf>
- [3] Ogundairo, O., Banerjee, A., Willie, A., and Nguyen, H. T. T., "Power-Efficient Implementations of Adaptive Noise Cancellation for Hearing Aids and Medical Devices". 2025. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/395205611PowerEfficientImplementations\\_of\\_Adaptive\\_Noise\\_Cancellation\\_for\\_Hearing\\_Aids\\_and\\_Medical\\_Devices](https://www.researchgate.net/publication/395205611PowerEfficientImplementations_of_Adaptive_Noise_Cancellation_for_Hearing_Aids_and_Medical_Devices)
- [4] Høydal, E. H., Fischer, R. L., Wolf, V., Branda, E., and Aubreville, M., "Empowering the wearer: AI-based Signia Assistant allows individualized hearing care". *Hearing Review*, 2020, 27(7), 22-26. Dostupno na: <https://hearingreview.com/hearing-loss/patient-care/hearing-fittings/empowering-the-wearer-ai-based-signia-assistant-allows-individualized-hearing-care>
- [5] Steinmetz, C. J., Uhle, C., Everardo, F., Mitcheltree, C., Mcelveen, J. K., Jot, J. M., and Wichern, G., "Audio signal processing in the artificial intelligence era: Challenges and directions". *Journal of the Audio Engineering Society*, 2025, 73, 406-428. Dostupno na: <https://www.merl.com/publications/docs/TR2025-116.pdf>

- [6] Dang, K., Elelu, K., Le, T., and Le, C., "Augmented Hearing of Auditory Safety Cues for Construction Workers: A Systematic Literature Review". *Sensors*, 2022, 22(23), 9135. doi.org/10.3390/s22239135
- [7] Lazim, R. Y., Yun, Z., and Wu, X., "Improving Speech Quality for Hearing Aid Applications Based on Wiener Filter and Composite of Deep Denoising Autoencoders". *Signals*, 2020, 1(2), 138-156. doi.org/10.3390/signals1020008
- [8] Ausili, S. A., Erthal, N., Bennett, C., and Snapp, H. A., "Sound Localization with Hearables in Transparency Mode". *Audiology Research*, 2025, 15(3), 48. doi.org/10.3390/audiolres15030048
- [9] Chen, C.-H., Huang, C.-Y., Cheng, H.-L., Lin, H.-Y. H., Chu, Y.-C., Chang, C.-Y., Lai, Y.-H., Wang, M.-C., and Cheng, Y.-F., "Comparison of personal sound amplification products and conventional hearing aids for patients with hearing loss: A systematic review with meta-analysis". *eClinicalMedicine*, 2022, 46, 101378. doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101378
- [10] Nada, N. and Moaty, A., "Beyond amplification: how artificial intelligence is redefining hearing". *Egypt J Otolaryngol* 41, 211, 2025, doi.org/10.1186/s43163-025-00965-6
- [11] Sankaran, A., and Singla, M. P., "Artificial intelligence in geriatric healthcare: Opportunities and challenges in a transforming landscape". *Frontiers in Health Informatics*, 2024, 13(7), 897-908. Dostupno na: <https://www.healthinformaticsjournal.com/index.php/IJMI/article/view/1557/1636>
- [12] Alexander J. M., "Hearing Aid Technology to Improve Speech Intelligibility in Noise". *Seminars in hearing*, 2021, 42(3), 175–185. doi.org/10.1055/s-0041-1735174
- [13] Al-Jame F. and Tasil L., "Adaptive Noise Cancellation in Smart Hearing Aids Using Reinforcement Learning". *National Journal of Speech and Audio Signal Processing*, 2025, 51-58. doi.org/10.17051/NJSAP/01.02.07
- [14] Wu, Z.-T. and Hung, J.-W., "Improving the Speech Enhancement Model with Discrete Wavelet Transform Sub-Band Features in Adaptive FullSubNet". *Electronics*, 2025, 14(7), 1354. doi.org/10.3390/electronics14071354
- [15] Park, G., Cho, W., Kim, K.-S. and Lee, S., "Speech Enhancement for Hearing Aids with Deep Learning on Environmental Noises". *Applied Sciences*, 2020, 10(17), 6077. doi.org/10.3390/app10176077
- [16] Drakul, D., Golubović, D. and Tanasković, M., "The Application of Artificial Intelligence to Assist People with Hearing Impairments: An Overview of Existing Solutions". Paper presented at Sinteza 2025 - International Scientific Conference on Information Technology, Computer Science and Data Science. 2025. doi.org/oi:10.15308/Sinteza-2025-289-296

## ABSTRACT

Hearing loss is a state of reduced ability to perceive sounds or speech. It can be temporary or permanent, partial or complete, and affect one or both ears. Modern hearing aids are increasingly applying adaptive algorithms based on artificial intelligence (AI) to improve hearing in complex and noisy environments. The aim of the paper is to evaluate the impact of AI algorithms on improving the signal-to-noise ratio (SNR), speech understanding and reducing the effort of hearing aid users. The research was conducted on a sample of 30 respondents and a comparison was made of the results of using devices without and with AI functions. The results indicate a statistically significant improvement in SNR, better speech understanding and a reduction in subjective effort when using devices with AI algorithms, and confirm the potential of adaptive AI models to improve the performance of hearing aids and the quality of life of users.

## EVALUATION OF ADAPTIVE AI MODELS FOR IMPROVING SNR AND SPEECH INTELLIGIBILITY IN HEARING AIDS

Vesna Simikić, Vanja Luković