



# Telemetrija umjetne pužnice

## Cochlear implant telemetry

Dalibor Matković<sup>1,6</sup>, Andro Tarle<sup>1,5</sup>, Vladimir Bedeković<sup>2,4,5</sup>, Robert Trotić<sup>1,3,4,5</sup>✉

<sup>1</sup>Hrvatsko društvo za audiologiju i fonijatriju Hrvatskoga liječničkog zbora

<sup>2</sup>Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

<sup>3</sup>Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

<sup>4</sup>Klinika za otorinolaringologiju i kirurgiju glave i vrata KBC-a Sestre milosrdnice u Zagrebu

<sup>5</sup>Hrvatska liječnička komora

<sup>6</sup>Hrvatska komora fizioterapeuta

### Deskriptori

GLUHOĆA – kirurgija, rehabilitacija; TELEMETRIJA – metode; UMJETNA PUŽNICA; UGRADNJA UMJETNE PUŽNICE; SLUŠNI ŽIVAC; EVOCIRANI SLUŠNI POTENCIJALI; AKCIJSKI POTENCIJALI; PRAG ČUJNOSTI; ELEKTRIČNA STIMULACIJA; PERCEPCIJA GOVORA

### Descriptors

DEAFNESS – rehabilitation, surgery; TELEMETRY – methods; COCHLEAR IMPLANTS – instrumentation; COCHLEAR IMPLANTATION; COCHLEAR NERVE; EVOKED POTENTIALS, AUDITORY; ACTION POTENTIALS; AUDITORY THRESHOLD; ELECTRIC STIMULATION; SPEECH PERCEPTION

**SAŽETAK.** Umjetna pužnica je neurosenzorička proteza, koja je suvremeni tehnički i tehnološki medicinski terapijski izbor liječenja osoba s teškom nagluhošću ili s gluhoćom. Postupak otokirurške ugradnje umjetne pužnice zove se kohlearna implantacija. Telemetrija je sastavni dio tog postupka. Predstavlja metodu mjerenja neuralnog odgovora slušnog živca na električnu stimulaciju. Telemetrijom se određuju pragovi čujnosti, pragovi neugode podražaja i dinamički raspon. Objektivnim parametrima telemetrije procjenjujemo i psihoakustičke parametre, koji su temelj simulacijskih mapa za buduću rehabilitaciju oštećenog sluha.

**SUMMARY.** Artificial cochlea or cochlear implant is the name for neurosensory prosthesis, which is a current surgical treatment for severe hearing loss or deafness. The surgical procedure is cochlear implantation. During the cochlear implantation one of the methods of neural response measuring of the auditory nerve to electrical stimulation is telemetry. It is an integral part of the cochlear implantation procedure. Telemetry determines audibility thresholds, stimulus discomfort thresholds, and dynamic range. With objective parameters, in telemetry we also estimate psychoacoustic parameters, which are the basis of simulation maps for the future hearing rehabilitation.

Telemetrija umjetne pužnice je objektivna elektro-fiziološka metoda koja omogućuje mjerenje ukupnoga akcijskog potencijala slušnog živca kod osoba s ugrađenom umjetnom pužnicom i potvrđuje postojanje neuralnog odgovora na električnu stimulaciju, pa tako i funkcionalnost ugrađenog uređaja i ispravan položaj ugrađenih elektroda. Radi se o odgovoru akcijskih potencijala slušnog živca na telemetrijsku stimulaciju, čija se mjerenja električnim putem evociranog zbirnoga akcijskog potencijala započinju mjeriti perkutanom elektrodama 1990. godine. Telemetrija je 1996. godine tehnički usavršena za rutinsku uporabu, a 1998. godine odobrena je od FDA i uvedena kao standardna metoda mjerenja kod ugrađenih umjetnih pužnica. Provođači umjetnih pužnica postupke telemetrije umjetne pužnice nazivaju sličnim imenima; tvrtka Cochlear (Australija) to zove *Neural Response Telemetry* (NRT), tvrtka MED-EL (Austrija) *Auditory Nerve Response Telemetry* (ANRT), a tvrtka Advanced Biomedics (SAD) *Neural Response Imaging* (NRI).<sup>1–5</sup> Telemetrija se koristi za utvrđivanje ispravnosti i rada ugrađene umjetne pužnice, za praćenje parametara umjetne pužnice kroz vrijeme, za procjenu subjektivnih pragova podražaja i pragova neugode na temelju

objektivnih mjerenja i za procjenu interakcija pojedinih aktivnih kanala umjetne pužnice te određivanja refrakternosti slušnog živca.<sup>6</sup> Cilj i razlog ovoga preglednog rada jest približiti kolegama telemetrijsku metodu mjerenja akcijskih potencijala slušnog živca, kako bi se razumio elektrofiziološki princip rada i funkcioniranja umjetne pužnice.

### Umjetna pužnica

Umjetna pužnica ili kohlearni implant je senzorička proteza koja električki stimulira živčane stanice spiralnog ganglija. Prvu umjetnu pužnicu ugradili su House i Doyle 1961. godine u Americi, u Los Angelesu.<sup>7</sup> Prve umjetne pužnice u Hrvatskoj ugrađene su 1996. godine u Zagrebu, u KBC-u Sestre milosrdnice i KBC-u Zagreb, a zatim 2002. godine i u KBC-u Split, 2003. godine u KBC-u Rijeka i 2017. godine u KBC-u Osijek. Danas ih je u Hrvatskoj ukupno oko 700, a u svijetu

#### ✉ Adresa za dopisivanje:

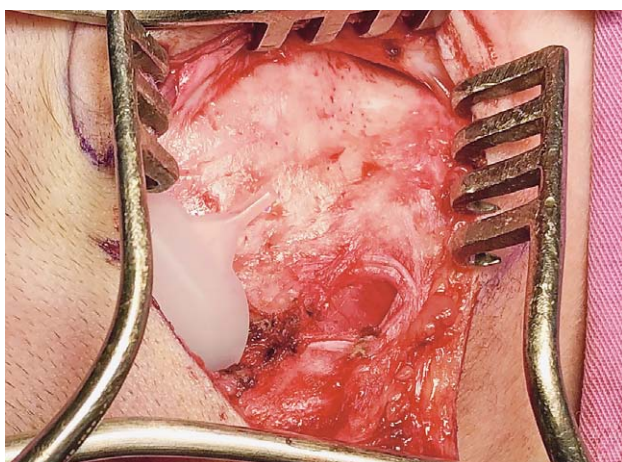
Prof. dr. sc. Robert Trotić, dr. med.,  
Klinika za ORL i kirurgiju glave i vrata, Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu,  
KBC Sestre milosrdnice, Vinogradska 29, 10000 Zagreb, e-pošta: trotic@gmail.com

Primljeno 25. veljače 2021., prihvaćeno 5. srpnja 2021.



(Izvor slike / Photography by: Robert Trotić)

SLIKA 1. INTRAOPERATIVNA TELEMETRIJA  
FIGURE 1. INTRAOPERATIVE TELEMETRY



(Izvor slike / Photography by: Robert Trotić)

SLIKA 2. UGRADNJA UMJETNE PUŽNICE  
FIGURE 2. COCHLEAR IMPLANTATION

oko 800.000. Godišnje se ugradi oko 30 – 40 tisuća umjetnih pužnica. Neki centri rade jednostranu ugradnju umjetne pužnice, dok većina centara radi obostranu ugradnju umjetnih pužnica (slika 2). Obostrana ugradnja umjetnih pužnica postala je zlatni standard u vodećim otološkim svjetskim centrima, a postoperativni rezultati rehabilitacije sluha i slušanja pokazuju bolje dugoročne rezultate s dvjema, nego s jednom ugrađenom umjetnom pužnicom. Umjetna pužnica sastoji se od vanjskog i unutrašnjeg dijela. Vanjski dio obuhvaća mikrofonski procesor govora, odašiljač s magnetom i bateriju. Unutrašnji dio obuhvaća unutrašnji magnet s antenom, generator pulsa, kontrolnu elektroniku, nosač elektroda s aktivnim elektrodama u njemu i referentnu elektrodu (slika 3). Umjetna pužnica radi na principu pretvaranja primljenog zvuka u električne podražaje njihovom digitalizacijom u analogno-digitalnom pretvaraču, obradom u govornom



(Izvor slike / Photography by:  
MED-EL, Fürstenweg 77a, 6020 Innsbruck, Austria)

SLIKA 3. UMJETNA PUŽNICA  
FIGURE 3. COCHLEAR IMPLANT

nom procesoru u vanjskom dijelu uređaja i prenošenjem elektromagnetskom indukcijom u ugrađeni unutarnji dio umjetne pužnice. Tako obrađeni zvuk brzo i precizno stimulira pojedine dijelove spiralnog ganglija.<sup>8</sup> U svijetu postoji nekoliko tvrtki koje proizvode umjetne pužnice: *Cochlear*, *MED-EL*, *Advanced Bionics*, *Oticon Medical* i *Nurotron*. U Hrvatskoj imamo tri vrste umjetnih pužnica, koje su najčešće zastupljene u velikim implantološkim centrima svijeta: *Cochlear* iz Australije, *MED-EL* iz Austrije i *Advanced Bionics* iz Sjedinjenih Američkih Država. Te tri tvrtke pokrivaju 90% svjetskog tržišta umjetnim pužnicama i aktivnim ugradbenim slušnim implantatima. U Hrvatskoj se umjetne pužnice i aktivni ugradbeni slušni implantati nabavljaju svake dvije godine putem natječaja objedinjene javne nabave, a o njihovoj raspodjeli i indikacijama odlučuje nacionalno povjerenstvo, u čijem radu sudjeluju predstavnici kliničkih bolničkih centara u Hrvatskoj u kojima se ugrađuju umjetne pužnice.

### Strategije govornog procesiranja

Umjetne pužnice koriste nekoliko strategija govornog procesiranja. *Compressed Analog Strategy* razlaže akustičku informaciju pojasnim filterima i podražuje sve elektrode istovremeno. Strategija *Continuous Interleaved Sampling* koristi veliku učestalost podraživanja uz manji broj stimulacijskih lokacija. Strategije *Simultaneous Analog Stimulation* i *Paired Pulsatile Sampler* koriste simultanost podraživanja pužnice digitalno rekonstruiranim analognim valom. Strategija *Spectral Peak* uzorkuje signal pojasnim filterima i stimulira šest do deset elektroda u svakom ciklusu učestalosti od 180 do 300 pulsova u sekundi. Strategija *Advanced Combinational Encoder* (ACE) ima bržu stimulaciju šest do deset elektroda u svakom ciklusu učestalosti 900 do 1200 Hz po kanalu.<sup>9–12</sup>

### Uređaj za telemetriju umjetne pužnice

Uređaj za telemetriju umjetne pužnice sastoji se od prijenosnog računala u kojem je program za telemetriju, međusučelja i spojnog kabela s antenom. Ukoliko se radi intraoperativna telemetrija, spojni kabel s antenom proveden je kroz sterilnu najlonsku zaštitu u područje ugrađene umjetne pužnice i prislonjen na kožni režanj iznad ugrađenoga unutrašnjeg magneta s antenom i generatorom pulsa umjetne pužnice. Telemetrija se može napraviti i na daljinu. Takav uređaj ne treba spajati spojnim kabelom kroz sterilnu najlonsku zaštitu, već se antena prislonjena na kožni režanj iznad ugrađenoga unutrašnjeg magneta daljinski spoji s uređajem za telemetriju. Taj je uređaj veličine mobilnog telefona i u sebi sadrži program za intraoperativnu telemetriju (slika 4). Zabilježeni telemetrijski rezultati mogu se uvijek prenijeti u računalo ili poslati elektro-

jem izazvani evocirani slušni potencijali. Oni imaju sličnu morfologiju kao i akustički evocirani potencijali, no služe za procjenu integriteta uređaja i za objektivno mjerenje slušnih razina. To se zove još i određivanje dinamičkog raspona.<sup>14</sup> Intraoperativnom telemetrijom odaberu se reprezentativni dijelovi pužnice, visokotonsko područje, srednjetsko područje i niskotonsko područje. Visokotonsko područje u pužnici se nalazi u bazalnom dijelu pužnice (ovalnom prozorčiću), niskotonsko u apikalnom dijelu (uz helikotremu), a srednjetsko između njih. Kroz pužnicu se proteže bazilarna membrana, koja je duga 33 mm, a na vršku je pet puta šira nego na bazi (500 mm na vršku, 100 mm na bazi). Kanal pužnice zavijen je dva i pol puta. Ugrađena standardna aktivna elektroda umjetne pužnice duga je 27 mm. Ugradnjom standardna elektroda slijedi dva i pol zavoja pužnice, i postaje dva i pol puta zavijena smještajem u pužnici. Standardna elektroda tvrtke *Cochlear* ima 22 aktivne elektrode na ugrađenom nosaču u pužnici, dok standardna elektroda tvrtke *MED-EL* ima 12 aktivnih elektroda, a tvrtke *Advanced Bionics* 16 aktivnih elektroda.<sup>15</sup> Kod 22 aktivne elektrode, telemetrijom se odaberu tonotopski reprezentativne elektrode 5, 11 i 19. Kod 12 aktivnih elektroda odaberu se 2, 6 i 10, a kod 16 aktivnih elektroda odaberu se 3, 8 i 14. Zadanim programima intraoperativne telemetrije odredi se najmanji prag podražaja koji pacijent čuje, koji je ugodan i koji predstavlja njegov prag sluha (T-vrijednost), a zatim se odredi i najveći intenzitet podražaja koji još ne predstavlja neugodu (C-vrijednost). Raspon između T-vrijednosti i C-vrijednosti zove se dinamički raspon (DR). To je područje u kojem pacijent čuje. Telemetrijski prag je prag pojavljivanja ukupnoga akcijskog potencijala slušnog živca (engl. ECAP, *Electrically Evoked Compound Action Potential*) (slika 5). Pojavljuje se unutar dinamičkog raspona. ECAP pomaže pri postoperativnoj prilagodbi umjetne pužnice. Ako nema dovoljno vremena za intraoperativnu telemetriju, ona ostaje na određivanju T-vrijednosti i C-vrijednosti tri kontakta aktivnih elektroda. Napretkom tehnike i tehnologije, sve tvrtke omogućile su brzu i automatsku intraoperativnu telemetriju, tako da se u kratkom vremenu odrede vrijednosti svih aktivnih elektroda u pužnici, objektivni pragovi ECAP-a. Podatci intraoperativne telemetrije koriste se za postoperativno programiranje govornog procesora umjetne pužnice. To se zove prilagodba govornog procesora (engl. *fitting*). Taj postupak obično se provodi u audio-rehabilitacijskim centrima četiri do šest tjedana nakon ugradnje umjetne pužnice, gdje će nakon prilagodbe govornog procesora započeti rehabilitacijski postupak oštećenog sluha. Postoperativnom telemetrijom napravi se simulacijska slušna mapa prema psihoakustičkim ili bihevioralnim pragovima, koja sadrži T-pragove i C-pragove svih aktivnih elektroda u funkciji, što



(Izvor slike / Photography by: Robert Trotić  
Uređaj / Device by: Cochlear, 1 University Avenue,  
Macquarie University, NSW, 2109, Australia)

SLIKA 4. UREĐAJ ZA TELEMETRIJU NA DALJINU  
FIGURE 4. REMOTE DEVICE FOR TELEMETRY

ničkom poštom. Programi korišteni pri telemetriji su različiti kod različitih proizvođača umjetnih pužnica. Tvrtka *Cochlear* koristi program *Custom Sound EP* i *AutoNRT*, tvrtka *MED-EL Maestro 9.0* i *AutoART*, a tvrtka *Advanced Bionics Target CI 1.0* i *AutoSense OS 3.0*.<sup>13</sup>

### Telemetrija

Telemetrija može biti intraoperativna i postoperativna. Intraoperativno se bilježe električnim podražaj-



(Izvor slike / Photography by: Robert Trotić  
ECAP program / ECAP Programme: Maestro 9.0, MED-EL, Fürstenweg 77a,  
6020 Innsbruck, Austria)

SLIKA 5. PRAG POJAVLJIVANJA UKUPNOGA AKCIJSKOG POTENCIJALA SLUŠNOG ŽIVCA

FIGURE 5. EVOKED COMPOUND ACTION POTENTIAL THRESHOLD (ECAP)

pokriva veliki frekvencijski raspon. U postoperativnoj telemetriji bitan je i što veći dinamički raspon. Njime je omogućeno dobro prepoznavanje stupnjeva glasnoće. Kao i kod intraoperativne telemetrije, napredak tehnike i tehnologije omogućio je razvoj automatiziranih programa koji automatski procijene psihoakustičke pragove iz rezultata intraoperativne telemetrije. Time se olakšava stvaranje simulacijskih mapa kod male djece i kod hendikepiranih osoba koje nisu u stanju subjektivno procijeniti T-pragove i C-pragove telemetrije.<sup>17,18</sup> Holstad i Potts istraživali su korelacije objektivnih i subjektivnih T-pragova i C-pragova. Oni su pokazali značajnu korelaciju prosječnih pragova za grupu ispitanika, ali i veliku heterogenost na individualnoj razini. Psaros i Botros predložili su stvaranje profila stimulacijskih pragova na temelju matematičkog izraza koji postojeće pragove zbirnih akcijskih potencijala slušnog živca stavlja u novi omjer. Njihova istraživanja potvrdila su hipotezu da je dulje vrijeme potrebno za oporavak nakon zbirnih akcijskih potencijala slušnog živca povezano s boljim preživljenjem neurona. U radovima Henkina i van Wermeskerkena izvršena je usporedba pretpostavljenih vrijednosti objektivnih parametara dobivenih na visokotonskom, srednjetonskom i niskotonskom reprezentativnom dijelu pužnice. Zaključuju da izmjerene impedancije ovise dijelom i o tipu elektrode, ali da se mijenjaju i ovisno o vremenu proteklom od zadnje stimulacije.<sup>18</sup>

### Rasprava

Telemetrija je sastavni postupak u tijeku suvremenog liječenja teške naglušnosti i gluhoće. Suvremena terapija teške naglušnosti i gluhoće jest otokirurška

ugradnja uređaja koji se zove umjetna pužnica / kohlearni implant. U tom postupku telemetrija predstavlja objektivnu elektrofiziološku metodu mjerenja akcijskog potencijala slušnog živca, kojom utvrđujemo ispravnost ugradnje umjetne pužnice i njezino funkcioniranje u slušnoj percepciji teško naglušnih i gluhih osoba. Telemetrijom pratimo integritet intrakohlearnih elektroda nakon ugradnje umjetne pužnice ispitivanjem električnih otpora koji ovise o stanju na površini nosača elektroda, kao i morfološkim i elektrochemijskim promjenama koje izaziva električna stimulacija. Omogućuje se i neuralna povratna telemetrija (NRT), koja pokazuje mjerenje ukupnoga akcijskog potencijala slušnog živca, postojanje neuralnog odgovora na električnu stimulaciju, funkcionalnost ugrađene umjetne pužnice i ispravan položaj elektroda. Telemetriju radimo u tijeku operativnog zahvata ugradnje umjetne pužnice, kao i u postoperativnom tijeku. Odgovor se sastoji od negativnog vala, nakon kojeg slijedi jedan ili više pozitivnih. Tijekom operativnog zahvata, podaci koje dobijemo intraoperativnom telemetrijom potvrđuju nam optimalni smještaj aktivnih elektroda ugrađene umjetne pužnice. Iako različite umjetne pužnice imaju različit broj aktivnih elektroda, sve imaju za cilj dobru pokrivenost područja *scale tympani*, čija je duljina oko 30 mm, a promjer oko 9 mm bazalno i 5 mm apikalno.<sup>19</sup> Cilj dobre otokirurške ugradnje umjetne pužnice jest optimalno pokriti cijelu tu površinu. Prag pojavljivanja ukupnoga akcijskog potencijala slušnog živca pojavljuje se unutar područja koje ispitanik čuje i zove se dinamički raspon. Dinamički raspon je razlika između najnižeg intenziteta električnog podražaja koji izaziva osjet zvuka (T-prag) i najvišeg intenziteta koji još ne izaziva neugodu (C-prag). Za mapiranje (postoperativno programiranje) određuje se i električno pobuđeni zbirni akcijski potencijal slušnog živca (ECAP). To je sinkronizirana aktivnost živčanih vlakana kao odgovor na električni podražaj, a jednaka je kod djece i kod odraslih. Nakon što otokirurg ugradi umjetnu pužnicu, dobro educirana osoba za telemetriju odredi najprije akcijske potencijale slušnog živca za svaki stimulirani kanal te vrijednosti praga sluha i najveći intenzitet podražaja koji još ne predstavlja neugodu pri stimulaciji. Prepoznavanje tih pragova pomaže pri postoperativnom programiranju govornog procesora, jer telemetrija koristi intraoperativno dobivene podatke za programiranje govornog procesora umjetne pužnice. To ubrzava inicijalnu prilagodbu govornog procesora, stvaranje simulacijskih mapa i omogućuje brzi početak slušne rehabilitacije. Morfologija, pragovi, amplitude i latencije odgovora odražavaju i funkcionalni status granica spiralnog ganglija i neophodni su za prijenos električnih podražaja središnjim dijelovima slušnog puta.

## Zaključak

Intraoperativna telemetrija uključuje mjerenje impedancija aktivnih elektroda prema referentnim elektrodama u nekoliko modaliteta podraživanja, određivanje praga kohleostapesnog refleksa i mjerenje električkog odgovora slušnog živca. Ugrađena umjetna pužnica koristi se kao izvor podražaja i kao uređaj za mjerenje impedancija i električkog odgovora slušnog živca. Provodi se postavljanjem spojnog kabela i antene na kožni režanj ispod kojeg se nalazi ugrađeni uređaj umjetne pužnice. Koriste se specifični programi telemetrije koji pokazuju da je implantirana umjetna pužnica ispravna i postavljena blizu slušnog živca. Programi također prate specifične parametre kroz vrijeme i procjenjuju subjektivne pragove podražaja, kao i pragove neugode na temelju objektivnih mjerenja. Rezultati telemetrije koriste se za individualno postoperativno programiranje (mapiranje) govornog procesora umjetne pužnice i početak rehabilitacije sluha i slušanja. Time je telemetrija kao postupak u ugradnji umjetne pužnice dobila zasluženu vrijednost u medicinskom rješavanju problema naglušnosti i gluhoće i suvremeno tehnološki omogućila objektivne pokazatelje koji potvrđuju otokirurgu uspješno kirurško zbrinjavanje teško naglušnih i gluhih osoba.

## ZAHVALA

Autori žele zahvaliti Mladenu Domazetoviću iz tvrtke *Media*, zastupniku tvrtke *MED-EL*, i Blaženki Šafran iz tvrtke *Medical Intertrade*, zastupniku tvrtke *Cochlear*, na tehničkoj podršci i ustupljenim slikama.

## LITERATURA

1. Huges ML, Van der Werff KR, Brown CJ, Abbas PJ, Kelsay DM, Teagle HF i sur. A longitudinal study of electrode impedance, the electrically evoked compound action potential, and behavioral measures in nucleus 24 cochlear implant users. *Ear Hear.* 2001;22(6):471–86.
2. Brown CJ, Abbas PJ, Gantz B. Electrically evoked whole-nerve action potentials: Data from human cochlear implant users. *J Acoust Soc Am.* 1990;88(3):1385–91.
3. Patrick JF, Busby PA, Gibson PJ. The development of the Nucleus Freedom cochlear implant system. *Trends Amplif.* 2006;10:175–200.
4. Brill S, Muller J, Hagen R. Site of cochlear stimulation and its effect on electrically evoked compound action potentials using the MED-EL standard electrode array. *Biomed Eng Online.* 2009;8:40.
5. Frijns JH, Briaire JJ, de Laat JA, Grotte JJ. Initial evaluation of the Clarion CII cochlear implant: speech perception and neural response imaging. *Ear Hear.* 2002;23(3):184–97.
6. Botros A, Psarros C. Neural response telemetry reconsidered: I. The relevance of ECAP threshold profiles and scaled profiles to cochlear implant fitting. *Ear Hear.* 2010;31(3):367–79.
7. Doyle JB, Doyle JH, Turnbull FM, Abbey J, House L. Electrical stimulation in eight nerve deafness. A preliminary report. *Bull Los Angel Neuro Soc.* 1963;28:148–50.
8. Eshraghi AA, Gupta C, Ozdamar O, Balkany TJ, Truy E, Nazarian R. Biomedical engineering principles of modern cochlear implants and recent surgical innovations. *Anat Rec (Hoboken).* 2012;295(11):1957–66.
9. Somek B, Fajt S, Dembitz A, Ivković M, Ostojić J. Coding Strategies for Cochlear Implants. *Automatika.* 2006;47:69–74.
10. Cucis PA, Berger-Vachon C, Hermann R, Millioz F, Truy E, Gallego S. Hearing in Noise: The Importance of Coding Strategies – Normal Hearing Subjects and Cochlear Implant Users. *Appl Sci.* 2019;9(4):734–50.
11. Muller V, Klunter HD, Furstenberg D, Walger M, Lang-Roth R. Comparison of the Effects of Two Cochlear Implant Fine Structure Coding Strategies on Speech Perception. *Am J Audiol.* 2020;29(2):226–35.
12. De Jong MAM, Briaire JJ, Frijns JHM. Dynamic Current Focusing: A Novel Approach to Loudness Coding in Cochlear Implants. *Ear Hear.* 2019;40(1):34–44.
13. Wolfe J, Schafer EC. Programming Cochlear Implants. *Plural Publishing Inc.* 2015;2:129–235.
14. Brown CJ, Huges ML, Luk B, Abbas PJ, Wolaver A, Gervais J. The relationship between EAP and EABR thresholds and levels used to program the Nucleus 24 speech processor: data from adults. *Ear Hear.* 2000;21(2):151–163.
15. Dhanasingh A, Jolly C. An overview of cochlear implant electrode array designs. *Hear Res.* 2017;356:93–103.
16. Smoorenburg GF. Thresholds of electrically evoked compound action potentials; relation to T- and C-levels. *Cochlear Implant Ear Marks.* 2006;55–66.
17. Van Dijk B, Botros AM, Battmer RD, Begall K, Dillier N, Hey M i sur. Clinical results of AutoNRT, a completely automatic ECAP recording system for cochlear implants. *Ear Hear.* 2007;28:558–70.
18. McKay CM, Fewster L, Dawson P. A different approach to using a neural response telemetry for automated cochlear implant processor programming. *Ear Hear.* 2005;26:38–44.
19. Biedron S, Prescher A, Ilgner J, Westhofen M. The internal dimensions of the cochlear scalae with special reference to cochlear electrode insertion trauma. *Otol Neurotol.* 2010 Jul;31(5):731–7.