

# Zmiany wielkości SII (Speech Intelligibility Index) spowodowane wiekiem

## The changes of SII (Speech Intelligibility Index) due to age

Roman Gołębiowski, Andrzej Wicher<sup>1</sup>

Katedra Akustyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61 – 614 Poznań

### STRESZCZENIE

W wyniku procesu starzenia, słuch człowieka się pogarsza. Jest to proces naturalny, który u poszczególnych osób przebiega w dość zróżnicowany sposób. Wraz z pojawieniem się niedosłuchu pojawia się również problem z komunikacją, czyli zaburzeniami percepcji mowy. Efekt ten nasila się w sytuacjach, w których oprócz sygnału mowy występuje również sygnał zakłócający (hałas), powodując dodatkowy spadek zrozumiałości mowy.

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń wartości SII (Speech Intelligibility Index), dla osób w różnym wieku (osobno dla kobiet i mężczyzn). Ponadto, pokazano, że wartość współczynnika SII maleje wraz z pojawieniem się sygnału zakłócającego. Stopień redukcji wartości SII zależy od wieku, poziomu sygnału mowy oraz poziomu sygnału zakłócającego.

*Słowa kluczowe: zrozumiałość mowy, próg słyszenia*

### ABSTRACT

As a result of the aging process, human hearing deteriorates. It is a natural process that varies considerably between individuals. Along with the appearance of hearing loss, there is also a problem with communication, i.e. impaired speech perception. This effect is exacerbated in situations where, in addition to the speech signal, there is also an interfering signal (noise), causing an additional decrease in speech intelligibility.

The paper presents the results of SII (Speech Intelligibility Index) calculations for people of different ages (separately for women and men). Moreover, it has been shown that the value of the SII index decreases with the appearance of the disturbing signal. The degree of SII reduction depends on the age, speech signal level and noise level of the interfering signal.

*Key words: Speech Intelligibility Index, hearing threshold*

## 1. Wprowadzenie

Kondycja naszego słuchu zależy od wielu czynników. Do czynników zewnętrznych istotnie oddziałujących na stan słuchu należy przede wszystkim zaliczyć hałas. Długotrwałe przebywanie w hałaśliwym środowisku powoduje pogorszenie słuchu, co skutkuje pojawieniem się ubytków słuchu. Jest to jednak czynnik, którego wpływ na nasz słuch możemy kontrolować, np. unikając miejsc o dużym poziomie hałasu lub stosowania ochronników słuchu, w przypadku, gdy nie mamy innej możliwości.

Tematyka niniejszej pracy nie skupia się jednak na wpływie nadmiernej ekspozycji na hałas na nasz słuch, lecz w głównej mierze na wpływie procesów starzenia na funkcjonowanie układu słuchowego. Procesy starzenia przebiegają u poszczególnych osób w dość zróżnicowany sposób. Niestety tylko w niewielkim zakresie możemy wpływać na tempo tych procesów, np. poprzez zdrowy tryb życia. Niemniej jednak są to procesy nieuchronne i przekładają się także na pogorszenie słuchu, czyli tzw. głuchotę starczą. Dodając do tego jeszcze problem starzejącego się społeczeństwa, ubytki słuchu stały się poważnym problemem społecznym.

Pogorszenie słuchu z reguły najwcześniej zauważane jest przez osoby z najbliższego otoczenia danej osoby, którą dotyczy problem niedosłuchu. Pierwszym objawem jest pojawiający się w niektórych sytuacjach problem z komunikacją, czyli zaburzeniami percepcji mowy. Po zgłoszeniu się do protetyka słuchu lub lekarza otolaryngologa, osobie z niedosłuchem wyznaczany jest m. in. audiogram, czyli określany jest zakres/dynamika słyszenia w funkcji częstotliwości. Wynik tego badania stanowi podstawę danych wejściowych w procesie dopasowania aparatu słuchowego. Po dopasowaniu aparatu słuchowego i jego wstępnej weryfikacji i walidacji, ostateczną walidację wykonuje pacjent i albo staje się użytkownikiem aparatu słuchowego, albo przestaje go w ogóle używać.

Biorąc pod uwagę charakterystykę środowiska akustycznego (z reguły o dość dużym poziomie tła akustycznego), w którym funkcjonujemy oraz posługiwaniu się mową jako najważniejszą formą komunikacji wydaje się, że optymalną formą testowania/walidacji dopasowania aparatów słuchowych powinno być skoncentrowanie się na badaniu zysku z aparatu słuchowego w warunkach percepcji mowy na tle szumu. Niestety walidacja aparatu słuchowego w oparciu o tego typu narzędzia jest niezmiernie rzadko praktykowana.

<sup>1</sup> e-mail: awaku@amu.edu.pl

Testy do badania zrozumiałości mowy na tle zakłóceń można uznać za optymalne narzędzie do kompleksowej oceny wydolności słuchu. W wersji uproszczonej istnieją testy wyrazowe, jedno-, bądź dwusylabowe prezentowane bez sygnałów zakłócających [1, 2]. Testy zdaniowe składają się z krótkich zdań o zróżnicowanej liczbie wyrazów [3, 4] lub w formie testów macierzowych o ustalonej strukturze zdań i takiej samej liczbie wyrazów w zdaniu [5]. Testy zdaniowe prezentowane są na tle specjalnie przygotowanego szumu, tzw. „babble noise”, będącego efektem wielokrotnego sumowania całego materiału testowego. Tego typu masker charakteryzuje się praktycznie taką samą strukturą widmową, jak długoterminowe widmo mowy dla pojedynczej listy zdaniowej (10, lub 13-zdaniowej).

Najprostszą formą ilościowej oceny zrozumiałości mowy jest procentowe określenie liczby poprawnie zrozumianych wyrazów/zdań. Dla testów prezentowanych bez szumu maskującego progami rozumienia mowy (ang. Speech Reception Threshold - *SRT*) jest taka wartość poziomu ciśnienia akustycznego dla której mowa jest rozumiana w 50%. W przypadku testów na tle szumu wartość *SRT* dotyczy takiego stosunku sygnału do szumu (ang. Signal to Noise Ratio - *SNR*) dla którego zrozumiałość mowy wynosi 50 %.

Korelacja pomiędzy wartościami progów słyszenia, a zrozumiałością mowy jest stosunkowo dobra, gdy w badaniach stosowane są proste testy wyrazowe bez sygnału maskującego. W sytuacji, gdy stosowane są testy zdaniowe na tle maskera, obserwuje się niekiedy dość istotne rozbieżności pomiędzy np. średnim progami słyszenia, a progami rozumienia mowy. Rozbieżności te pogłębiają się szczególnie wtedy, gdy u danego pacjenta pogorszeniu ulegają w ogólności funkcje poznawcze, mające swoje źródło w pogorszeniu funkcjonowania całego systemu nerwowego. Szczególnie ważnym jest stosowanie aparatów słuchowych u osób starszych, nie tylko ze względów poprawy rozumienia mowy, ale też na spowolnienie procesów starczej demencji [6].

W praktyce protetycznej niezmiernie istotnym byłoby posługiwanie się narzędziem obliczeniowym które umożliwiłoby już na etapie wyznaczenia audiogramu wstępnego określenia zrozumiałości mowy. Do tego celu można zastosować wytyczne zawarte w normie ANSI S3.5-1997 (R 2020) [7], które na podstawie trójowego widma mowy, szumu zakłócającego i progów słyszenia pozwalają obliczyć Indeks Zrozumiałości Mowy, *SII* (ang. Speech Intelligibility Index). Wartość wskaźnika *SII* zawiera się w przedziale od 0 do 1. Wg danych zmieszczonych w pracy [8], jeśli wskaźnik *SII* = 0.72 wówczas zrozumiałość mowy jest na poziomie około 97%, gdy *SII* = 0.57 to zrozumiałość mowy również jest wysoka (około 90%), zaś gdy *SII* = 0.25, to zrozumiałość mowy wynosi około 50%. W pracach [9, 10] zamieszczono zależności, które pozwalają na przeliczenie wartości *SII* na procent zrozumiałości mowy. Należy zaznaczyć, że opisana w normie ANSI S3.5-1997 (R 2020) metoda nie uwzględnia zmian w czasie zarówno sygnału mowy, jak i maskera, gdyż bazuje jedynie na strukturach widmowych sygnałów.

W normie PN-EN ISO 7029:2017-04 [11] podane są zależności pomiędzy danymi grupami wiekowymi a odpowiadającymi im średnimi audiogramami, sklasyfikowanymi wg skali procentowej. Dane te pozwalają na określenie zależności

pomiędzy wiekiem osób, a zmianą Indeksu Zrozumiałości Mowy, co stanowi główny cel pracy.

## 2. Progi słyszenia związane z wiekiem

W pracy [12] przedstawiono progi słyszenia dla kobiet i mężczyzn w różnym wieku, przy czym zmiana tych progów była spowodowana wyłącznie efektem starzenia się układu słuchowego. W pracy tej zwrócono uwagę, że słuch w funkcji wieku zależy od stopnia, w jakim mogą mieć wpływ takie czynniki jak: choroby, przyjmowane leki ototoksyczne, nieznaną zawodową i pozazawodową ekspozycją na hałas. Poziomy słyszenia wyznaczono zgodnie z normą ISO 7029, dla populacji osób otologicznie zdrowych, tj. osób o normalnym stanie zdrowia, nie wykazujących żadnych oznak lub przejawów chorób uszu lub zalegania woskowiny w zewnętrznych przewodach słuchowych i takich, które nie podlegały wcześniej nadmiernej ekspozycji na hałas. Jak widać z przedstawionych na wykresach wyników wraz z wiekiem słuch człowieka pogarsza się. Im wyższa częstotliwość tym poziom słyszenia jest coraz bardziej obniżony. Warto również podkreślić, że istnieją znaczące różnice pomiędzy progami słyszenia kobiet i mężczyzn będących w tym samym wieku. Mężczyźni w wieku 70 lat mają o ok. kilkanaście decybeli wyższe progi słyszenia niż kobiety.

## 3. Wielkość *SII*, a zrozumiałość mowy

Wielkość *SII* (ang. Speech Intelligibility Index) jest fizyczną wielkością, która bardzo dobrze koreluje ze stopniem zrozumiałości mowy. Sposób obliczania tej wielkości został szczegółowo przedstawiony w normie ANSI S3.5-1997 [7]. Norma pozwala na wyznaczenie wielkości *SII* dla mowy normalnej, głośnej, bardzo głośnej, w dowolnej odległości od mówcy.

Wielkość zrozumiałości mowy, *SII*, został opracowany w celu prognozowania zrozumiałości mowy poprzez ważenie najbardziej istotnych dla sygnału pasm częstotliwości. Aby obliczyć wartość współczynnika *SII*, widmo sygnału mowy zostało podzielone na pasma trójowe w zakresie częstotliwości od 100 Hz do 10 000 Hz. Następnie należy obliczyć iloczyn tzw. funkcji słyszalności,  $A_i$ , i funkcji wagi,  $I_i$ , dla poszczególnych pasm częstotliwości,  $i$ , a następnie należy je zsumować, zgodnie z równaniem 1:

$$SII = \sum_{i=1}^n I_i A_i, \quad (1)$$

gdzie  $n$  jest liczbą pasm częstotliwości.

Wartość *SII* waha się od 0 (tj. brak słyszalności widma mowy) do 1 (tj. pełna słyszalność widma mowy).

Funkcja słyszalności,  $A_i$ , reprezentuje proporcję sygnału mowy słyszalnego w każdym paśmie częstotliwości. W pełni słyszalny sygnał w paśmie częstotliwości ma wartość 1. Wartość funkcji słyszalności zmniejsza się wraz z tłumieniem sygnału, obecnością szumu maskującego lub niedosłuchu. Niedosłuch wpływa na wartość *SII* na dwa sposoby. Po pierwsze, niedosłuch osłabia sygnał, czyniąc go mniej słyszalnym, a po drugie, *SII* zawiera pewien czynnik zniekształceń, gdy niedosłuch jest głęboki, aby odzwierciedlić zmniejszoną wyrazistość sygnału mowy. Wartość

funkcji słyszalności rośnie wraz ze wzmocnieniem sygnału (np. poprzez zwiększenie natężenia głosu lub poprzez wzmocnienie w aparatach słuchowych), ale nigdy nie przekroczy 1 w żadnym częstotliwości.

Funkcja wagi,  $I_i$ , określa udział każdego pasma częstotliwości w zrozumiałości mowy. Każdemu pasmu częstotliwości przypisana jest wartość mniejsza niż 1, a suma wartości wszystkich pasm częstotliwości jest równa 1. Funkcje wagi dla poszczególnych częstotliwości różnią się w od wielu zmiennych: m.in. od widma sygnału mowy. Funkcja wagi przyjmuje wartość maksymalną dla ok. 2000 Hz, co oznacza, że względna gęstość spektralna sygnału mowy jest największa dla pasma o tej częstotliwości środkowej.

Istnieje wiele zastosowań wyznaczania wielkości *SII*. Przede wszystkim *SII* pozwala przewidzieć percepcję mowy. Ponadto, wielkość *SII* może służyć do określania optymalnego wzmocnienia aparatu słuchowego w celu maksymalizacji zrozumiałości mowy dla osób z niedosłuchem. Jedną z metod dopasowania aparatów słuchowych, która wykorzystuje wielkość *SII* w swojej procedurze jest metoda NAL NL2 [13, 14] (również wcześniejsza wersja – NAL NL1 [15, 16, 17]).

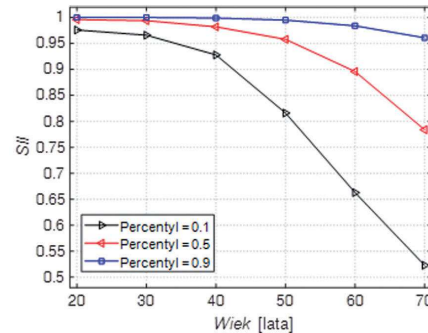
W aparatach słuchowych wzmocnienie sygnału akustycznego można ustawić tak, aby widmo sygnału mowy było całkowicie powyżej progów słyszenia użytkownika aparatu słuchowego. Często jest jednak tak, że obniża się to widmo poniżej progów słyszenia (wartość współczynnik *SII* jest mniejsza od 1). U wielu osób z niedosłuchem odbiorczym występuje dodatkowo objaw wyrównania głośności, który polega na tym, że nawet przy małym wzroście poziomu sygnału akustycznego występuje gwałtowny wzrost percypowanej głośności. Przy tego rodzaju niedosłuchach zakres dynamiczny (obszar pomiędzy progiem słyszenia, a progiem dyskomfortu) jest bardzo mały. W takim przypadku wzmocniony sygnał mowy powyżej progu słyszenia będzie przewyższał próg dyskomfortu. Jedynym sposobem jest wówczas zastosowanie układów kompresji. Niestety wysokie współczynniki kompresji mogą negatywnie wpływać na jakość sygnału mowy i z tego powodu czasami należy zrezygnować ze słyszalności w celu zapewnienia użytkownikowi komfortu słyszenia [18]. Wzmocnienie w aparatach słuchowych jest określane w taki sposób, aby zapewnić równowagę pomiędzy słyszalnością (zrozumiałością), a komfortem słyszenia (co oznacza, że wartość *SII* jest mniejsza od 1).

#### 4. Zmiana zrozumiałości mowy spowodowane wiekiem

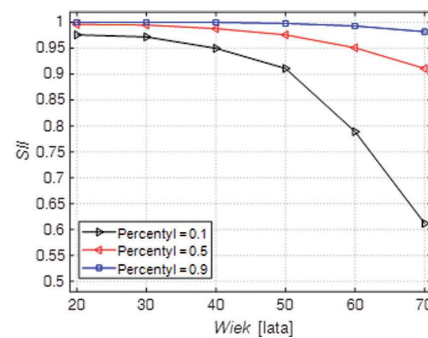
Korzystając z wyznaczonych wartości progów słyszenia dla osób w różnym wieku (osobno dla kobiet i mężczyzn), które zostały zamieszczone w pracy [12], obliczono wartości współczynnik *SII*. W obliczeniach wykorzystano arkusz obliczeniowy dostępny na stronie: <https://sii.to/index.html>.

Podobnie jak w pracy [12] obliczenia *SII* przeprowadzono dla różnych wartości stopnia centyla<sup>1</sup>. Otrzymane wyniki przedstawiono poniżej na wykresach (Rys. 1 - 5).

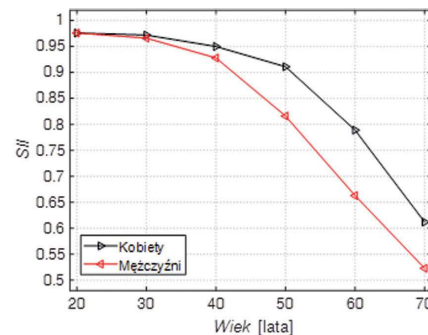
<sup>1</sup> Wyjaśnienie pojęcia centyla znajduje się w pracy [12]



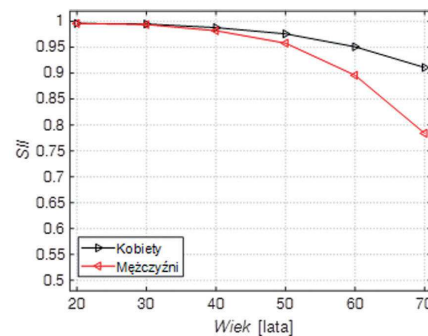
Rys. 1. Wartość współczynnik *SII* dla mężczyzn w różnym wieku, dla różnych wartości centyla



Rys. 2. Wartość współczynnik *SII* dla kobiet w różnym wieku, dla różnych wartości centyla



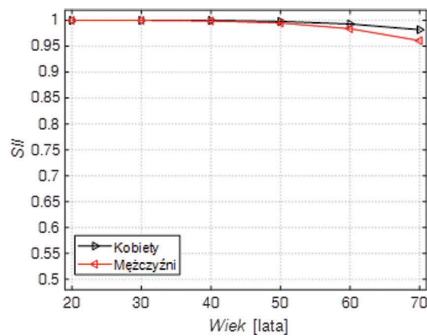
Rys. 3. Porównanie wartości współczynnik *SII* dla kobiet i mężczyzn w różnym wieku, centyl 0.1



Rys. 4. Porównanie wartości współczynnik *SII* dla kobiet i mężczyzn w różnym wieku, centyl 0.5



## Zmiany wielkości *SII* (Speech Intelligibility Index) spowodowane wiekiem



Rys. 5. Porównanie wartości współczynnika *SII* dla kobiet i mężczyzn w różnym wieku, percentyl 0.9

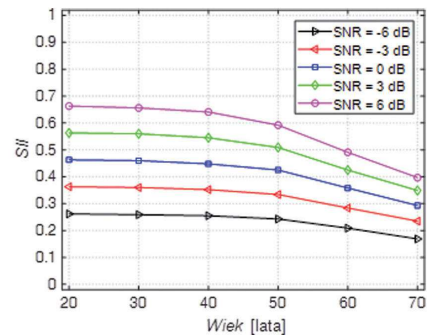
Jak widać z przedstawionych zależności, wartość współczynnika *SII* spada wraz z wiekiem, co jest spowodowane niedosłuchem powstałym w wyniku starzenia się układu słuchowego. Dla mężczyzn w wieku 70 lat, w grupie z percentyla 0.1, wartość współczynnika *SII* wynosi ok. 0.5 (Rys. 1). Dla kobiet w tym samym wieku oraz grupy z percentyla 0.1, wartość *SII* jest wyższa i wynosi ok. 0.6 (Rys. 2, Rys. 3). Różnice te wynikają z faktu, że proces powstawania niedosłuchu szybciej przebiega u mężczyzn niż u kobiet. Dla osób młodych nie ma żadnych różnic pomiędzy wynikami dla kobiet i mężczyzn – obie grupy charakteryzują się podobnym słuchem (progi słyszenia są takie same) i w konsekwencji taką samą zrozumiałością mowy (takie same wartości współczynnika *SII*). Wraz z wiekiem pojawiają się różnice w przebiegu progów słyszenia oraz w wartościach zrozumiałości mowy.

### 5. Zmiana zrozumiałości mowy spowodowane wiekiem oraz obecnością hałasu

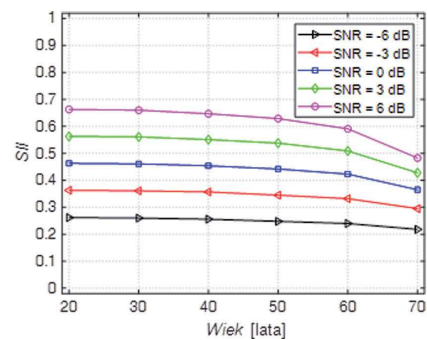
W poprzednim rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika *SII* dla osób w różnym wieku (osobno dla kobiet i mężczyzn). W obliczeniach przyjęto brak sygnałów zakłócających (brak hałasu). W niniejszym rozdziale zostaną zaprezentowane wyniki obliczeń *SII* przy założeniu, że występuje sygnał zakłócający (masker), który modyfikuje (zmniejsza) wartość współczynnika *SII*. Sygnałem zakłócającym był babble noise, którego widmo jest takie samo jak długoterminowe widmo sygnału mowy.

Obliczenia wykonano dla różnych wartości *SNR* (ang. Signal to noise ratio). Wielkość *SNR* określa zależność pomiędzy sygnałem mowy a sygnałem zakłócającym. Jeśli *SNR* wynosi 0dB, to oznacza, że poziom ciśnienia akustycznego sygnału mowy i hałasu jest taki sam. Jeśli *SNR* > 0dB – to oznacza, że poziom ciśnienia akustycznego dla sygnału mowy jest większy od poziomu sygnału zakłócającego.

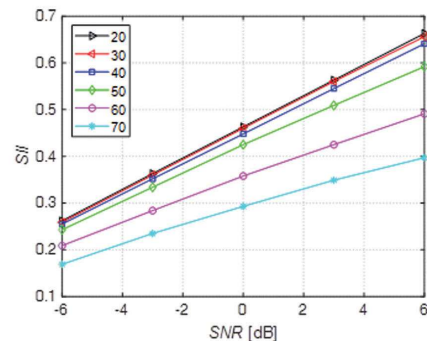
Wyniki obliczeń przedstawiono na poniższych rysunkach.



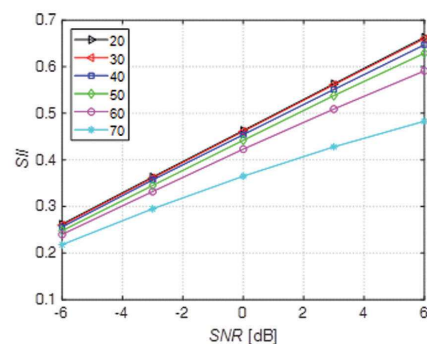
Rys. 6. Wartości współczynnika *SII* dla mężczyzn w zależności od wieku oraz dla różnych wartości *SNR*, percentyl 0.1



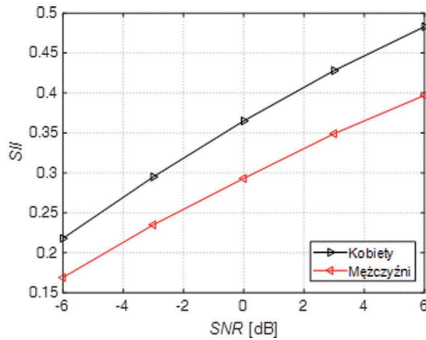
Rys. 7. Wartości współczynnika *SII* dla kobiet w zależności od wieku oraz dla różnych wartości *SNR*, percentyl 0.1



Rys. 8. Wartości współczynnika *SII* dla mężczyzn w zależności od wartości *SNR* oraz dla poszczególnych grup wiekowych, percentyl 0.1



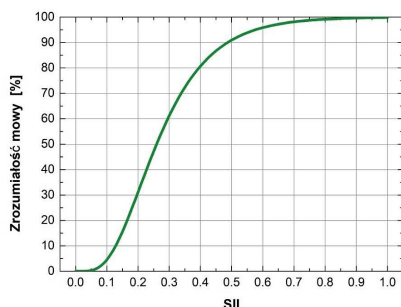
Rys. 9. Wartości współczynnika *SII* dla kobiet w zależności od wartości *SNR* oraz dla poszczególnych grup wiekowych, percentyl 0.1



Rys. 10. Porównanie wartości współczynnika *SII* dla kobiet i mężczyzn w wieku 70 lat w zależności od wartości SNR, percentyl 0.1

Jak wynika z przedstawionych na rysunkach 6 -10 wyników obliczeń, obecność hałasu znacząco wpływa na obniżenie wartości współczynnika zrozumiałości mowy. Im poziom hałasu jest większy (wartość *SNR* ujemna) wówczas wartość *SII* znacząco spada. Polepszenie stosunku sygnału do szumu, *SNR*, pozwala znacząco polepszyć wartość zrozumiałości mowy. Zmiana *SNR* z -6 dB na +6 dB, powoduje zmianę wartości *SII* o 0.25.

Najprostszą formą interpretacji wpływu różnych czynników (poziomu ciśnienia akustycznego, wieku, *SNR*, itd.) na zrozumiałość mowy jest posługiwanie się stopniem zrozumiałości mowy wyrażonym w procentach (skład od 0 do 100 %). Jak wspomniano we wprowadzeniu Lee i Mendel, 2017 oraz Lee i in., 2019 przedstawili formułę pozwalającą wyznaczyć zależność pomiędzy wskaźnikiem *SII* a procentem zrozumiałości mowy. Zależność tę przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Zależność zrozumiałości mowy wyrażonej w procentach od wskaźnika zrozumiałości mowy (*SII*)

Z Rys. 11 wynika, że próg rozumienia mowy (*SRT*) odpowiada *SII* = 0.26. Oznacza to, że w sytuacjach, gdy mowa prezentowana jest w ciszy i dla nastarszych grup wiekowych *SII* osiąga wartości około 0.5 wówczas wiąże się to ze spadkiem zrozumiałości mowy o około 10% (ze 100% do 90%). Natomiast, gdy mowa prezentowana jest na tle dźwięku maskującego (rozdział 5) wówczas w zależności od *SNR* i grupy wiekowej obserwuje się zmniejszenie progu rozumienia mowy nawet do 20% (*SII* = 0.17). W przypadku testów zdaniowych, dla grupy wiekowej do 30 lat, osób ze słuchem prawidłowym *SRT* = -6dB, co bardzo dobrze koreluje z danymi zamieszczonymi np. na Rys. 6, gdzie dla grup wiekowych 20 i 30 lat wartość *SII* wynosi około 0.26, co odpowiada zrozumiałości mowy wynoszącej 50%.

## 6. Podsumowanie

Wyznaczone w ramach pracy wartości wskaźnika zrozumiałości mowy *SII* w zależności od grupy wiekowej (co pośrednio wiąże się ze średnim progiem słyszenia) dla przypadków, gdy mowa prezentowana jest bez dodatkowych zakłóceń wykazują zmienność w zakresie od około 0.5 do 1. Odpowiada to zmianie zrozumiałości mowy od 90% do 100%, co nie stanowi o istotnym pogorszeniu zrozumiałości mowy. Natomiast w przypadkach, gdy mowa prezentowana jest na tle zakłóceń wartości *SII* dobrze korespondują ze zmianą zrozumiałości mowy wyrażoną w procentach. Oznacza, to, że metoda prognozowania zrozumiałości mowy bazująca na normie ANSI S3.5-1997 sprawdza się w przypadku sygnałów mowy prezentowanych na tle szumu, zaś niedoszacowuje wartości zrozumiałości mowy, gdy mowa występuje bez sygnałów maskujących. Być może czynnikiem decydującym o ww. rozbieżnościach jest brak uwzględnienia w normie ANSI S3.5-1997 czasowych zmian sygnału (modulacja amplitudowa, częstotliwościowa, itd.).

## Bibliografia

1. Pruszewicz, A., Demenko, G., Richter, L., Wika, T. (1994b). [New articulation lists for speech audiometry. Part II], *Otolaryngol Pol* 48, 56-62.
2. Pruszewicz, A., Demenko, G., Richter, L., Wika, T. (1994b). [New articulation lists for speech audiometry. Part II], *Otolaryngol Pol* 48, 56-62..
3. Ozimek, E., Kutzner, D., Sek, A., Wicher, A. (2009a). Polish sentence tests for measuring the intelligibility of speech in interfering noise, *Int J Audiol* 48, 433-443, <https://doi.org/10.1080/14992020902725521>.
4. Wicher, A., Ozimek, E., Szymiec, E. (2010). Speech Intelligibility Measurements in Tinnitus Patients with and without Hearing Loss, *Acta Physica Polonica A* 118, 179-182
5. Ozimek, E., Kutzner, D., Sęk, A., Wicher, A. (2009b). Development and evaluation of Polish digit triplet test for auditory screening, *Speech Communication* 51, 307-316..
6. Uchida, Y., Sugiura, S., Nishita, Y., Saji, N., Sone, M., Ueda, H. (2019). Age-related hearing loss and cognitive decline - The potential mechanisms linking the two, *Auris Nasus Larynx* 46, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.anl.2018.08.010>.
7. ANSI S3.5-1997 (R 2020). Methods for calculation of the Speech Intelligibility Index, American National Standard.
8. Letowski, T., Scharine, A. (2017). Correlational Analysis of Speech Intelligibility Tests and Metrics for Speech Transmission, *US Army Research Laboratory*, 1-52..
9. Lee, S., Mendel, L. L. (2017). Derivation of frequency importance functions for the AzBio sentences, *The Journal of the Acoustical Society of America* 142, 3416, <https://doi.org/10.1121/1.5014056>.
10. Lee, S., Mendel, L., Bidelman, G. (2019). Predicting Speech Recognition Using the Speech Intelligibility Index and Other Variables for Cochlear Implant Users, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 62, 517-1531.