

## ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY KSZTAŁTEM, A AKUSTYKĄ W PROSTOPADŁOŚCIENNYCH („PUDEŁKOWYCH”) SALACH KONCERTOWYCH

Andrzej K. KŁOSAK\*

\* Politechnika Krakowska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: andrzej.klosak@pk.edu.pl

**Summary:** Praca opisuje wyniki komputerowych analiz akustycznych przeprowadzonych w 24 modelach sal koncertowych typu „pudełkowego”. Przedstawione wyniki dotyczą trzech z opisanych w normie PN-EN ISO 3382 parametrów: Przejrzystości Brzmienia ( $C_{80}$ ), Siły Dźwięku (G) oraz Miary Wczesnej Energii Bocznej ( $LF_{80}$ ). Wyniki przeprowadzonych symulacji zostały ponadto porównane do opisanych w literaturze liniowych modeli regresyjnych, stworzonych na podstawie pomiarów w istniejących salach.

**Keywords:** Słowa kluczowe: akustyka architektoniczna, komfort akustyczny, przestrzenność dźwięku, sale koncertowe, symulacje akustyczne

### 1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie symulacji komputerowych do badań akustyki sal koncertowych jest metodą znaną od lat [1, 2, 3]. Metoda ta może być przydatna zwłaszcza przy przewidywaniu wpływu zmian w geometrii pomieszczenia na jego akustykę. Znajduje ona również zastosowanie w przypadku równoczesnych analiz dużej liczby punktów pomiarowych lub źródeł dźwięku. Współczesne narzędzia do symulacji, takie jak Odeon [4] czy CATT Acoustic [5] oferują dużą dokładność w przewidywaniu rozkładu pola akustycznego we wnętrzu i pozwalają – do pewnego stopnia – zastąpić pomiary w rzeczywistych salach [6]. Związane jest to jednak z pewnym ryzykiem – wyniki symulacji będą zbliżone do wyników pomiarów jedynie w przypadku, kiedy geometria pomieszczenia, właściwości dźwiękochłonne i dźwiękorozpraszające poszczególnych elementów jego wnętrza oraz inne czynniki uwzględnione w symulacjach odpowiadają tym z rzeczywistej sali. Ryzyko to jest nawet większe, gdyż na dzień dzisiejszy żaden z wymienionych powyżej programów nie uwzględnia takich zjawisk falowych jak interferencja czy dyfrakcja.

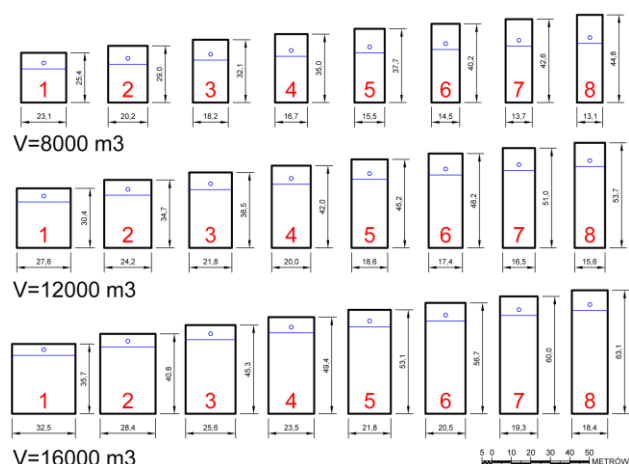
Dlatego też słusznym wydaje się porównywanie wyników symulacji z pomiarami w rzeczywistych salach, kiedy jest to tylko możliwe.

W latach '80 ubiegłego wieku kilku badaczy [7, 8, 9] rozpoczęło systematyczne pomiary akustyczne w salach koncertowych, mierząc szereg parametrów podanych w normie ISO 3382. Rezultaty tych badań wraz ze zgromadzonymi danymi o geometrii poszczególnych sal zostały wykorzystane do stworzenia prostych, empirycznych zależności pomiędzy geometrią, a akustyką [10, 11, 12]. Zależności te zostały przedstawione pod postacią liniowych modeli regresyjnych, z których można wyznaczyć skalę wpływu zmian pewnych elementów projektu sali na jej akustykę.

Niniejsza praca przedstawia wyniki komputerowych symulacji akustycznych przeprowadzonych w 24 modelach prostopadłościennych („pudełkowych”) sal koncertowych [13]. W omawianych symulacjach utrzymywano stałą powierzchnię widowni i sceny, natomiast stopniowo zmieniano proporcje rzutu sali, od zbliżonego do kwadratu aż do wydłużonego prostokąta. Symulacje powtórzono dla trzech różnych objętości pomieszczeń, tak aby ich wyniki można było zastosować do szerszego zakresu sal. W niniejszej pracy porównano również uśrednione w obrębie widowni wyniki symulacji poszczególnych parametrów z obliczonymi dla tego samego pomieszczenia według liniowych modeli regresyjnych omówionych powyżej. W pracy opisano trzy z parametrów wymienionych w normie ISO 3382 [23]: Przejrzystość Dźwięku ( $C_{80}$  ang.: *Clarity*), Siłę Dźwięku (G, ang.: *Strength*) oraz Miarę Wczesnej Energii Bocznej ( $LF_{80}$ , ang.: *Early Lateral Energy Fraction*).

### 2. METODA

Proste modele sal koncertowych, bazujące na prostokątnym rzucie zostały zamodelowane w programie ODEON wersja 8. W modelach zmieniano jedynie dwa parametry geometryczne: kubaturę ( $V$ ) i proporcję długości do szerokości ( $L/W$ ). Przeanalizowano modele w trzech kubaturach:  $8\ 000\ m^3$ ,  $12\ 000\ m^3$  oraz  $16\ 000\ m^3$ , oraz ośmiu proporcjach długości do szerokości ( $L/W=1.10$  do  $3.43$ ). Rzuty wszystkich 24 analizowanych modeli pokazano na rysunku (Rys.1)



Rys. 1. Rzuty analizowanych przykładów  
Fig. 1. Room plans of all analyzed models.

Wszystkie symulacje przeprowadzono przy następujących założeniach:

- w obrębie jednej kubatury wszystkie modele miały identyczną całkowitą powierzchnię rzutu;
- powierzchnię sceny przyjęto jako  $190\ m^2$  we wszystkich modelach;
- powierzchnia widowni była równa powierzchni całkowitej pomniejszonej o powierzchnię sceny;
- widownia była płaska;
- scena miała wysokość 1.0 metra.

We wszystkich modelach przyjęto realne współczynniki pochłaniania i rozproszenia dźwięku. Widownię zasymulowano jako słuchaczy siedzących na mocno wyścielanych fotelach, a scenę jako pełną muzyków z instrumentami. Dla ścian i sufitu przyjęto uśrednione współczynniki pochłaniania 15 sal koncertowych bez widowni i orkiestry. Innych materiałów nie stosowano.

Rozproszenie dźwięku widowni i sceny przyjęto na poziomie 0,65 równo w pasmach częstotliwości 125-4000Hz. Dla ścian i sufitu przyjęto rozproszenie zmienne w funkcji częstotliwości równe 0,35 przy 707 Hz [4]. Tak wysoka wartość została wybrana z uwagi na wyniki zawarte w [14] sugerujące pozytywną korelację pomiędzy preferencjami słuchaczy a wysokim stopniem rozproszenia przegród ograniczających pomieszczenie.

Wysokość modeli była jednakowa i wynosiła 14 metrów, co pozwoliło uzyskać we wszystkich modelach czas pogłosu zbliżony do 2,0 sekund.

W każdym z modeli umieszczono od 300 do 850 punktów pomiarowych. Szczegółowy opis zastosowanej metody symulacji podano w [15].

Dla wszystkich punktów pomiarowych, we wszystkich 24 analizowanych modelach wyznaczono wartość ośmiu parametrów akustycznych, z czego w niniejszej pracy opisano jedynie trzy spośród nich: przejrzystość brzmienia ( $C_{80}$ ), siłę dźwięku ( $G$ ) oraz miarę wczesnej energii bocznej ( $LF_{80}$ ).

Na podstawie analizy wyników pomiarów wykonanych w 53 salach koncertowych wyznaczone zostały [10, 11, 12] proste relacje pomiędzy kształtem sal, a obiektywnymi parametrami akustycznymi, które przedstawiono pod postacią linearnych modeli regresyjnych. Trzy z nich wykorzystane w niniejszej pracy do porównania z wynikami symulacji pokazano w Tabelcy 1.

Podczas wyznaczania wartości z użyciem modeli regresyjnych podanych w Tabelcy 1, w niniejszej pracy przyjęto, że dla obliczenia oczekiwanych wartości  $C_{exp}$  oraz  $G_{rev}$  w miejsce czasu pogłosu zostanie przyjęty czas pogłosu z symulacji uśredniony w obrębie widowni. Dla wyznaczenia  $G_{rev}$  przyjęto uśrednioną w obszarze widowni odległość pomiędzy źródłem, a odbiorcą (SR).

Przy porównywaniu wartości wyznaczonych na podstawie modeli regresyjnych do wyników symulacji, należy zwrócić uwagę na fakt opracowania modeli regresyjnych bazując na pomiarach w pustych salach, bez widzów, podczas gdy wszystkie symulacje były wykonywane przy pełnej widowni. Ma to szczególne znaczenie w przypadku parametrów takich, jak przejrzystość brzmienia ( $C_{80}$ ) oraz siła dźwięku ( $G$ ).

Room acoustical parameter	Regression model: F (theory, geometry)	Correlation coefficient	% of variance	STD residuals
Clarity $C_{80}$ [dB]	$-1.7 + 1.1C_{exp} + 0,065 W$	0.84	70%	0.9 dB
Strength $G$ [dB]	$-0.56 + 0.84 G_{rev}$	0.91	83%	1.0 dB
Early Lateral Energy Fraction $LF_{80}$	$0.39 - 0.0061 W$	0.70	49%	0.05

Tabelca. 1. Liniowe modele regresyjne wykorzystane w pracy do porównania z nimi wyników symulacji, gdzie  $W$  – szerokość sali;  $C_{exp}$  – oczekiwana uśredniona w sali wartość przejrzystości brzmienia zgodnie z teorią pola rozproszonego Sabine’a;  $G_{rev}$  – oczekiwana uśredniona w sali wartość siły dźwięku zgodnie ze zrewidowaną teorią Barrona.

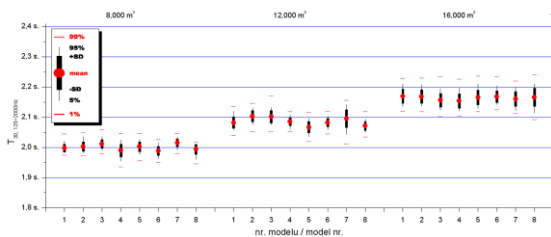
Table. 1. Linear regression models used in this paper for comparison with simulation, where:  $W$  – hall width;  $C_{exp}$  = expected seat average Clarity based on Sabine diffuse theory;  $G_{rev}$  – expected seat average values of Strength based on Barron revised theory.

### 3. WYNIKI

W celu uproszczenia prezentacji wyników symulacji, zostały one uśrednione w odpowiednich zakresach częstotliwości zgodnie z zaleceniami podanymi w [16]. Wyniki przejrzystości brzmienia ( $C_{80}$ ) i siły dźwięku (G) zostały uśrednione w zakresie 500-2000Hz. Wyniki miary wczesnej energii bocznej ( $LF_{80}$ ) zostały uśrednione w zakresie 125-1000Hz. Dla wszystkich parametrów uwzględniono jedynie punkty pomiarowe zlokalizowane dalej, niż 10m od źródła dźwięku..

#### 3.1. Czas pogłosu $T_{30}$

Analizy symulacji czasu pogłosu (Rys.2) nie są tematem niniejszej pracy. Zostały one przedstawione poniżej jedynie w celu pokazania, że w obrębie jednej symulowanej kubatury czas pogłosu poszczególnych kształtów sal był praktycznie identyczny, oraz wzrastał nieznacznie wraz ze wzrostem kubatury. Czas pogłosu ( $T_{30}$ ) uśredniony zgodnie z [16] w zakresie 125~2000Hz był zbliżony do 2,0 sekundy dla  $V=8\ 000\ m^3$  i wzrastał nieznacznie aż do 2,17 sekundy dla  $V=16\ 000\ m^3$ .



Rys.2 Uśredniony w obszarze widowni czas pogłosu  $T_{30}$ , 125-2000Hz, wyznaczony w programie Odeon dla wszystkich analizowanych kubatur i kształtów.

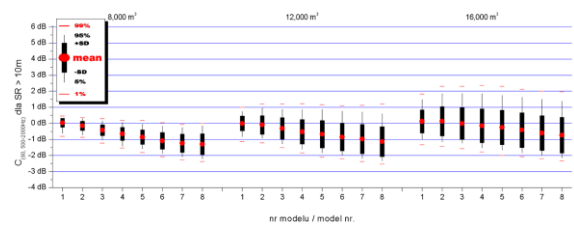
Fig.2 Room-averaged Reverberation Time  $T_{30}$ , 125-2000Hz calculated by Odeon (grid response) in all volumes and models.

#### 3.2. Przejrzystość brzmienia $C_{80}$

Wyniki symulacji wskazują (Rys.3), że uśredniona w Sali przejrzystość brzmienia  $C_{80}$  kształtuje się pomiędzy 0 a -1 dB. W modelach o rzucie zbliżonym do kwadratu (model 1)  $C_{80}$  jest bliska 0dB, i zmniejsza się do ok. -1dB wraz z wydłużeniem proporcji pomieszczenia. W salach zbliżonych do kwadratu, zwłaszcza w najmniejszej z analizowanych kubatur ( $8\ 000\ m^3$ ), odchylenie wartości  $C_{80}$  w obrębie widowni od średniej jest niewielkie, przy odchyleniu standardowym (SD) równym 0,3 dB. W pozostałych modelach równomierność rozkładu przejrzystości brzmienia zmniejsza się wraz ze wzrostem kubatury i wydłużaniem proporcji Sali. Największe odchylenie standardowe występuję w modelu 8 o kubaturze  $16\ 000\ m^3$  i wynosi 1,1dB. Dla porównania, odchylenie standardowe przejrzystości brzmienia  $C_{80}$  dla trzech naj-

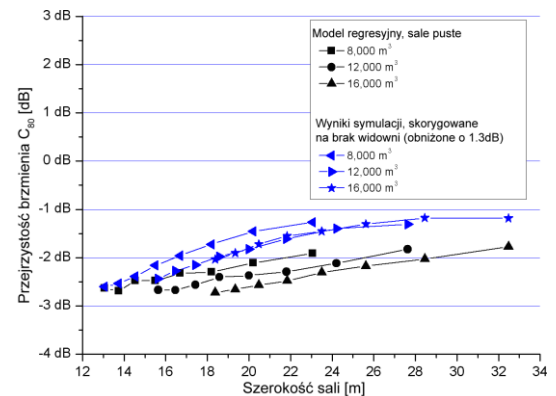
lepszych sal „pudełkowych” podane w [17] na podstawie pomiarów wynosi 1,5 dB. Różnica ta wynika z faktu, że programy takie jak Odeon nie odzwierciedlają zjawisk falowych, zatem należy się spodziewać niższych wartości odchyleń standardowych, niż w rzeczywistości [18].

Porównanie wyników symulacji  $C_{80}$  oraz wartości wyznaczonych z modelu regresyjnego z Tablicy 1 pokazano na rysunku (Rys.4). Jako, że modele regresyjne bazują na pomiarach wykonanych w pustych salach, a symulacje przeprowadzono przy pełnej widowni, wyniki symulacji zostały skorygowane o wpływ wypełnienia widowni. W tym celu dla wybranych modeli wykonano powtórne symulacje dla pustych sal, zmieniając parametry pochłaniania widowni na „puste, mocno wyściełane fotele”, a sceny na „parkiet na legarach”. Wartość przejrzystości brzmienia wyznaczona dla pustych sal była ok. 1,3 dB niższa, niż dla sal z pełną widownią i orkiestrą na scenie, zatem wyniki symulacji pokazane na rysunku (Rys.4) zostały obniżone o 1,3 dB, aby umożliwić bezpośrednie porównanie z wynikami z modeli regresyjnych.



Rys.3 Uśredniony w obszarze widowni wskaźnik przejrzystości  $C_{80}$ , 500-2000Hz, wyznaczony w programie Odeon dla wszystkich analizowanych kubatur i kształtów.

Fig.3 Room-averaged Clarity  $C_{80}$ , 500-2000Hz calculated by Odeon (grid response) in all volumes and models.



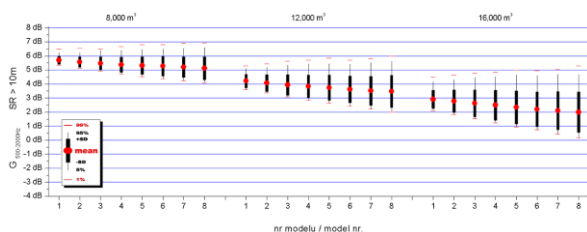
Rys.4 Zależność pomiędzy przejrzystością brzmienia  $C_{80}$  a szerokością Sali wyznaczona wg modelu regresyjnego dla przejrzystości brzmienia z Tablicy 1 (sale puste) i w symulacjach w programie Odeon (sale pełne skorygowane na brak widowni).

Fig.4 Relation between Clarity and room width shown for Odeon simulation (corrected for lack of audience) and for Clarity regression model from Table.1 (empty rooms).

Widać, że wyniki wyznaczone w symulacjach i obliczone z użyciem modelu regresyjnego cechuje dobra zgodność. Przejrzystość brzmienia rośnie wraz ze wzrostem szerokości sali zarówno w symulacjach, jak i modelu regresyjnym. Wyniki symulacji pokazują, że dla pomieszczeń szerszych niż 26 metrów ten wzrost staje się minimalny. Ponadto różnica w wartościach  $C_{80}$  pomiędzy kubaturą 12 000 m<sup>3</sup> a 16 000 m<sup>3</sup> jest praktycznie niewidoczna w symulacjach, podczas gdy występuje ona na wynikach z modelu regresyjnego.

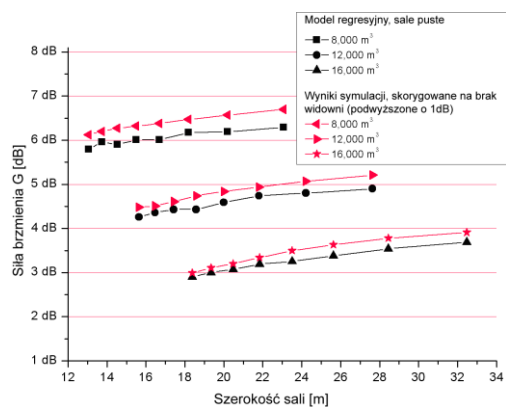
### 3.3. Siła dźwięku G

Wyniki symulacji wskazują (Rys.5), że uśredniona w Sali siła dźwięku G kształtuje się pomiędzy 2 dB dla modeli o kubaturze 16 000 m<sup>3</sup> do 5.5 dB dla 8 000 m<sup>3</sup>. W obrębie jednej kubatury, średnia siła dźwięku nieznacznie spada wraz z wydłużeniem Sali. Wzrost kubatury pomieszczenia o 50% powoduje spadek wartości siły dźwięku G o ok. 1.5 dB.



Rys.5 Uśredniona w obszarze widowni siła brzmienia  $G_{500-2000\text{Hz}}$ , wyznaczona w programie Odeon dla wszystkich analizowanych kubatur i kształtów.

Fig.5 Room-averaged Strength  $G_{500-2000\text{Hz}}$  calculated by Odeon (grid response) in all volumes and models.



Rys.6 Zależność pomiędzy siłą dźwięku G, a szerokością sali wyznaczona wg modelu regresyjnego dla siły dźwięku z Tabelicy 1 (sale puste) i w symulacjach w programie Odeon (sale pełne skorygowane na brak widowni).

Fig.6 Relation between Strength and room width shown for Odeon simulation (corrected for lack of audience) and for Strength regression model from Table.1 (empty rooms).

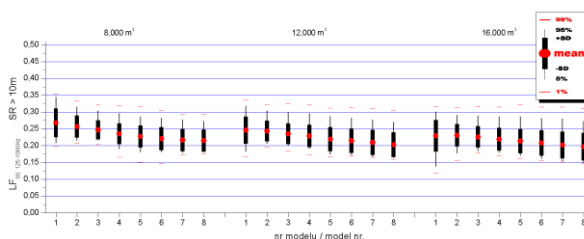
Dla sal o rzucie zbliżonym do kwadratu, odchylenie siły dźwięku G w obszarze widowni od wartości średniej jest małe. Odchylenie standardowe wynosi zaledwie 0.3~0.6 dB. W pozostałych typach sal równomierność rozkładu siły dźwięku maleje wraz ze wzrostem kubatury i wydłużeniem proporcji sali. Najwyższe odchylenie standardowe wynoszące 1,5dB zanotowano w najdłuższym i największym modelu (nr. 8, 16 000 m<sup>3</sup>). Dla porównania odchylenie standardowe trzech najlepszych sal pudełkowych podane w [17] wynosi 1~1,5 dB.

Porównanie wyników symulacji G oraz wartości wyznaczonych z modelu regresyjnego G z Tabelicy 1 pokazano na rysunku (Rys.6) Z tego samego powodu co w przypadku przejrzystości brzmienia, wyniki symulacji zostały skorygowane o wpływ wypełnienia widowni. Zostało to przeprowadzone w taki sam sposób, jak opisano w poprzednim punkcie. Symulacje siły dźwięku G w warunkach pustej Sali były ok. 1.0 dB wyższe, niż przy pełnej widowni, zatem przedstawione wyniki symulacji (Rys.6) zostały zwiększone o tę wartość, aby umożliwić bezpośrednie porównanie z wynikami z modeli regresyjnych.

Widać wyraźnie, że wartości siły dźwięku G wyznaczone w symulacjach i obliczone z użyciem modelu regresyjnego cechuje bardzo duża zbieżność. W obu przypadkach siła dźwięku rośnie wraz ze wzrostem szerokości. Wynika to zapewne z faktu, że w salach o rzucie bardziej zbliżonym do kwadratu widownia siedzi bliżej źródła dźwięku, niż w długich i wąskich salach, a zatem uśredniona dla wszystkich miejsc odległość pomiędzy odbiorcą, a źródłem dźwięku jest krótsza.

### 3.4. Miara wczesnej energii bocznej $LF_{80}$

Wyniki symulacji wskazują (Rys.7), że uśredniona w sali wartość miary wczesnej energii bocznej  $LF_{80}$  kształtuje się pomiędzy 0,20 do 0,27. W salach o kształcie zbliżonym do kwadratu (model 1), uśredniona wartość  $LF_{80}$  jest bliska 0.25, i zmniejsza się do 0.20 wraz z wydłużeniem pomieszczenia.



Rys.7 Uśredniona w obszarze widowni wartość miary wczesnej energii bocznej  $LF_{80, 125-1\text{kHz}}$ , wyznaczona w programie Odeon dla wszystkich analizowanych kubatur i kształtów.

Fig.7 Room-averaged Early Lateral Energy Fraction  $LF_{80, 125-1\text{kHz}}$  calculated by Odeon (grid response) in all analyzed volumes and models.

Wartość odchylenia standardowego jest raczej niska (0.03 ~0.04), w porównaniu do spotykanej w rzeczywistych salach [17], gdzie wynosi zwykle 0.05 do 0.10. Przyczyną tego jest brak odwzorowania efektów falowych w symulacjach komputerowych [18]. Należy jednak zwrócić uwagę na olbrzymie różnice wartości  $LF_{80}$  w obrębie widowni, dochodzące w niektórych modelach do 50%. Czynniki to tradycyjnie stosowane średnie wartości  $LF_{80}$  mało przydatnymi, jeśli nie są one uzupełnione o dodatkowe informacje o rozkładzie tego parametru, takie jak np. histogramy lub procentowy udział miejsc w Sali znajdujący się w danym zakresie wartości parametru.

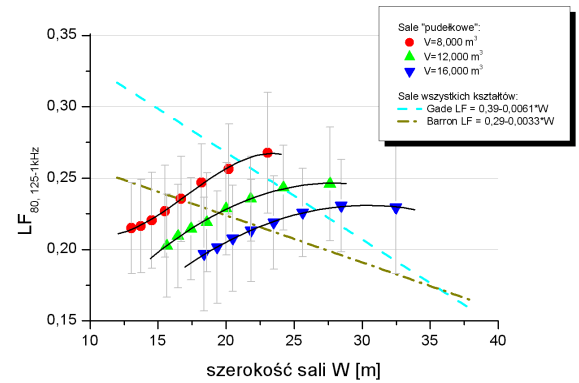
Na rysunku (Rys.8) pokazano zależność pomiędzy szerokością Sali, a wartościami  $LF_{80}$  wyznaczonymi w symulacjach oraz na podstawie modelu regresyjnego z Tablicy 1. Dodatkowo dołączono również drugi model regresyjny  $LF_{80}$  podany w [19]. Kiedy wyniki symulacji zostaną pogrupowane wg kubatury sal, zależność pomiędzy  $LF_{80}$  a szerokością pomieszczenia jest odwrotna, niż byśmy się spodziewali. Wyniki symulacji pokazują wzrost wartości  $LF_{80}$  przy wzroście szerokości sali, podczas gdy oba modele regresyjne przewidują odwrotną zależność. Rozbieżność ta została szczegółowo opisana w [20]. Za jedną z możliwych przyczyn uznano, że zarówno szerokość, jak i długość Sali wpływają równocześnie na rozkład i wartość miary wczesnej energii bocznej w salach koncertowych. Z innych prac wiemy, że zmiana wysokości Sali ma niewielki wpływ na ten parametr [21].

Inne przedstawienie wyników zaprezentowanych na rysunku (Rys.8) pokazano na kolejnym rysunku (Rys.9). Tym razem wyniki symulacji pogrupowano nie według kubatury sal, ale według stosunku długości do szerokości analizowanych modeli.

Spadek wartości  $LF_{80}$  wraz ze wzrostem szerokości Sali jest teraz wyraźnie widoczny (oznaczono go na Rys.10 trzema czarnymi liniami reprezentującymi linie regresji o najwyższym współczynniku korelacji dla stosunku długości do szerokości  $L/W=1.1, 1.77$  i  $2.77$ ). Nachylenie krzywej jest zbliżone do obu modeli regresyjnych. Widać jednak wyraźnie, że wzrost szerokości obniża wartość  $LF_{80}$  ale jedynie dla sal o identycznych proporcjach. To może tłumaczyć dlaczego pomieszczenia o takiej samej szerokości mogą mieć bardzo różne wartości  $LF_{80}$ , oraz dlaczego sale o różnej szerokości (jak np. Amsterdamska Concertgebouw czy Wiedeńska Gr. Musikvereinsaal) mogą charakteryzować się podobnymi wartościami  $LF_{80}$ . Zależność pomiędzy stosunkiem długości do szerokości, a wartością  $LF_{80}$  w salach „pudełkowych” pokazana na rysunku (Rys.9) może zostać przedstawiona w formie numerycznej pod postacią równania [13]:

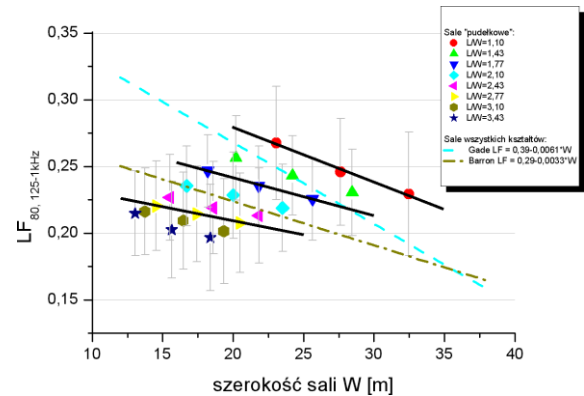
$$LF_{80} = 0.22395 + 0.39148 * e^{\frac{-L}{W^{1.03755}}} - W * \left( 0.00193 + 0.01081 * e^{\frac{-L}{W^{0.6763}}} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $W$  - szerokość sali [m];  $L$  - długość sali [m].



Rys.8 Zależność pomiędzy  $LF_{80}$ , a szerokością sali z wynikami symulacji pogrupowanymi po kubaturze oraz dwoma modelami regresyjnymi (autorstwa Gade i Barrona)

Fig.8 Relation between  $LF_{80}$  and room width shown for Odeon simulation and for two regression models (by Gade and Barron) grouped by models volume



Rys.9 Zależność pomiędzy  $LF_{80}$ , a szerokością sali z wynikami symulacji pogrupowanymi po stosunku długości do szerokości sali oraz dwoma modelami regresyjnymi (autorstwa Gade i Barrona)

Fig.9 Relation between  $LF_{80}$  and room width shown for Odeon simulation and for two regression models (by Gade and Barron), grouped by models length-to-width ratio

Model obliczeniowy	Średni błąd	Odch. stand.
Eq.(1)	0,035	0,028
$0.39-0.0061*W$ (Gade)	0,046	0,029
$0.29-0.0033*W$ (Barron)	0,039	0,031

Tablica. 2. Porównanie trzech modeli obliczeniowych wyrażone jako średni błąd pomiędzy wartościami  $LF_{80}$  obliczonymi, a zmierzonymi w 16 istniejących salach koncertowych

Table. 2. Comparison of 3 prediction models expressed as mean error between predicted and measured values of  $LF_{80, 125-1kHz}$  for 16 rectangular concert halls

W celu sprawdzenia poprawności zależności opisanej równaniem (1) porównano wyznaczone z niego wartości

LF<sub>80</sub> do tych zmierzonych w 16 „pudełkowych” salach koncertowych o kubaturze 4 000-16 000 m<sup>3</sup> podanych w [10, 12, 22]. Dodatkowo porównano również wartości wyznaczone wg obu liniowych modeli regresyjnych LF<sub>80</sub> wspomnianych powyżej (Rys.8 i 9). W Tablicy 2 pokazano różnice pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi wartościami wyrażone jako średni błąd w stosunku do pomiarów. Wyniki podane w Tablicy.2 wskazują, że równanie (1) pozwala na wyznaczenie średniej wartości LF<sub>80</sub> w Sali z nieznacznie mniejszym błędem, niż dwa pozostałe modele obliczeniowe, choć kosztem dużo większej złożoności samych obliczeń. Dostęp do większej liczby wyników badań z istniejących sal koncertowych, w tym z tych zlokalizowanych w Polsce pozwoliłby na uproszczenie tego równania oraz uzyskanie lepszej zgodności z pomiarami.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki niniejszej pracy potwierdzają silny wpływ kształtu pomieszczenia na akustykę „pudełkowych” sal koncertowych. W salach prostopadłościennych o zbliżonej kubaturze, chłonności akustycznej i stopniu rozproszenia dźwięku, proporcje długości do szerokości rzutu wydają się być istotnym czynnikiem kształtującym akustykę tych pomieszczeń. Parametry takie jak miara wczesnej energii bocznej LF<sub>80</sub> są czułe na zmiany w geometrii sal, pomimo zbliżonego czasu pogłosu w każdej z nich.

Wyniki pracy potwierdziły, że szerokość sali wydaje się dobrym wyznacznikiem wartości przejrzystości brzmienia C<sub>80</sub> i siły dźwięku G w nowoprojektowanych salach „pudełkowych”, jednak jest ona niewystarczająca w przypadku określania miary wczesnej energii bocznej. W pracy zaproponowano model obliczeniowy przewidujący wartość miary wczesnej energii bocznej w salach „pudełkowych”, uwzględniający równocześnie szerokość i długość sali.

Wyniki symulacji pokazują, że wartość miary wczesnej energii bocznej bardzo zależy od lokalizacji w Sali. Informacja o tym ginie, jeśli do opisanego akustyki danej Sali koncertowej wykorzystane zostaną jedynie wartości średnie. Zaleca się zatem, aby do opisanego akustyki sal koncertowych wykorzystywać więcej informacji, niż tylko wartości średnie. Pomocne w tym wydają się trójwymiarowe wykresy, histogramy czy też podawanie procentowej liczby miejsc znajdujących się w poszczególnych zakresach wartości.

#### INFLUENCE OF SHAPE ON ACOUSTICS OF „SHOE-BOX” TYPE CONCERT HALLS

**Summary:** 24 rectangular „shoe-box” type concert halls were simulated and analyzed using Odeon software. In this paper the influence of room shape and proportions on room averaged objective measures of C<sub>80</sub>, G and LF<sub>80</sub> are presented.

#### References

- [1] A. Krokstad, S. Strom, S. Sorsdal, “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique”, *J. of Sound and Vib.* 8(1), 118-125 (1968)
- [2] H. Juricic, F. Santon, “Images et rayons sonores dans le calcul numérique des échogrammes”, *Acustica* 28, 77-89 (1973)
- [3] J.H. Rindel, G.M. Naylor, “Predicting Room Acoustical Behaviour with the ODEON Computer Model”, 124th ASA Meeting, New Orleans (1992)
- [4] C.L. Christensen, “Odeon Room Acoustics Program, ver. 8.0, User Manual”, Odeon A/S, Denmark (2005)
- [5] B.I. Dalenbäck, „Catt Acoustic Manual.” (2009)
- [6] I. Bork, “Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation - I: Measurements, II – Calculations”, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol 91, str. 740-763 (2005)
- [7] M. Barron, L.J. Lee, “Energy relations in concert auditoriums”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 618-628 (1988)
- [8] J.S. Bradley, “Hall average characteristics of ten halls”, proceedings of the 13th International Congress on Acoustics, Belgrade (1989)
- [9] A.C. Gade, “Acoustical survey of eleven European concert halls – a basis for discussion of halls in Denmark”, Rep. No. 44. The Acoustics Lab., Tech. Univ. of Denmark (1989)
- [10] A.C. Gade, “Prediction of Room Acoustic Parameters”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 1857, paper no. 2AA4 (1991)
- [11] A.C. Gade, “Room acoustic properties of concert halls: quantifying the influence of size, shape and absorption area”, 3rd ASA/ASJ meeting, Honolulu, 12.1996, paper 5aAA1 (1996)
- [12] A.C. Gade, “The influence of basic design variables on the acoustics of concert halls; new results derived from analysing a large number of existing halls”, Proc. of IOA Meeting, Belfast, N.Ireland, 22-24 May, Vol. 19, Part 3, 95 -102 (1997)
- [13] A.K. Kłosak, “Wpływ wybranych parametrów funkcjonalno-przestrzennych na komfort akustyczny wnętrz sal koncertowych”, praca doktorska, PK, Kraków (2007)
- [14] C.H. Haan, “Geometry as a measure of the acoustic quality of auditoria”, PhD thesis, Sydney Univ. (1993)
- [15] A.K. Kłosak, “Computer modelling and simulation of sound field in 24 rectangular concert halls”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, No. 5, Pt. 2, p.3253, May 2008
- [16] M. Barron, “The value of ISO 3382 for research and design,” *Proc. Inst. Acoust.*, 24, Part 2 (2002)
- [17] J.S. Bradley, “A comparison of three classical concert halls”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 1176-1192 (1991)
- [18] M. Barron – przekaz ustny
- [19] M. Barron, “Measured early lateral energy fractions in concert halls and opera houses”, *J. Sound Vib.*, 232 (1), (2000)
- [20] A.K. Kłosak, Anders C. Gade, „Relationship between room shape and acoustics of rectangular concert halls”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.123, No.5, Pt.2, p.3319, 5.2008
- [21] M. Barron, “The effects of early reflections on subjective acoustic quality in concert halls”, PhD Thesis, University of Southampton (1974)
- [22] L. Beranek “Concert and Opera Halls - How they sound”, *Acoust. Soc. Am.*, New York (1996)
- [23] PN-EN ISO 3382:2001 Akustyka - Pomiar czasu pogłosu pomieszczenia w powiązaniu z innymi parametrami akustycznymi