



**COMOTI**  
ROMANIAN RESEARCH &  
DEVELOPMENT INSTITUTE FOR  
GAS TURBINES



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE  
POLITEHNICA BUCUREȘTI

Școala Doctorală de Inginerie Aerospațială

Științe Inginerești, Inginerie Aerospațială

## REZUMAT

**Cercetări privind reducerea zgomotului produs de motoarele  
turboreactoare prin modificarea paletelor în zona bordului  
de atac și/sau a bordului de fugă**

Candidat: **Ing. Andrei-George TOTU**

Îndrumător: **Prof. dr. ing. Daniel-Eugeniu CRUNȚEANU**

București, 2026

# CUPRINS

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPITOLUL 1. INTRODUCERE .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPITOLUL 2. MECANISMELE DE GENERARE A ZGOMOTULUI LA PALETELE IZOLATE SAU REȚELE DE PALETE CU APLICAȚIE LA TURBOMOTOARELE DE AVIAȚIE. INTEGRAREA SOLUȚIEI PALETELOR SERATE PENTRU REDUCEREA ZGOMOTULUI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Motivație și obiective .....	5
2.2. Mecanismul de producere a zgomotului de către palete.....	7
2.3. Serațiile ca și soluție constructivă de tip pasiv aplicate paletelor.....	9
2.4. Aspecte privind estimarea și măsurarea performanțelor .....	11
<b>CAPITOLUL 3. ASPECTE PRIVIND MODELAREA ZGOMOTULUI PALETELOR ȘI SOLUȚII DE REDUCERE A ZGOMOTULUI IDENTIFICATE ÎN LITERATURĂ.....</b>	<b>12</b>
3.1. Metode și modele de calcul pentru paletele serate (zgomot de interacțiune) ....	12
3.2. Implicații aerodinamice .....	17
3.3. Configurații de interes indentificate în literatura de specialitate .....	17
<b>CAPITOLUL 4. CORELAREA PARAMETRILOR CE DEFINESC TURBULENȚA CU SERAȚIILE PREVĂZUTE PE PALETĂ. TESTE PRELIMINARE .....</b>	<b>18</b>
4.1. Identificarea parametrului de corelare între serații și turbulență.....	18
4.2. Teste preliminare .....	19
<b>CAPITOLUL 5. PROCESAREA DATELOR EXPERIMENTALE ȘI COMPARAREA TEORIEI CU EXPERIMENTUL .....</b>	<b>21</b>
5.1. Introducere .....	21
5.2. Metodologie de analiză numerică și experimentală.....	23
5.3. Rezultate.....	23
<b>CAPITOLUL 6. ANALIZA EXPERIMENTALĂ A ZGOMOTULUI DE INTERACȚIUNE JET TURBULENT-PALETE CU SERAȚII LA BORDUL DE ATAC ÎN CONFIGURAȚIE DE REȚEA CU 4 PALETE .....</b>	<b>26</b>
6.1. Descrierea configurației de testare .....	26
6.2. Rezultate experimentale .....	30
6.3. Influența serațiilor .....	34
6.4. Estimarea efectului serațiilor asupra energiei acustice radiate.....	36

<b>CAPITOLUL 7. DEDUCEREA RELAȚIILOR SEMI-EMPIRICE ȘI SIMULAREA PERFORMANȚELOR ACUSTICE ALE SECTOARELOR DE PALETE CU BORD DE ATAC MODIFICAT .....</b>	<b>37</b>
7.1. Obținerea legilor semi-empirice .....	37
7.2. Simularea paletelor modificate la bordul de atac în configurație de rețea (sector) .....	42
7.3. Determinarea coerenței fluctuațiilor de presiune (“spanwise coherence”) pentru configurația cu serații la bordul de atac. Determinarea parametrilor nestaționari .....	46
7.4. Dezvoltarea analizei de directivitate .....	49
<b>CAPITOLUL 8. CONCLUZII .....</b>	<b>50</b>
8.1. Concluzii generale .....	50
8.2. Noutatea tezei .....	51
8.3. Contribuții personale .....	51
8.4. Perspective pentru dezvoltare ulterioară .....	52
<b>LUCRĂRI PUBLIFICATE ȘI PROIECTE .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERINȚE .....</b>	<b>53</b>

## ABSTRACT

Lucrarea curentă abordează problematica reducerii zgomotului generat de paletel turbomașinilor, cu un accent particular asupra soluțiilor pasive de tip serații și asupra interacțiunii complexe dintre fenomenele aerodinamice și cele acustice. În contextul actual al reglementărilor tot mai stricte privind impactul acustic al sistemelor de propulsie și conversie a energiei, înțelegerea mecanismelor de generare a zgomotului și dezvoltarea unor soluții eficiente, robuste și ușor integrabile reprezintă o direcție de cercetare de interes major. Deși zgomotul aerodinamic asociat paletelor a fost intens studiat în literatura de specialitate, majoritatea analizelor existente sunt concentrate fie pe configurații ideale sau simplificate, fie pe experimente la scări variate, care nu surprind în totalitate complexitatea interacțiunii dintre curgere turbulentă și geometria reală a paletelor. În acest context, teza își propune să contribuie la extinderea nivelului de cunoaștere printr-o abordare experimentală și numerică integrată, aplicată inclusiv paletelor aflate în rețea, o configurație relativ puțin investigată până în prezent, în ciuda relevanței sale practice. Cercetarea a fost structurată gradual, pornind de la o analiză detaliată a stadiului actual al cunoașterii în domeniul zgomotului aerodinamic și al soluțiilor de tip serații, continuând cu identificarea unor direcții de optimizare și cu dezvoltarea unei instalații experimentale dedicate. Aceasta a permis investigarea controlată a interacțiunii dintre curgere (jet turbulent) și paletă, precum și evaluarea performanțelor acustice și aspectelor aerodinamice pentru diverse configurații geometrice. Un aspect central al studiului îl constituie analiza paletelor cu serații atât în configurație de profil izolat cât și în rețea, evidențiindu-se anumite particularități ce contribuie la lărgirea bazei de cunoștințe pe un subiect relativ nișat. Pe baza rezultatelor experimentale și a prelucrărilor numerice realizate, au fost identificate corelații relevante între parametrii geometrici ai serațiilor, caracteristicile turbulenței incidente și nivelurile globale de presiune acustică. Aceste observații au condus la formularea unor legi experimentale și relații semi-empirice capabile să descrie tendințele principale ale reducerii zgomotului, oferind un cadru util pentru evaluarea și proiectarea preliminară a soluțiilor inovatoare. În plus, dezvoltarea unor instrumente numerice dedicate pentru prelucrarea și reprezentarea parametrilor globali a permis o analiză coerentă și reproductibilă a datelor, contribuind la consolidarea unei metodologii aplicabile atât în cercetare, cât și în mediul educațional și ingineresc.

## CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Reducerea zgomotului generat de sistemele aerodinamice reprezintă una dintre provocările majore ale ingineriei moderne, în special în domenii precum aeronautica, turbomașinile și conversia energiei folosind sisteme ce înglobează elemente paletate profilate aerodinamic. Creșterea traficului aerian, extinderea utilizării turbinelor eoliene și dezvoltarea continuă a sistemelor de ventilație precum și sistemele de propulsie (în general) au condus la o preocupare constantă pentru limitarea impactului acustic asupra mediului și asupra calității vieții. În acest context, zgomotul aerodinamic nu mai este privit doar ca un efect secundar inevitabil, ci ca un criteriu de performanță care trebuie abordat încă din fazele incipiente de proiectare. Fenomenul de generare a zgomotului în cazul paletelor (sau elemente profilate aerodinamic și plasate în curgere) este strâns legat de structura curgerii (prezența formațiunilor turbulente) și de modul în care aceasta interacționează cu suprafețele solide. Această interacțiune conduce la fluctuații de presiune distribuite spațial și temporal, care se propagă sub formă de unde acustice. Deși mecanismele fundamentale sunt cunoscute și descrise teoretic, complexitatea fenomenului crește semnificativ în condiții reale de funcționare, unde geometria paletelor, efectele tridimensionale și prezența altor componente influențează atât comportamentul aerodinamic, cât și răspunsul acustic.

Literatura de specialitate surprinde un interes susținut pentru soluțiile pasive de reducere a zgomotului, datorită simplității constructive și a impactului redus asupra performanțelor globale (cel puțin în teorie). Dintre acestea, serațiile (în general definite ca modificări geometrice locale de tip decupări sub diverse forme) aplicate pe bordurile paletelor (de atac sau de fugă), s-au dovedit eficiente în numeroase studii, fiind inspirate atât din observații biologice, cât și din analize teoretice și experimentale. Cu toate acestea, majoritatea rezultatelor raportate se bazează pe experimente realizate la scară redusă, pe palete izolate sau în configurații simplificate, ceea ce limitează generalizarea concluziilor și aplicabilitatea directă în sisteme reale. Un aspect insuficient explorat îl reprezintă comportamentul acustic al paletelor cu geometrie modificată, integrate în rețea, unde interacțiunea dintre palete introduce mecanisme suplimentare de generare și modificare a zgomotului (ca și particularitate interferențe de tip distructiv). În aceste condiții, soluțiile validate pentru palete izolate pot să nu conducă la aceleași beneficii, iar unele efecte pot deveni chiar dominante. Această lacună în literatura de specialitate a constituit una dintre motivațiile principale ale prezentei teze.

Lucrarea de față își propune să abordeze această problematică printr-o cercetare coerentă care îmbină analiza documentară, dezvoltarea experimentală și modelarea numerică. Prin proiectarea și realizarea unei instalații experimentale dedicate, au fost investigate diverse configurații de palete, cu accent pe evaluarea performanțelor acustice și aerodinamice în condiții controlate. Studiile realizate au permis nu doar validarea unor soluții existente, ci și identificarea unor comportamente specifice paletelor aflate în rețea, contribuind la o înțelegere mai profundă a fenomenelor implicate. În plus, definirea unor relații experimentale (de tip semi-empirice) bazate pe datele obținute a urmărit să ofere un instrument util pentru evaluarea rapidă a soluțiilor de acest tip. Dezvoltarea unor coduri (algoritmi de calcul) pentru prelucrarea și reprezentarea parametrilor globali relevanți completează această abordare, facilitând analiza integrată a rezultatelor și deschizând perspective pentru aplicații ulterioare în cercetare, educație și inginerie aplicată.

## **CAPITOLUL 2. MECANISMELE DE GENERARE A ZGOMOTULUI LA PALETELE IZOLATE SAU REȚELE DE PALETE CU APLICAȚIE LA TURBOMOTOARELE DE AVIAȚIE. INTEGRAREA SOLUȚIEI PALETELOR SERATE PENTRU REDUCEREA ZGOMOTULUI**

### **2.1. Motivație și obiective**

Pe măsură ce orașele devin din ce în ce mai aglomerate, zgomotul produs de aeronave a devenit o problemă de mare actualitate, în condițiile în care aeroporturile nu mai sunt izolate. Dintre sursele principale de zgomot ale unei aeronave, sistemul de propulsie are o contribuție semnificativă, în special ca urmare a dezvoltării motoarelor turbofan cu factor de dublu-flux foarte mare, destinate reducerii consumului specific. În aceste condiții, fluxul secundar, care vehiculează un debit mare de aer, devine una dintre sursele dominante de zgomot. Azimi [1] evidențiază corelarea ponderii surselor de zgomot cu soluția tehnologică adoptată: pentru motoarele cu factor de dublu-flux mic, zgomotul ventilatorului este comparabil cu cel al jetului, în timp ce pentru factor de dublu-flux mare, ventilatorul devine principala sursă de radiație acustică, caracterizată printr-o frecvență dominantă asociată vitezei unghiulare, Blade Passing Frequency (BPF) [2]. Chaytania [2] arată că intervalul de frecvențe de interes pentru reducerea zgomotului este cuprins între 0.5 și 3 BPF, corespunzător principalelor regimuri de funcționare ale motorului. Principalele surse de zgomot ale motoarelor turbofan sunt prezentate în Figura 1.

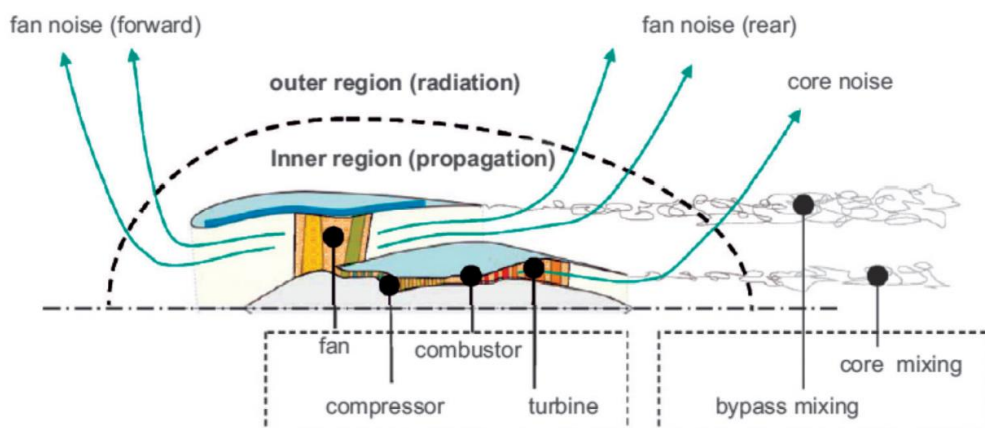


Figura 1. Identificarea surselor de zgomot pentru MTR-DF [1]

Ponderea surselor de zgomot (dacă analizăm MTR-DF ca și un ansamblu format din mai multe componente) nu este aceeași indiferent de evoluția în care se află aeronava. În literatura de specialitate se identifică faptul că zgomotul produs de ventilator în faza de decolare („takeoff”) este la același nivel cu zgomotul generat de jet. În faza de apropiere și aterizare („approach”) componenta predominantă a zgomotului produs de sistemul de propulsie este generată de ventilator (Figura).

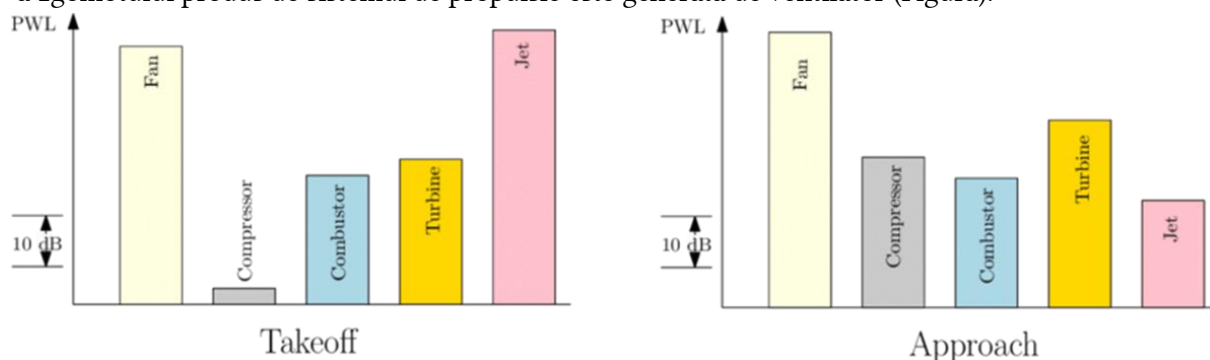


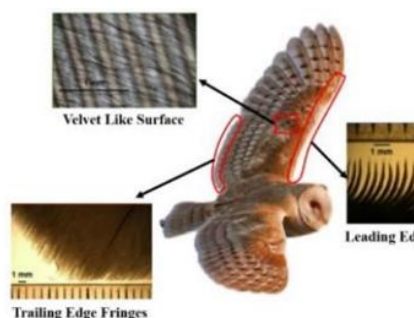
Figura 2. Ponderea în generarea de zgomot a diverselor componente pentru un MTR-DF modern [2]

Motivația studiului este susținută și de directivele europene privind emisiile sonore, care urmăresc asigurarea unui mediu de trai mai bun. La nivelul Uniunii Europene, aceste directive sunt transpuse și în legislația națională, un exemplu fiind Directiva 2002/49/CE privind evaluarea și gestionarea zgomotului ambiental, similară cu legea nr. 121 din 3 iulie 2019 [RO]. Alte reglementări relevante vizează limitarea zgomotului produs de aeronave și restricțiile operaționale în zonele adiacente aeroporturilor, precum Regulation No 216/2008, Regulation No 748/2012, Regulation No 598/2014 sau Directive 2006/93/EC.

În cadrul programului HORIZON 2020, problema zgomotului a fost identificată ca direcție prioritară, conducând la dezvoltarea unor proiecte aplicative orientate spre reducerea impactului acustic al aviației. Exemple relevante sunt proiectele ANIMA, ARTEM sau RUMBLE, care vizează identificarea de soluții noi, optimizarea celor existente și definirea unor proceduri de limitare a zgomotului produs de aeronave.

Modificarea bordului de atac sau a bordului de fugă pentru reducerea zgomotului de interacțiune rotor–stator reprezintă o soluție relativ recentă, abordată încă limitat în literatura de specialitate. Aceste soluții sunt inspirate din adaptări observate în natură, precum structura penajului bufnițelor pentru zbor silențios [3] sau proeminențele de pe aripioarele unor specii de balene [4], ilustrate în Figura 3. Integrarea eficientă a acestor concepte bio-inspirate în motoarele aeroreactoare poate contribui semnificativ la reducerea impactului acustic al aviației. Teza vizează utilizarea paletelor serate pentru reducerea zgomotului de interacțiune rotor–stator, precum și a zgomotului propriu al paletelor, prin identificarea mecanismelor fizice implicate și a direcțiilor de optimizare care să permită scalabilitatea soluției. Studii anterioare au raportat reduceri ale nivelului de zgomot de

ordinul 6–7 dB pentru serații aplicate pe bordul de atac [5] [6] [7] și de 1–3 dB pentru serații pe bordul de fugă [8] [9], iar combinarea celor două soluții ar putea conduce la reduceri suplimentare ale nivelului global de presiune acustică, așa cum este ilustrat în Figura 4.



(a) adaptare bufnite [3]

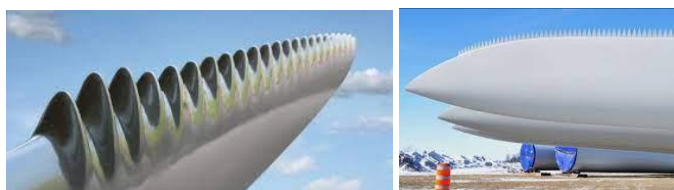


(b) adaptare balene („humpback whales”) [4]

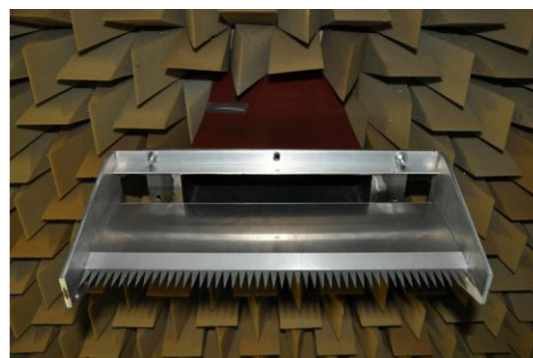
Figura 3. Soluții de îmbunătățire a performanțelor aerodinamice și acustice întâlnite în natura



(a) paleta cu bord de atac modificat [6]



(b) bord de atac/bord de fugă seriat la turbine eoliene [10] [11]



(c) placa plană cu bord de fugă seriat [7]

Figura 4. Soluții de îmbunătățire a performanțelor aerodinamice și acustice întâlnite în inginerie

## 2.2. Mecanismul de producere a zgomotului de către palete

Așa cum observă Chaitanya [12], profilele aerodinamice plasate într-un curent turbulent constituie surse eficiente de generare a zgomotului, prin transformarea mișcării rotaționale turbulente în emisie sonoră, predominant în zona bordului de fugă. Lyu [5] și Brooks [13] arată că zgomotul unui profil aerodinamic poate fi împărțit în self-noise și zgomot de interacțiune cu turbulența curentului incident, sursele self-noise-ului fiind asociate interacțiunii fluid–suprafață și desprinderilor din zona bordului de fugă, așa cum este ilustrat în Figura 5 [13] [14]. Mecanismele de generare a zgomotului paletei au fost studiate încă din anii '50, prin contribuții fundamentale ale lui Powell, Ffowcs Williams, Hall, Chase, Paterson, Howe și Brooks, care stau la baza teoriilor aeroacustice utilizate în prezent.

Zgomotul aerodinamic apare atunci când un curent neuniform și nestăionar interacționează cu suprafața solidă a unui profil aerodinamic, fenomen cunoscut sub denumirea de aerofoil–gust interaction (AGI) [15]. Acest tip de zgomot este frecvent întâlnit în aplicații aero, precum paletele de rotor, motoarele turbofan, elementele de hipersustentație, palele elicopterelor sau turbinele eoliene, unde turbulența curgerii este impusă de vânt și are un caracter dificil de previzionat [15] [16]. Câmpul de presiune acustică pentru un profil aerodinamic bidimensional plasat într-o curgere turbulentă este prezentat în Figura 6, evidențiind comportamentul de sursă acustică de tip dipol, în acord cu teoriile clasice dezvoltate în perioada anilor '50–'70.



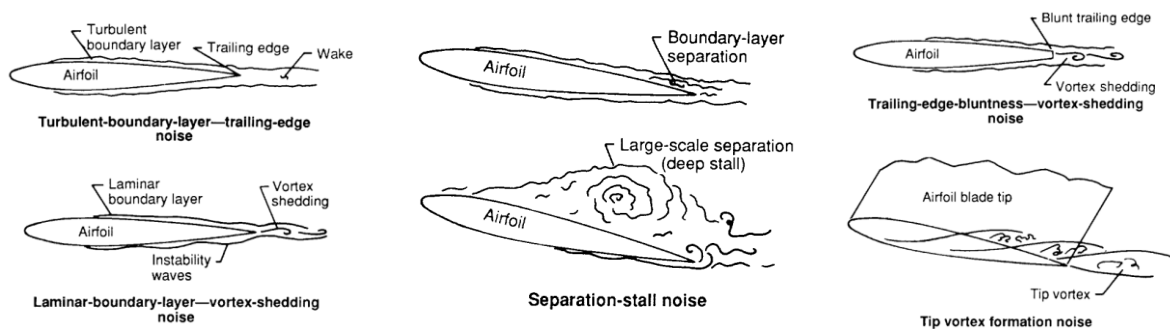


Figura 5. Fenomene apărute la curgerea peste un profil aerodinamic care conduc la generarea zgomotului de tip „self-noise” [13]

Lyu [5] arată că zgomotul de interacțiune fluid–pală, caracteristic turbinelor eoliene, este de nivel ridicat, având amplitudini mari la frecvențe joase, dar și componente în bandă largă, putând fi asimilat, la modul general, cu zgomotul de tip AGI. Un exemplu relevant este interacțiunea siajului provenit de la ventilatorul unui motor turbofan cu paletelor treptelor următoare, care generează zgomot specific bordului de atac.

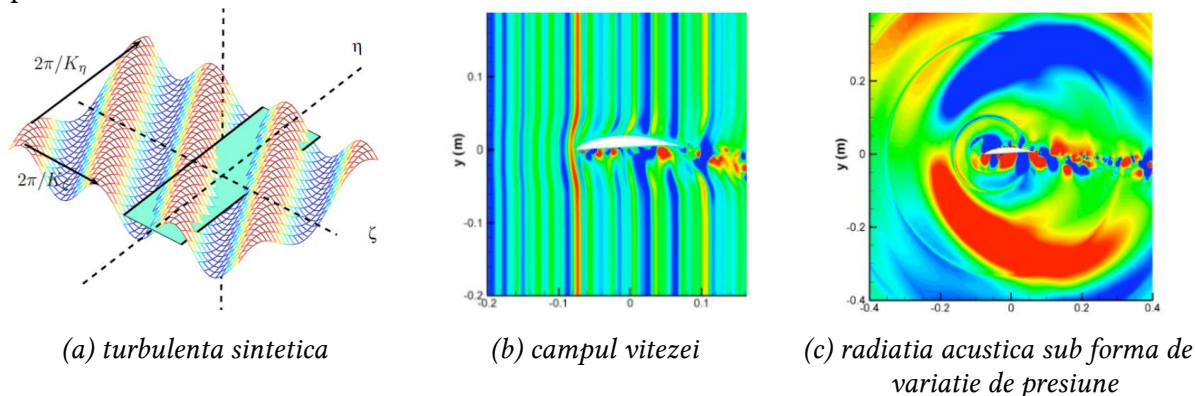
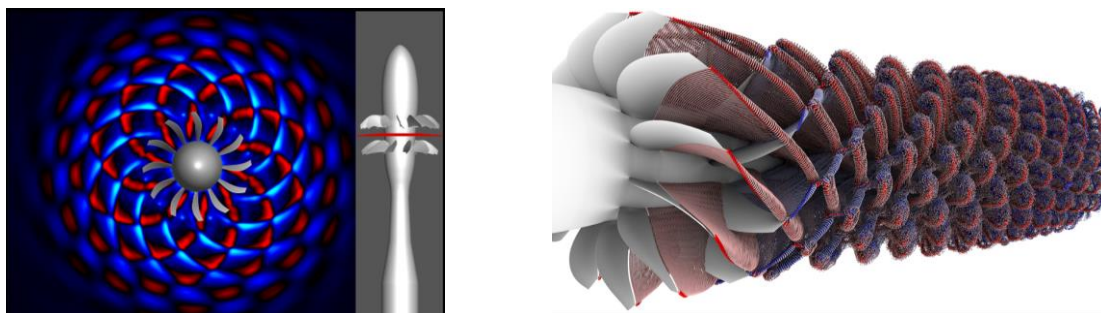


Figura 6. Câmpul de viteze și presiuni în urma acțiunii unui curent turbulent [17]

În cazul soluțiilor de tip open-rotor cu elici contrarotative, interacțiunile dintre trepte conduc la emisii acustice importante în bandă largă, responsabile de o mare parte a zgomotului acestor sisteme de propulsie [5]. Așa cum este ilustrat în Figura 7, întrepătrunderea particulelor provenite din avalul celor două trepte generează un câmp de presiune cu fluctuații ridicate, influențând frontul de propagare al undelor acustice. Aplicarea serațiilor pe bordul de fugă poate favoriza o difuzie mai eficientă a fluctuațiilor de presiune, conducând la o reducere a nivelului de zgomot la distanță.

Zgomotul specific bordului de fugă este un zgomot aerodinamic rezultat din împrăștierea fluctuațiilor de presiune pe suprafața solidă și reprezintă o sursă importantă, caracterizată prin componente tonale de amplitudini mari și zgomot de bandă largă. Acest tip de zgomot este întâlnit la aripi, elici, ventilatoare, compresoare și turbine axiale, precum și la turbinele eoliene [16].



(a) vizualizarea fronturilor de propagare a undelor acustice în zona de interacțiune a celor două trepte

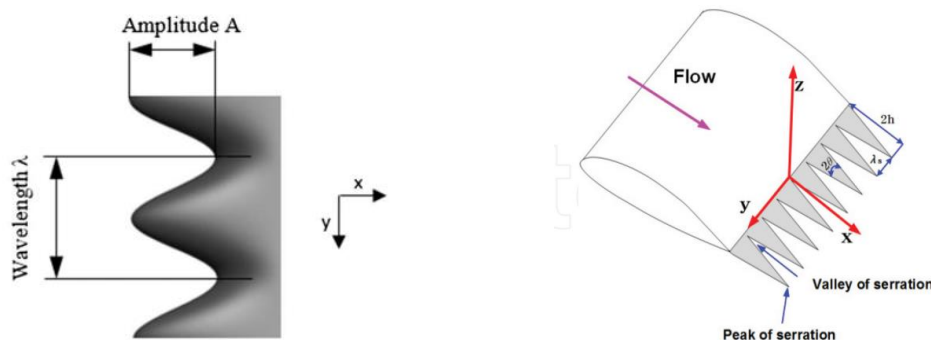
(b) urmărirea particulelor („particle seeding”) ce trec de cele două trepte

Figura 7. Interacțiunea între treptele soluției open-rotor [18]



### 2.3. Serațiile ca și soluție constructivă de tip pasiv aplicate paletelor

Serațiile reprezintă structuri sub formă de dinți integrate în geometria unei plăci plane sau a unei paleti cu profil aerodinamic, definite printr-o lege de variație în anvergură, amplitudine și pas. În literatura de specialitate, aceste elemente geometrice sunt notate diferit în funcție de abordare, amplitudinea fiind exprimată, de exemplu, prin  $h$  sau  $A$ , iar pasul prin  $p$  sau  $\lambda$ , așa cum este ilustrat în Figura 8. Pe baza acestor mărimi se definesc parametri adimensionali utilizați pentru descrierea comportamentului aerodinamic și acustic, adimensionalizarea incluzând frecvența și coarda, anvergura sau parametrii turbulenței incidente. Aplicarea serațiilor constituie o soluție pasivă de reducere a zgomotului, care nu necesită sisteme suplimentare de acționare, însă eficiența acestora este limitată la anumite condiții de funcționare, fiind dependentă de regimul de curgere și de parametrii curențului turbulent. Din acest motiv, optimizarea geometriei este esențială pentru obținerea unor beneficii pe o plajă cât mai largă de regimuri de funcționare. Studii experimentale și teoretice au arătat că aplicarea serațiilor în zona bordului de atac, inspirată de structura aripioarelor balenelor, poate conduce la îmbunătățirea performanțelor aerodinamice, în special la incidențe mari [4] [5] [19]. Ito [20] demonstrează experimental, prin vizualizări cu fum, că prezența serațiilor de tip dinți de fierăstrău conduce la o ameliorare a câmpului curgerii pentru o paletă testată la numere Reynolds mici. Din punct de vedere acustic, corelarea parametrilor serației cu cei ai turbulenței incidente poate conduce la reduceri semnificative ale nivelului de zgomot într-o bandă de frecvențe de interes pentru proiectant [5] [12] [21].



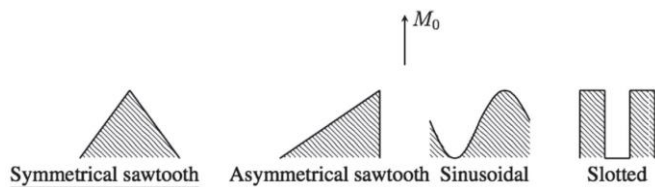
(a) vedere în zona bordului de atac [7]

(b) vedere la bordul de fugă [8]

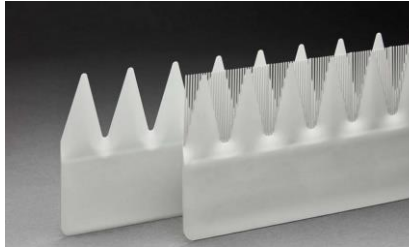
Figura 8. Parametrii geometrici ce definesc serația

Ideea adaptării soluției observate în natură nu este atât de ușor de implementat. Cercetările (pornind de la cele teoretice la cele experimentale) au început cu soluțiile simple, ușor de modelat și integrat în ecuațiile complexe asociate fenomenului studiat. În acest sens, există o bază mare de experimentări realizate pe soluții pasive de tip bord de fugă de tip dinți de fierăstrău simetrici [6] [14] [22]. Alte configurații care au început a fi studiate sunt: dinți de fierăstrău asimetrici, sinusoidale, decupături ("slots") etc. Teoria lui Howe [23], care pune bazele acestui procedeu de reducere a zgomotului prin utilizarea serațiilor, este destul de limitată în sensul că apar dificultăți în a evalua relațiile integrale dacă se folosesc forme complexe. Totuși, au fost observate și câteva lucrări care au ca scop depășirea acestor limitări a modelelor clasice (ale lui Howe [23], Amiet [24] [25] [26], Curle [27] sau Lighthill [28]), lucrări care vor fi menționate pe parcursul raportului.

În Figura 9 sunt identificate câteva dintre soluțiile 2D sau 3D de serații la bordul de fugă integrate la plăci plane sau paleti cu secțiune profil aerodinamic. Se observă faptul că, față de teoria inițială, cercetătorii au realizat variații ale formei sau chiar au propus forme noi. În acest caz, numai experimentele (și ele la scară redusă) ar putea surprinde comportamentele unor astfel de soluții. Unii cercetători au preferat să aplice/adauge o porțiune serată la bordul de fugă [22] [29] [30], chiar dacă acest lucru modifică puțin coarda profilului, pe când alți autori au ales să proiecteze o paletă care să înglobeze serațiile tridimensionale [31].



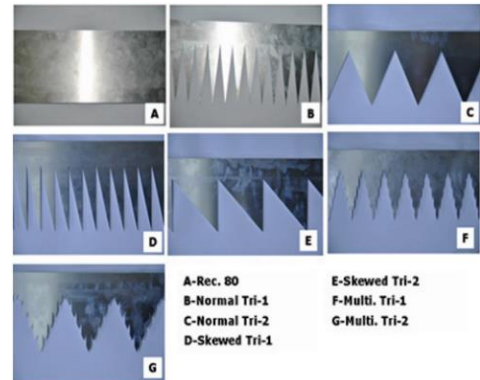
(a) Forme generale, reprezentare 2D [16]



(c) serații sinusoidale (3D) [31]



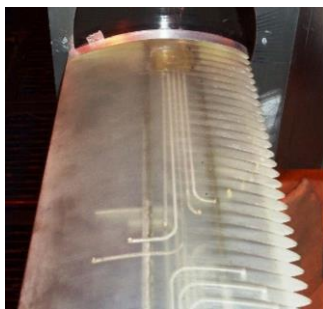
(d) serații triunghiulare cu șanturi („slots”)[6]



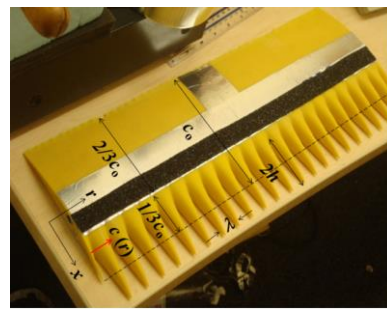
(b) variații ale serațiilor triunghiulare [8]

Figura 9. Tipuri de serații/dinți ce pot fi utilizați la bordul de fugă

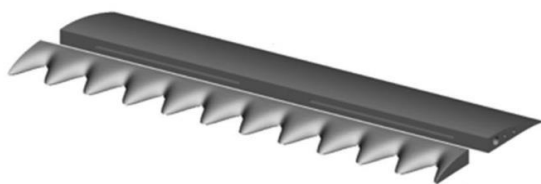
Ryi [8] arată experimental că frecvența fenomenului de vortex shedding generat de serații pe profile de turbine eoliene depinde puternic de parametrii geometrici ai acestora, variațiile cele mai pronunțate fiind observate pe direcția anvergurii. Gruber [6] extinde soluțiile regulate prin utilizarea unor serații definite prin funcții aleatorii, cu amplitudini distribuite normal, permițând corelarea între coarda profilului inițial și coarda medie a soluției modificate. Serațiile la bordul de fugă sunt mai ușor de realizat și au fost studiate frecvent pe plăci plane sau profile subțiri, în timp ce pentru serațiile tridimensionale aplicate pe bordul de atac s-a observat experimental o intensificare a surselor acustice în zonele de amplitudine minimă [12]. Chaytania [2] evidențiază că zgomotul unei palete într-un curent turbulent este dominat de contribuția bordului de atac la frecvențe joase și de cea a bordului de fugă la frecvențe ridicate, iar utilizarea plăcii plane poate conduce la supraestimarea reducerilor de zgomot față de cazul paletei reale. Pentru creșterea eficienței serațiilor la bordul de atac sunt propuse geometrii avansate (Figura 10), precum suprapunerea mai multor frecvențe sinusoidale, serații triunghiulare retezate sau introducerea de canale în zonele de maxim al sursei acustice [12].



(a) serații sinusoidale cu amplitudine mică [6]



(b) serații triunghiulare cu amplitudine mare [21]



(c) paletă configurabilă cu diverse serații (pentru printare 3D) [7]



(d) serații care încep de la bordul de atac și se extind către bordul de fugă [19]

Figura 10. Serații aplicate la bordul de atac al paletelor

## 2.4. Aspecte privind estimarea și măsurarea performanțelor

Chaitanya et al. [21] arată că analiza eficienței serațiilor trebuie să includă identificarea mecanismului de reducere a zgomotului, sensibilitatea la parametrii geometrici și ai turbulenței, transpunerea de la geometrii bidimensionale la profile tridimensionale reale și separarea efectelor asupra self-noise și zgomotului de interacțiune. Majoritatea studiilor experimentale se bazează pe serații sinusoidale aplicate la bordul de atac, analiza zgomotului de interacțiune fiind fundamentată pe teoriile clasice dezvoltate de Sears, Amiet și Howe [5] [9] [13] [23] [24] [25] [26] [32] [33]. Modelele analitice, precum cel al lui Howe sau Amiet, se bazează pe ipoteze simplificatoare (curgere bidimensională, turbulență înghețată, anvergură infinită), ceea ce limitează domeniul lor de aplicabilitate și poate conduce la supraestimarea reducerii de zgomot [6] [34].

Au fost dezvoltate în literatura de specialitate modele teoretice și semi-empirice pentru plăci plane și profile serate, precum cele propuse de Lyu [5] [9], Brooks [13], Biedermann [7], Chaitanya [2] și Ryi [8], care includ explicit parametrii serației și ai turbulenței, dar rămân valabile doar în anumite condiții de curgere. Modelele dedicate zgomotului de tip AGI, precum RDT (Goldstein) [15], au fost comparate experimental de Tian [10], evidențiindu-se diferențe între predicțiile teoretice și spectrele măsurate. În general, modelele analitice oferă o descriere detaliată a mecanismelor fizice, în timp ce modelele empirice sunt mai robuste experimental, dar limitate ca domeniu de aplicare [6] [34].

Rezultatele experimentale arată că efectele tridimensionale sunt semnificative, stratul limită din zona bordului de fugă fiind mai energic decât în cazul plăcii plane [21]. Liu [35] și Leon [22] demonstrează experimental că serațiile aplicate la bordul de fugă modifică structura siajului și reduc intensitatea formațiunilor turbulente, fără a altera semnificativ comportarea aerodinamică globală. În ciuda progreselor realizate, nu există încă un model complet care să descrie integral fenomenul, motiv pentru care abordările actuale combină modele analitice simplificate, simulări numerice și validare experimentală [5]. Reproducerea zgomotului de interacțiune specific turbomașinilor necesită utilizarea unei turbulențe artificiale generate cu ajutorul grilajelor, structura câmpului de curgere rezultat fiind ilustrată în Figura 11.

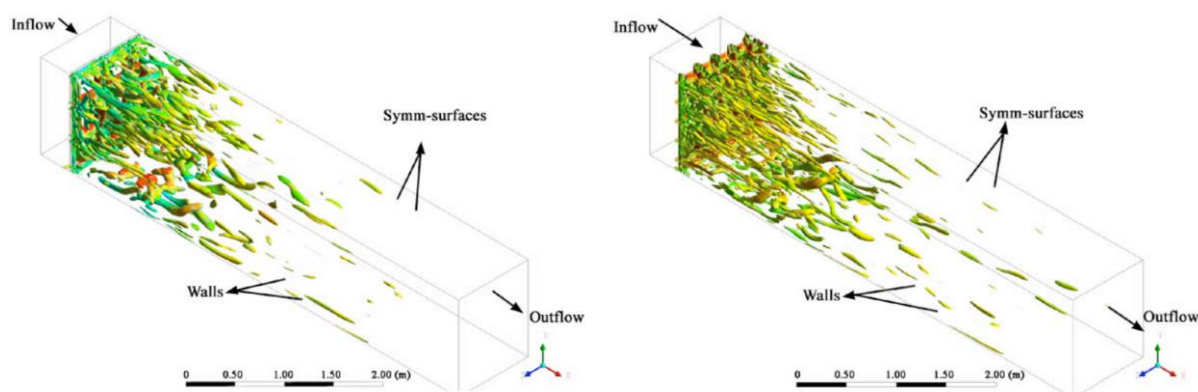


Figura 11. Turbulența generată de prezența grilajului (stanga- grilaj 1; dreapta- grilaj 2) [39]

Liu [39] arată experimental că turbulența generată de un grid poate fi considerată izotropică, conform ipotezelor modelelor analitice, abia la o distanță de 2–4 m în aval, diferențele dintre parametrii mășurați și cei obținuți numeric fiind în general de ordinul 15–20%, corelări mai bune fiind raportate în [6], [40], [41], [42]. O alternativă pentru generarea turbulenței este utilizarea unei tije plasate în amonte profilului, care produce vârtejuri cvasi-periodice descrise de teoria lui von Kármán [43] [44] [45], conducând la forțe aerodinamice nestăționare și la emisii acustice cu componentă tonală dominantă suprapusă peste zgomotul de bandă largă [44].

Pentru corelarea efectelor acustice cu implicațiile aerodinamice, Leon et al. [22] integrează măsurători acustice realizate cu aranjamente de microfoane circulare în cadrul experimentelor de tunel aerodinamic. Tong [34] subliniază însă că, în ciuda numărului mare de studii existente,

mecanismele care conduc la reducerea zgomotului prin serații, în special la bordul de atac, nu sunt pe deplin înțelese, majoritatea rezultatelor fiind obținute experimental în condiții de turbulență omogenă și izotropică, cu dificultăți semnificative în măsurarea câmpului de curgere puternic nestaționar.

## CAPITOLUL 3. ASPECTE PRIVIND MODELAREA ZGOMOTULUI PALETELOR ȘI SOLUȚII DE REDUCERE A ZGOMOTULUI IDENTIFICATE ÎN LITERATURĂ

### 3.1. Metode și modele de calcul pentru paletel serate (zgomot de interacțiune)

Odată cu dezvoltarea mașinilor paletate (vorbind aici de turbomotoare), au început să apară întrebări legate de diferite caracteristici/dependențe ale curgerilor în relație cu fenomenele măsurabile. Una dintre preocupările ce au apărut la începutul anilor '50 a fost determinarea spectrului acustic datorat efectelor aerodinamice. În acest sens, există o serie de autori care au pornit demersuri atât pe cale teoretică cât și experimentală (putând fi amintiți aici Curle, Lighthill, Philips, Proudman și într-o oarecare măsură, prin analogie, Stratton) [27]. Lucrările cele mai remarcabile care stau la baza descrierii modului în care se generează zgomot aerodinamic, diferit de cel generat de vibrația unui solid plasat într-un mediu, au fost identificate ca fiind cele ale lui Curle și Lighthill. Pornind de la relațiile Navier-Stokes și conservarea momentului într-o formă propusă de Reynolds, s-a trecut de la ecuația exactă a mișcării fluidului (ecuația (1)) la relația (2) prin adăugarea unor termeni de tip sursă (masa  $Q(x,t)$  pe unitatea de volum, introdusă la un anumit moment de timp la poziția  $x$ ). [27] [28]

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij}) \quad (1)$$

unde  $T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - a_0^2 \rho \delta_{ij}$ ,  $\rho$  este densitatea,  $p_{ij}$  este componenta de presiune a tensorului de tensiune,  $a_0$  este viteza sunetului în fluid și  $v_i$  este componenta vitezei pe direcția  $x_i$  ( $i = 1,2,3$ ).

Pornind de la relația (2), Curle [27] încearcă să dezvolte ceva mai mult teoria lui Lighthill și se concentrează pe diferențele între intensitățile acustice generate de surse cu caracteristici diferite (dipoli vs quadripoli). Prin analiza sa, ajunge la aceeași relație obținută de Lighthill pentru quadripoli (cunoscută și sub denumirea de legea a IIX-a a lui Lighthill) precum și la o relație similară pentru surse de tip dipoli [27].

$$\rho - \rho_0 = \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int v \frac{T_{ij} \left( y, t - \frac{|x-y|}{a_0} \right)}{|x-y|} dy \quad (2)$$

Această asemănare între cele două tipuri de surse este amintită în relația (3). Relația este utilă pentru a evalua, cel puțin cantitativ, efectele acustice corespunzătoare diferitelor surse specifice. De exemplu, pentru profilele aerodinamice, extradadosul reprezintă o sursă de tip dipol iar curgerea fluctuantă în statul de forfecare („shear layer”) corespunde unei surse acustice de tip quadropol, așa cum remarcă și Turner [46].

$$\frac{I_Q}{I_B} \sim \left( \frac{U_0}{a_0} \right)^2 \cdot f(R) \quad (3)$$

Pornind de lucrările lui Curle, Amiet [25] încearcă să dezvolte relațiile generale dezvoltate în anii '50 și să le aplice unui profil aerodinamic simplificat (placă plană). Acesta identifică totodată că mediul în care sunt plasate profilele aerodinamice nu este unul neperturbat, însă se poate considera o turbulență „înghețată” („frozen turbulence”) ai cărei parametrii ce descriu comportamentul fluctuant sunt constanți pe cele trei direcții de propagare (numere de undă constante). În acest fel, apelând și la

diferite procedee matematice, reușește să enunțe o lege pentru PSD („Power Spectral Density”) folosind o turbulență specifică modelului spectrului von Karman, care mai departe poate fi convertită în nivel de presiune acustică (exemplu, relația (4)).

$$SPL_{1/3} = 10 \lg \left[ \frac{Ld}{z^2} M^5 \frac{\overline{u^2}}{U^2} \frac{\widehat{k_x^3}}{(1 + \widehat{k_x^2})^{7/3}} \right] + 181.3 \quad (4)$$

Evident, teoriile „complete” sunt bazate pe ipoteze simplificatoare. Același lucru se întâmplă și cu teoria lui Amiet care, aplicată paletelor ce au în secțiune un profil aerodinamic, necesită corecții. O astfel de corecție, de exemplu, identificată de Tian [10] este relația (5).

$$SPL [dB] = \frac{9}{50} \frac{\frac{e}{c}}{\left(\frac{e}{c}\right)_{ref}} \frac{f}{U} \frac{\left(\frac{\Lambda}{c}\right)_{ref}}{\frac{\Lambda}{c}} \quad (5)$$

Liu [39] demonstrează experimental că turbulența generată cu ajutorul unui grid poate fi considerată izotropică, conform ipotezelor modelelor analitice, doar la o distanță de aproximativ 2–4 m în aval, diferențele dintre parametrii măsurati și cei obținuți numeric fiind în general de ordinul 15–20%, corelări mai bune fiind raportate în [6], [40], [41], [42]. O alternativă pentru generarea turbulenței este utilizarea unei tije plasate în amonte profilului, care produce vârtejuri cvasi-periodice descrise de teoria lui von Kármán [43]–[45], conducând la forțe aerodinamice nestaționare și la emisii acustice cu o componentă tonală dominantă suprapusă peste zgomotul de bandă largă [44].

Pentru corelarea efectelor acustice cu implicațiile aerodinamice, Leon et al. [22] utilizează aranjamente circulare de microfoane integrate în experimente de tunel aerodinamic. Cu toate acestea, Tong [34] subliniază că mecanismele de reducere a zgomotului prin serații, în special la bordul de atac, nu sunt încă pe deplin înțelese, majoritatea rezultatelor bazându-se pe experimentări în condiții de turbulență omogenă și izotropică, cu dificultăți semnificative în măsurarea câmpului de curgere puternic nestaționar.

Așa cum a mai fost menționat anterior, turbulența asociată curgerii este considerată izotropică și poate fi descrisă prin numere de undă asociate direcțiilor de propagare. Relația (6)(6) prezintă o formulare uzuală pentru turbulența ce vine din amonte către bordul de atac serat.

$$w(x', y', t) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{w}(k_1, k_2) e^{i(k_1(x' - Ut) + k_2 y')} dk_1 dk_2 \quad (6)$$

Această formulare a turbulenței poate fi scrisă și sub alte forme, așa cum prezintă Lyu[5] sau Amiet [24], [25], [26], modul de calcul urmărind o descompunere de tip Fourier a rafalei în unde plane simple de tipul (7)

$$w_i = w_{ia} e^{-i(\omega t - k_1 x' - k_2 y')} \quad (7)$$

Calculul se bazează în continuare pe rezolvarea unei ecuații diferențiale de ordinul 2 pentru funcția potențial a vitezei care este o ecuație de propagare a undelor. Rezolvarea ecuației folosind scrierea de la (7)(7) conduce la obținerea unui sistem de ecuații ce are o formulare matriceală de tipul relației (8) unde A și B sunt două matrici diagonale, problema fiind unde de tip sistem de PDE-uri care se rezolvă iterativ.

$$D\Phi = A\Phi + B \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (8)$$

$$\text{unde } \Phi = (... \Phi_{-n'}(x, z), \Phi_{-n'+1}(x, z), ... \Phi_{n'-1}(x, z), \Phi_n(x, z), ...) ^T$$

iar matricile A și B se scriu

$$A_{ml} = (k_{2m}^2 - k^2)\delta_{ml}, B_{ml} = \begin{cases} \frac{4\sigma}{\lambda} \frac{m+l+\frac{k_2\lambda}{\pi}}{l-m}, & m-l = \text{par} \\ 0, & m-l = \text{impar} \end{cases} \quad (9)$$

cu  $\delta_{ml}$  – simbolul Kroneker,  $m$  și  $l$  modurile corespunzătoare indexului liniilor și coloanelor din matrice. Ecuația fundamentală a modelului dezvoltat de Lyu [5] este scrisă în (10)(10), unde presiunea acustică este scrisă pentru planul median al paletelor.

$$S_{pp}(x, \omega) = (2\pi dU) \left( \frac{\rho_0 \omega x_3}{2\pi c_0 s_0^2} \right)^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\Phi_{\omega\omega}(\omega|U, 2m\pi/\lambda)}{|\gamma_d(\omega|U, 2m\pi/\lambda)|^2} \left| \mathcal{L}\left(\omega, \frac{\omega}{U}, \frac{2m\pi}{\lambda}\right) \right|^2 \quad (10)$$

De remarcat în relația (10) faptul că presiunea acustică depinde de spectrul turbulenței incidente (notat aici prin  $\Phi_{\omega\omega}$ ). Există mai multe modele însă cel mai întâlnit este spectrul Von Karman, care în formularea lui Amiet[25] se scrie conform (6). Acest spectru se poate descrie și folosind anumite valori înregistrate experimental (precum intensitatea turbulenței și un parametru pentru lungime [17]). Lyu et al.[5] rezolvă relația (10) pentru condițiile experimentale utilizate de Narayanan [40]. Fiind vorba de o teorie dezvoltată pornind de la relațiile lui Amiet, era de așteptat ca în banda de frecvențe joase să existe diferențe în presiune acustică. Deoarece calculul s-a realizat în plan median, putem spune că este vorba de o analiză mai mult bi-dimensională decât tri-dimensională astfel că, pentru o turbulență izotropică, am putea apela la relația amintită de Polacsek et al.[17] pentru trecerea din planul analizat (2D) la o coordonată localizată oriunde în spațiu (la o rază  $R_{obs}$ ) folosind (11).

$$S_{pp}^{3D}(\omega) = S_{pp}^{2D}(\omega) \cdot \frac{kl_y(\omega)L}{2\pi R_{obs}} \quad (11)$$

unde  $l_y$  este o corelație între lungimea paletelor  $L$  și spectrul von Karman, iar  $k$  este un parametru descris în [17] ca o combinație între numerele de undă, viteza de curgere și unghiul serației.

Modificarea bordului de fugă prin serații este descrisă analitic de Howe [23], care pornește de la expresia presiunii acustice în câmp îndepărtat formulată ca transformata Fourier și o rescrie folosind funcții Green, obținând o relație pentru spectrul acustic în funcție de parametrii serației, exprimată prin ecuația (12). În limita în care amplitudinea serației ( $h$  – semiamplitudinea) tinde către zero, ecuația (12) conduce la spectrul corespunzător unei paletă cu bord de fugă normal. Howe rezolvă ecuația (12) pentru diferite combinații de amplitudini și pași ai serației, la un raport constant între amplitudinea serației și grosimea stratului limită turbulent. Aceleași relații sunt rezolvate și de Al Tlua [14] folosind un cod Matlab, rezultatele obținute fiind identice, autorul realizând totodată o comparație între serațiile triunghiulare și cele sinusoidale aplicate la bordul de fugă.

$$\Psi(\omega) = \left( 1 + \frac{1}{2}\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} \right) f\left(\frac{\omega\delta}{U_c}, \frac{h}{\lambda}, \frac{h}{\delta}; \epsilon\right),$$

$$f\left(\frac{\omega\delta}{U_c}, \frac{h}{\lambda}, \frac{h}{\delta}; \epsilon\right) = \frac{1}{\left\{ \left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 \left[ 1 + \left(\frac{4h}{\lambda}\right)^2 + \epsilon^2 \right] \right\}} \cdot \left( \frac{64 \left(\frac{h}{\lambda}\right)^3 \left(\frac{\delta}{h}\right) \left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 \left\{ \cosh\left\{ \frac{\lambda}{2\delta} \sqrt{\left[\left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 + \epsilon^2}\right]} \right\} - \cos\left(\frac{2\omega h}{U_c}\right) \right\}}{1 + \frac{\left\{ \left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 + \epsilon^2 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 \left[ 1 + \left(\frac{4h}{\lambda}\right)^2 \right] + \epsilon^2 \right\} \sinh\left\{ \frac{\lambda}{2\delta} \sqrt{\left[\left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 + \epsilon^2}\right]} \right\}}{\left\{ \left(\frac{\omega\delta}{U_c}\right)^2 + \epsilon^2 \right\}}} \right) \quad (12)$$

Pentru termenii care nu au fost descriși în acest capitol, legați de relația (12)(12), se pot folosi relațiile suplimentare sugerate de Moreau et al.[38] unde se clarifică toate constantele experimentale precum și relațiile corespunzătoare grosimii statului limită turbulent (relațiile (13)(13)).

$$\delta = 8\delta^*$$

$$\frac{\delta}{c} = \frac{0.37}{Re_c^{1/5}} \quad (13)$$

Al Tlua [14] identifică și el în literatură o relație mai completă (relația (13)) pentru grosimea stratului limită turbulent, similară cu cea de-a doua scrisă în (14)(14).

$$\delta = \frac{0.37c \left[ 1 + \left( \frac{Re_c}{6.9 \cdot 10^7} \right)^2 \right]^{1/10}}{Re_c^{1/5}} \quad (14)$$

Lyu [9] rezolvă aceeași problemă a serațiilor triunghiulare plasate la bordul de fugă și obține o relație similară cu cea de la serațiile triunghiulare plasate la bordul de atac. Semnificația termenilor din relația (15)(15) este aceeași cu cei din (10)(10), relațiile fiind destul de apropiate.

$$S_{pp}(x, \omega) = \left( \frac{\omega x_3 c}{4\pi c_0 s_0^2} \right)^2 2\pi d \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| \mathcal{L}\left(\omega, \frac{\omega}{U}, \frac{2m\pi}{\lambda}\right) \right|^2 \Pi(\omega, 2m\pi/\lambda) \quad (15)$$

Lyu et al.[9] realizează o analiză comparativă între modelul lui Howe (relația (12)) și modelul propriu (relația (15)(15)) identificând o similitudine destul de bună între metode. Din cele două grafice se observă faptul că spectrul obținut cu metoda lui Howe[23] supraestimează reducerea de zgomot. Howe obține la momentul publicării lucrării o reducere de cel puțin  $10 \cdot \log[1 + (4h/\lambda)^2]$  dB, ceea ce ar conduce la valori și de peste 10dB în anumite condiții. De-a lungul anilor, diverși autori au arătat faptul că reducerea există folosind astfel de serații însă este de obicei sub jumătate din valorile date de relația menționată. Al Tlua[14] analizează și el tipurile de serații amintite de Lau [15], acesta reușind să identifice relațiile analitice pentru aproape toate variantele: bord de fugă drept (relația (16)), bord de fugă triunghiular (relația (17)), bord de fugă cu sloturi (relația (18)) și bord de fugă sinusoidal (relația (19)(19)).

$$\Psi_{drept}(\omega) = \frac{\left( \frac{\omega \delta}{U_c} \right)^2}{\left[ \frac{\omega \delta}{U_c} + \varepsilon^2 \right]^2} \quad (16)$$

unde viteza de convecție  $U_c = 0.77U$  și constantele empirice  $C_m = 0.1553$  și  $\varepsilon = 1.33$

$$\Psi_{triunghi}(\omega) = 8 \left( \frac{h}{\delta} \right)^2 \left( \frac{\omega h}{U_c} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\left[ 1 - \cos\left(\frac{2\omega h}{U_c}\right) / \cos(n\pi) \right] \left[ \left( \frac{\omega h}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{2n\pi h}{\lambda} \right)^2 \right]}{\left[ (n\pi)^2 - \left( \frac{2\omega h}{U_c} \right)^2 \right]^2 \left[ \left( \frac{\omega h}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{2n\pi h}{\lambda} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon h}{\delta} \right)^2 \right]^2} \quad (17)$$

$$\Psi_{slot}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Theta \Theta^* \frac{\left[ \left( \frac{\omega h}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{2n\pi \delta}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 \right]}{\left[ \left( \frac{\omega h}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{2n\pi \delta}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 + (\varepsilon^2)^2 \right]^2} \quad (18)$$

$$\text{unde } \Theta(K, \lambda_1, \lambda_2, h) = n^{-1} \left[ \left( e^{\frac{2in\pi\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}} - 1 \right) e^{iK_1 h} + \left( 1 - e^{-\frac{2in\pi\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}} \right) e^{-iK_1 h} \right]$$



$$\Psi_{sin}(\omega) = \left(\frac{\omega h}{U}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2\left(\frac{\omega h}{U}\right) \frac{\left(\frac{\omega \delta}{U}\right)^2 + \left(\frac{2n\pi\delta}{\lambda}\right)^2}{\left[\left(\frac{\omega \delta}{U}\right)^2 + \left(\frac{2n\pi\delta}{\lambda}\right)^2 + \varepsilon^2\right]^2} \quad (19)$$

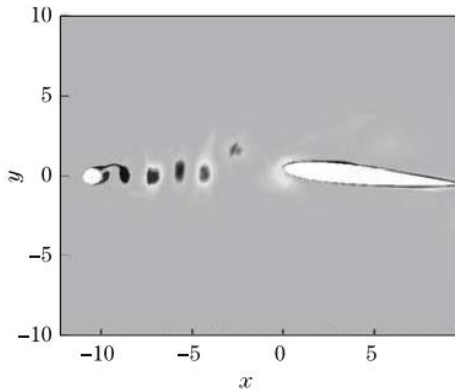
Atât cu relațiile de mai sus pentru spectrele normalizate (de la (16) la (19)(19)) cât și cu (10) și (15) se face o transformare de tipul relației (20)(19)

$$OASPL_{norm} = 10lg\left(\int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \Psi(\omega) d\omega\right) \quad (20)$$

Ryi și Choi [8] urmăresc și ei reducerea zgomotului prin modificarea bordului de fugă însă aplicația lor urmărește profilele rotoarelor de turbine eoliene. Aceștia folosesc o instalație experimentală de tip tunel aerodinamic plasat într-o cameră anecoică pentru a caracteriza o pală de turbină eoliană cu coardă constantă (350mm) și fără torsiune folosind 6 tipuri diferite de serații. Rezultatul acestor experimentări constă în obținerea unei legi empirice pentru nivelul de presiune acustică redus prin aceste metode. Modelul este compus din 6 relații, conduc la funcția pentru estimarea reducerii de zgomot la bordul de fugă (21):

$$SPL_{serBF} = 3.5 - 8[\log(St^*) + 0.3]^2 - \left[\log\left(\frac{\lambda_s}{h}\right) + 0.4\right]^2 \quad (21)$$

Așa cum observă Teruna et al. [43], tijele sunt niște elemente foarte bune pentru generarea componentei tonale, mai ales prin faptul că generează în principal aceeași fluctuație în toată anvergura/lungimea ei (Figura 12).



[44] Vizualizare în plan longitudinal (2D)



[50] Vizualizare structuri turbulente (3D)

Figura 12. Interacțiune tijă-profil aerodinamic

Liu et al. [51] încearcă să caracterizeze comportamentul mai multor grid-uri integrate în instalația lor experimentală folosind o analiză numerică. Gruber [6] utilizează atât metoda experimentală cât și metoda teoretică, folosind ca și referință modelul Von Karman [5] (relația (22)). O abordare similară o are și Chaitanya [21] care experimentează la mai multe viteze ale curentului incident. Această relație a fost identificată și cu alte notații la diverși autori (Biedermann [7], Polacsek [17] sau Hales [52]).

$$\Phi_{ww}(k_1, k_2) = \frac{4\overline{u^2}}{9\pi k_e^2} \frac{\widehat{k}_1^2 + \widehat{k}_2^2}{\left(1 + \widehat{k}_1^2 + \widehat{k}_2^2\right)^{7/3}} \quad (22)$$

$$\text{unde } k_e = \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(5/6)}{L_t\Gamma(1/3)}, \widehat{k}_1 = \frac{k_1}{k_e}, \widehat{k}_2 = \frac{k_2}{k_e}$$

Spectrul turbulenței adimensionalizate, notată de Lyu et al. [33] cu  $\Pi_l(\omega, k_2)$ , poate fi caracterizat folosind și utilizând modelul Liepmann care se scrie conform relației (23). La fel ca spectrul von Karman, formulările sunt asemănătoare, notațiile fiind ușor adaptate de la autor la autor (Amiet [24] [25], Biedermann[7], Chaytania [2]) .

$$\Pi_l(\omega, k_2) = \frac{3TI^2L_t^2}{4\pi} \frac{L_t^2 (k_1^2 + k_2^2)}{(1 + L_t^2 (k_1^2 + k_2^2))^{5/2}} \quad (23)$$

unde  $TI$  și  $L_t$  reprezintă intensitatea turbulenței și scara de lungime integrală („integral length scale”), parametrii care se determină de cele mai multe ori experimental.

### 3.2. Implicații aerodinamice

Tong et al. [34] analizează numeric o paletă de stator cu profil NACA 65(12)-10, evidențiind faptul că serațiile aplicate la bordul de atac se comportă similar unei aripi delta, generând zone de vorticitate laterală care influențează curgerea longitudinală. În prezența unei tijă amplasate în amonte, reducerile de zgomot sunt semnificative, de ordinul 11–16 dB pe o plajă largă a numărului Strouhal, fiind observate totodată modificări importante ale coeficienților RMS, deși valorile medii aerodinamice rămân relativ constante.

Teruna et al. [43] utilizează simulări aeroacustice de tip LBM pentru a evalua palete cu profil simetric și curbat, analizând serații simple, soluții poroase și combinații ale acestora la bordul de atac. Rezultatele arată că soluțiile poroase favorizează curgeri laterale nedorite și conduc la degradarea performanțelor aerodinamice, inclusiv prin comunicarea între intrados și extrados.

Ito [53] demonstrează experimental că serațiile de mică amplitudine aplicate la bordul de atac al unei palete de stator NACA63-414 întârzie detașarea curgerii pe extrados la numere Reynolds mici, fără modificări semnificative ale coeficienților globali, densitățile mai mari de dinți având un comportament aerodinamic mai favorabil. Polacsek [17] validează numeric și experimental efectele serațiilor prin analiza distribuțiilor locale ale coeficientului de presiune, evidențiind comportamente atipice ale câmpului de presiune, în special pe intrados, asociate modificării geometriei bordului de atac.

### 3.3. Configurații de interes indentificate în literatura de specialitate

Pe parcursul lucrării au fost menționate diferite surse în care s-au prezentat o multitudine de variante de palete. Cea mai simplă geometrie este placa plană plasată în curgere pentru care soluția teoretică la obținerea câmpului de presiuni și viteze s-a obținut analitic încă din anii 50. Aceasta a fost validată de mai mulți autori de-a lungul timpului și adaptată atfel încât să poată fi comparată cu modele mai complexe asociate paletelor serate. Dezvoltarea teoretică (din punct de vedere analitic) a paletelor cu bord de atac sau bord de fugă serat a fost realizată pornind de la modelul plăcii plane la care s-a modificat legea de variație a zonelor de interes. Contribuții importante au fost identificate și pe plan experimental astfel că diverși autori au obținut fie legi empirice / semi-empirice care cuplează parametrii turbulenței curentului incident cu parametrii serației astfel încât să se obțină o reducere de zgomot optimă. În lucrarea în extenso sunt rezumate o parte din geometriile relevante, analizate de-a lungul timpului, împreună cu câteva condiții de testare necesare la o analiză comparativă (soluție bidimensională sau tridimensională, turbulența în bandă largă dată de un grilaj sau componenta tonală dată de o tijă plasată în amonte).

## CAPITOLUL 4. CORELAREA PARAMETRILOR CE DEFINESC TURBULENȚA CU SERAȚIILE PREVĂZUTE PE PALETĂ. TESTE PRELIMINARE

### 4.1. Identificarea parametrului de corelare între serații și turbulență

Pentru generarea componentei fluctuante din curgere se poate folosi fie o tijă (pentru o componentă tonală), fie un grid (pentru un zgomot în bandă largă), la varianta 1:1 (în interiorul unei trepte plasate pe motor) proprietățile fluidului incident la paletă fiind cele corespunzătoare avalului rotorului. Astfel, parametrul de referință, așa cum se obișnuiește la soluțiile cu serații, îl reprezintă o funcție care conține ca și variabile energia cinetică turbulentă (TKE) și rata de disipare a energiei (TED). Parametrul ILS se poate determina numeric folosind o funcție definită ulterior în postprocesare, funcție care se scrie conform (24).

$$\Lambda = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (24)$$

unde  $C_{\mu}=0.09$ . Același parametru se mai poate scrie și sub forma (25) pornind de la modelele de turbulență k-l Smith și k- $\omega$  Menter SST [66].

$$\Lambda = \frac{C_{Re}}{C_{\mu}} \frac{k^{1/2}}{\omega} \approx \frac{C_{Re}}{C_{\mu}} l \quad (25)$$

Totodată, se mai poate scrie și relația  $\Lambda = 0.21 L_w$  [66], unde  $L_w$  reprezintă dimensiunea unui vârtej ("Gaussian wake width"). Analiza literaturii de specialitate arată că parametrul  $\Lambda$  variază între 0, în apropierea extremităților paletei, și aproximativ 10 mm în două regiuni distincte asociate vârtejurilor generate la butuc și la vârful paletei de rotor. Este necesară o corelare între  $\Lambda$  și pasul serației  $\lambda$ , majoritatea studiilor experimentale indicând că pasul optim este de aproximativ patru ori mai mare decât  $\Lambda$ . În același timp, amplitudinea serației trebuie limitată, valori mai mari de 10% din coardă neaducând beneficii acustice semnificative și afectând negativ curgerea aerodinamică. Pentru geometria analizată, se urmărește o serație care să respecte incidența paletei de referință și să fie corelată cu caracteristicile turbulenței, menținând în secțiune lungimea corzii profilului inițial. Trecerea de la o paletă cu bord de atac drept la una torsionată, cu pas și amplitudine variabile, este complexă și trebuie să țină cont de liniile de curent pentru a evita penalizări aerodinamice, abordări parametrice în acest sens fiind raportate în [66].

Generarea turbulenței poate fi realizată fie cu tije, care induc predominant componente tonale, utile pentru analiza frecvențelor de interes (de regulă multipli BPF), fie cu grilaje, care conduc la un spectru broadband mai uniform, ambele metode fiind avute în vedere în cercetările ulterioare. În literatura de specialitate sunt raportate numeroase instalații bazate pe tronsoane convergente cu grilaje și, în unele cazuri, cu tije suplimentare [44] [41] [6] [49] [43] [51] [16] [68]. Pornind de la aceste exemple, a fost proiectat un tronson convergent capabil să asigure viteze de peste 50 m/s la ieșire, utilizând sursa de aer a camerei anecoice COMOTI (Măgurele). Dimensiunile secțiunii de evacuare au fost stabilite prin scalare, la 150 mm × 75 mm, iar forma convergentului a fost aleasă astfel încât să evite desprinderile, să permită inserția elementelor de generare a turbulenței și a instrumentației de măsură, să fie realizabilă prin printare 3D și să asigure o rezistență mecanică adecvată.

Identificarea combinației "optime" canal convergent-grid de turbulență pornește de la stabilirea dimensiunilor paletelor ce urmează a fi plasate în curgere. Deoarece tronsonul de curgere are dimensiunile 150mm x 75mm, într-o configurație de tip rețea ar putea fi introduse palete cu lungimea de 75-150 mm (Figura 13), limitarea fiind dată de raportul între coardă și spațierea paletelor- $\sigma$  (care uzual este între 0.8 și 1.2). Pentru un  $\sigma$  de ~1.1, pot fi introduse 5 palete (3 central și 2 care să

formeze canalul de curgere) cu coarda de 50 mm. Ținând cont și de experimentările existente în literatură, unde amplitudinea maximă nu se recomandă a fi mai mare de 20% din coarda, raportul între amplitudine și pas care ar trebui să fie în intervalul [1..2] și raportul între pas și ILS (optim în jurul valorii de 4), ar rezulta că urmărim, la această scară, o valoare pentru  $\Lambda$  de 2.5mm.

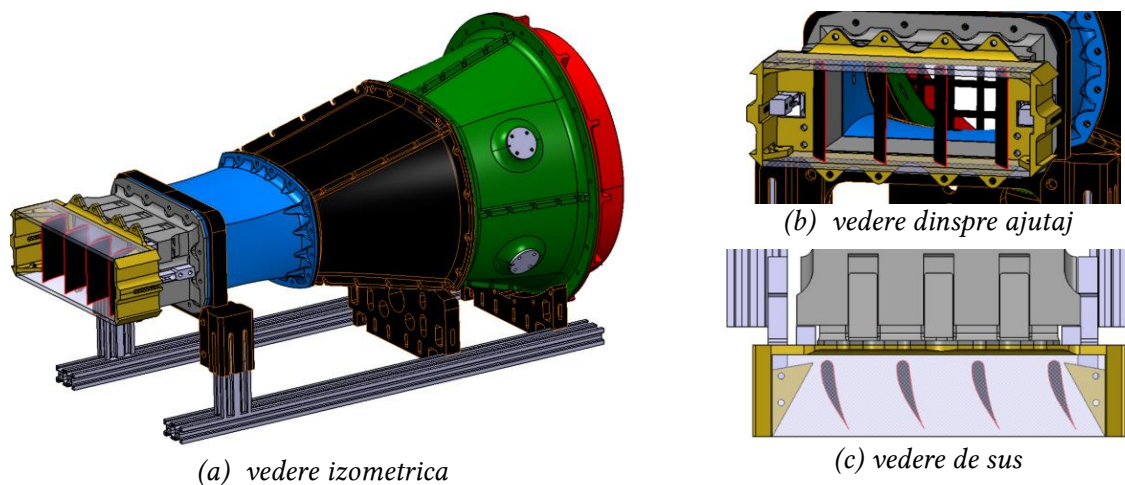


Figura 13. Palete plasate în rețea

Procesul de determinare a dimensiunilor ochiurilor grilajelor este unul iterativ, acesta pornind de la valori identificate în literatură (cel puțin pentru ordinul de mărime). S-au ales totodată 2 zone de plasare a grid-urilor, unul la 75mm de zona de cuplare cu traseul convergent și alta la 200mm de intrare, pentru a evidenția dacă se disipă sau nu fenomenele turbulente pe lungimea totală de ~600mm între intrare și ieșire.

## 4.2. Teste preliminare

Instalația experimentală a fost cuplată la un ventilator centrifugal și plasată în camera anecoică. Tubulatura prin care s-a furnizat aerul este una flexibilă, facilitând astfel îndepărtarea unei surse importante de zgomot (paletele ventilatorului) la o distanță cât mai mare și la un unghi favorabil. Ventilatorul a fost obturat de o ușă culisantă plasată la 10m în exteriorul camerei anecoice iar ușa camerei anecoice a fost închisă atât cât a permis tubulatura de aer. Instalația a fost plasată pe diagonală astfel încât tubulatura de aer să fie cât mai puțin curbată. Două microfoane au fost plasate pe o rază de 1m, primul aproximativ pe direcția de curgere (la ~ 10grade față de axa longitudinală a ajutorajului) iar cel de-al doilea la 90 grade față de axă. Ca și configurații experimentate, s-a realizat o combinație între paletele și grilajele printate pentru demonstrarea capacităților de reducere a zgomotului de astfel de palete (cu serații). În Figura 14 se prezintă variantele de testare la ieșirea din ajutoraj.

Pe lângă înregistrările acustice, s-au făcut măsurători ale vitezei de curgere la ieșirea din rețeaua paletată. Acestea au fost realizate cu un tub Pitot, vitezele fiind apropiate ca valoare, observându-se totuși o ușoară influență a micșorării secțiunii de ieșire prin plasarea paletelor de pe lateral. Măsurătorile au fost realizate între paletele centrale, pe direcția de curgere dictată de plasarea paletelor în rețea la unghiul de 15grade (viteza măsurată este, deci, valoarea maximă obținută pentru acea configurație).

Testele preliminare au fost împărțite în 3 serii. În prima serie s-a dorit evitențierea zgomotului propriu (așa-numitul “self noise” al paletelor), precum și zgomotul generat exclusiv de jet (cu și fără plăcile ce susțin paletele). Spectrele au destul de mult zgomot parazit, cel predominant (la ~786Hz și prima armonică) provenind de la ventilator, propagându-se pe tubulatura de aer. Jetul care iese din ajutoraj produce și el zgomot în jurul frecvenței de 1000 Hz, zgomotul de interacțiune fiind unul în bandă largă (mecanismul de reducere a zgomotului fiind cel mai bine identificat peste 1500Hz). Alte peak-uri ce apar la frecvențe înalte (peste 5kHz, dar nu numai) pot proveni de la ne-etanșeități.

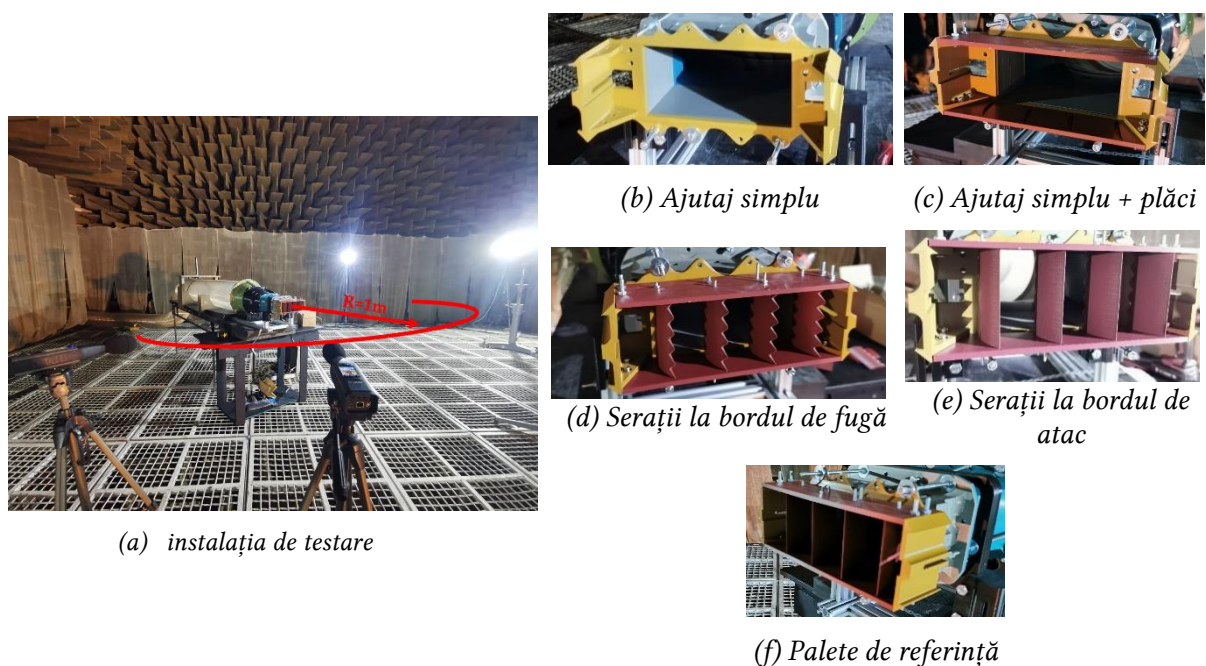


Figura 14. Configurații testate

A doua serie de testări s-a bazat pe plasarea unui grid (cu ochiuri de 20mm și grosime 4.5mm) în fața sectorului paletat (~300mm). Pe lângă zgomotul jetului, s-a observat o reducere a nivelului global de presiune acustică cu aprox 1.5dB pentru paletetele cu serații la BA față de paletetele normale (cu BA drept). Pentru paletetele cu serații la BF s-a înregistrat sub 1dB reducere a zgomotului global (Figura 15).

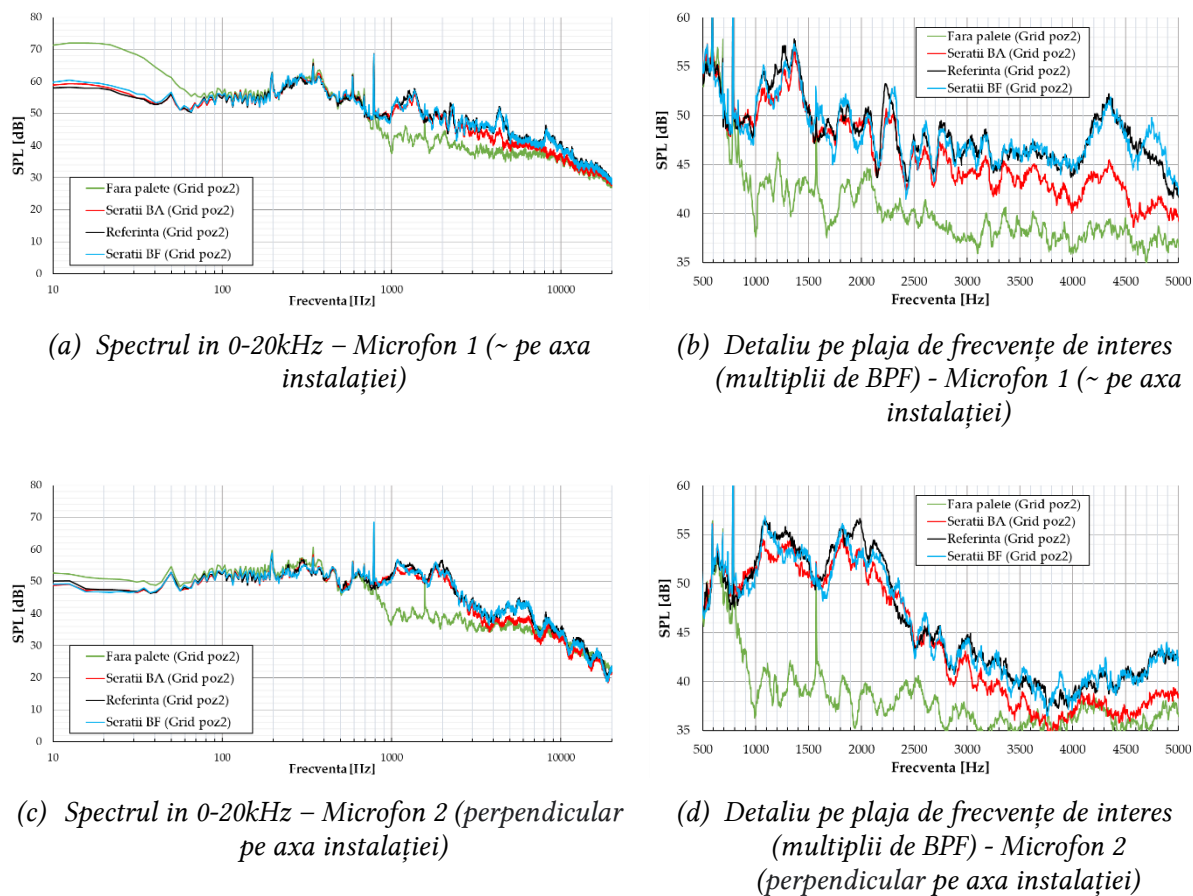


Figura 15. Zgomotul de interacțiune (turbulență grid poziția 2 – rețea de palete)

Plasarea grid-ului pe poziția 1 (la peste 500mm în amonte de palete) nu a condus la generarea unei turbulențe cu intensitate mare astfel că spectrele înregistrate nu sunt apropiate de cele obținute cu sursa de turbulență plasată mai aproape de ieșirea din ajutoraj. Totuși, se observă pentru paletel cu serații la bordul de fugă o scădere a nivelului de presiune acustică pe intervalul 2-5kHz (întegritată de ambele microfoane). Această reducere (chiar și de 15dB pe unele frecvențe) poate fi o particularitate a directivității unor astfel de soluții și trebuie investigată în continuare. Per total, s-a observat că pentru menținerea caracterului fluctuant al curgerii, mecanismul de generare a turbulenței trebuie plasat în apropierea paletei, vârtejurile apărute dispându-se foarte repede în masa de fluid.

## **CAPITOLUL 5. PROCESAREA DATELOR EXPERIMENTALE ȘI COMPARAREA TEORIEI CU EXPERIMENTUL**

### **5.1. Introducere**

Studiul paletelor cu serații și impactul acestora asupra zgomotului reprezintă un subiect de interes încă din anii '50 [69], datorită influenței asupra zgomotului, randamentului turbomașinilor și mediului. Modificările aplicate la bordul de atac sau la bordul de fugă au demonstrat potențial în reducerea zgomotului generat de ventilatoare, turbine și elici [70]–[76], prin intensificarea amestecării fluidului și diminuarea turbulenței, principala sursă a zgomotului de amestec. În plus, serațiile pot îmbunătăți performanțele aerodinamice, conducând la rapoarte portanță–rezistență mai favorabile și la reducerea pierderilor energetice [78], soluții avansate precum zonele permeabile sau metamaterialele prezentând, de asemenea, rezultate promițătoare [79]. Reducerea poluării fonice asociate componentelor aerodinamice este deosebit de importantă în zonele urbane, motiv pentru care aceste soluții sunt relevante pentru dezvoltarea unor tehnologii mai sustenabile [14], [80], [81].

În ceea ce privește comportarea paletelor în configurații izolate versus în rețea, Lewis et al. [82] arată că modelele matematice dezvoltate pot reproduce satisfăcător spectrele măsurate experimental, fiind identificate formule generale atât pentru profile izolate, cât și pentru rețele de palete [78], [82], [83], precum și pentru zgomotul de amestec al jetului [80], [84], [85]. Turbulența, fenomen haotic și dificil de previzionat, joacă un rol esențial în performanța turbomașinilor, influențând pierderile de energie și eficiența globală [69], [70], [82], [85] [86] [87] [88]. Din acest motiv, înțelegerea și modelarea corectă a turbulenței sunt esențiale nu doar în aviație, ci și în domenii precum energia eoliană, meteorologia sau transportul de fluide [89][90] [91].

Modelele matematice de turbulență, deși nu pot rezolva direct ecuațiile Navier–Stokes în regim turbulent, permit descrierea și predicția comportamentului curgerii pentru diferite tipuri de turbulență, precum cea izotropică, bidimensională, a stratului limită sau la viteze mari [78], [79], [81], [82], [84], [85], [92], [93]. În această lucrare se realizează o analiză comparativă a acestor modele și scări de turbulență, cu accent pe acuratețea predicțiilor în raport cu datele experimentale obținute în condiții reale. Reproducerea fizică a turbulenței implică atât simulări numerice, cât și testări experimentale, selecția modelelor fiind realizată în funcție de acuratețea predictivă, capacitatea de generalizare și eficiența computațională [82], [94], [95]. În motoarele de tip turbojet și turbofan, turbulența este un fenomen omniprezent care influențează direct performanța și eficiența sistemelor. Scara turbulenței este determinată prin modele matematice și simulări numerice și poate fi interpretată atât ca indicator al intensității turbulenței, cât și ca lungime caracteristică asociată mișcărilor turbulente, reprezentând distanța parcursă de o particulă de fluid între interacțiuni succesive.

În cadrul studiilor experimentale, caracterizarea turbulenței se realizează prin utilizarea combinată a mai multor instrumente de măsură, precum anemometrele cu fir cald și alte sonde pentru determinarea vitezei și a fluctuațiilor asociate [70] [78] [96] [97], tuburile Pitot pentru evaluarea presiunii și vitezei medii [14], senzorii de presiune pentru măsurarea variațiilor locale în canal și pe suprafețe [97] [61], precum și sisteme optice avansate, cum ar fi PIV sau instalațiile Schlieren, pentru



vizualizarea curgerii [93] [55] [98]. Utilizarea corelată a acestor metode permite determinarea parametrilor turbulenței relevanți, precum fluctuațiile de viteză și presiune ( $u'$ ,  $p'$ ), energia cinetică turbulentă și rata de disipare ( $K$  și  $\epsilon$ ), frecvențele caracteristice ale acestora și scara integrală a structurilor turbulente ( $\Lambda$ ) [82] [88] [99].

$$\begin{aligned}
 TI &= \sqrt{\frac{\overline{u'^2}}{U_0^2}} \\
 \overline{u'^2} &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{uu}(f) df \\
 \Lambda &= \frac{U_0 S_{uu}(f=0)}{2\overline{u'^2}}
 \end{aligned} \tag{26}$$

unde  $TI$  este intensitatea turbulentă și  $S_{uu}$  este spectrul de viteză turbulentă longitudinală. Pentru a genera artificial turbulența într-o instalație experimentală, pot fi utilizate diferite metode, cum ar fi plăcile cu orificii (grile/grid-uri/grilaje circulare) [100] [101] [102], grilele rectangulare [78], [86], [88], paletele rotative sau grilele active [103], barele [50] [104] [45] sau jeturile de aer pulsante [105]. Aceste dispozitive pot fi folosite pentru a perturba curgerea fluidului și a crea turbulență într-un mod controlat. Simulările numerice sunt, de asemenea, utilizate pentru a modela și induce turbulența artificială în configurațiile experimentale. Scările de turbulență descriu transferul de energie și rolul vâscozității între diferite dimensiuni ale mișcărilor turbulente și constituie un cadru teoretic esențial pentru interpretarea fenomenelor aeroacustice. Scara Von Kármán [78] [88] [99] [106] [107] [108] este frecvent utilizată pentru a descrie transferul de energie între structurile turbulente mari și modul în care acestea generează câmpuri de presiune fluctuante, responsabile de emisii acustice tonale și de tip „șuierat” în aplicații precum aripi, elici sau pale de elicopter. Scara Liepmann [78] [99] [107] este asociată interacțiunii dintre turbulență și vâscozitate, fiind relevantă pentru zgomotul de bord de atac, unde variațiile oscilante de presiune pot fi modelate ca surse acustice de tip dipol. Scara Taylor [109] [110] reprezintă o scară intermediară, la care transferul de energie cinetică este influențat semnificativ de vâscozitate, fiind asociată dispersiei structurilor turbulente în zona bordului de atac și contribuind la zgomotul de bandă largă caracteristic curgerilor rapide. Scara Obukhov–Corrsin [111] [112] extinde analiza prin includerea efectelor termice, fiind relevantă pentru curgeri cu gradient de temperatură, unde fluctuațiile de densitate pot genera emisii acustice de tip „rumble”, în special în zona bordului de fugă. La cele mai mici dimensiuni, scara Kolmogorov [109] descrie disiparea energiei la nivel molecular, fiind asociată cu zgomotul continuu de intensitate redusă care apare în regimuri apropiate de stall. Pe lângă aceste scări fundamentale, literatura menționează și alte modele relevante, precum Batchelor [112], Ozmidov [111], Monin–Obukhov [113], Corrsin [114], Kraichnan [107], Kaimal și Davenport [115], utilizate în special pentru aplicații cu scări mari sau în condiții atmosferice complexe.

În modelul Von Karman, lungimea caracteristică a scării de turbulență se referă la dimensiunea tipică a structurilor turbulente dintr-un mediu fluid, cum ar fi vârtejurile. Energia turbulenței în spectrul Von Karman este de obicei exprimată ca densitate spectrală [106], cu unități de energie pe unitate de frecvență sau număr de undă. Aceste unități pot varia în funcție de contextul analizei spectrale a turbulenței. Spectrele de turbulență pot fi calculate folosind funcții specializate pentru analiza semnalelor spectrale, pentru a vizualiza distribuția energiei turbulente în funcție de frecvență sau număr de undă, aplicând formula de interpolare Von Karman și următoarea ecuație care poate fi utilizată [108]:



$$E(k) = \frac{55}{9\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{5}{6}\right) \overline{u'^2}}{\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) k_e} \frac{\left(\frac{k}{k_e}\right)^4}{\left[1 + \left(\frac{k}{k_e}\right)^2\right]^{\frac{17}{6}}} \quad (27)$$

unde  $k$  este mărimea vectorului ce conține numerele de undă,  $\Gamma(\cdot)$  este funcția Gamma și  $k_e = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{5}{6}\right)}{\Lambda_f \Gamma\left(\frac{1}{3}\right)}$  este scara celor mai mari vârtejuri. Spectrul de turbulență longitudinal unidimensional von Kármán, obținut prin integrarea spectrului de energie, este dat de:

$$\Phi_{uu}(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(k)}{4\pi k^2} \left(1 - \frac{k_x^2}{k^2}\right) dk_z dk_y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{5}{6}\right) \overline{u'^2}}{\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) k_e} \left[1 + \left(\frac{k_x}{k_e}\right)^2\right]^{-\frac{5}{6}} \quad (28)$$

## 5.2. Metodologie de analiză numerică și experimentală

Instalația experimentală a fost cuplată la un ventilator centrifugal de 9800 Pa și 7,5 kW și amplasată într-o cameră anecoică proiectată conform ISO 3745 [55], cu un coeficient de absorbție de 99% în banda 150 Hz–20 kHz. Sursa de aer a fost poziționată în afara camerei și conectată printr-un furtun flexibil, iar secțiunea de test a fost amplasată diagonal pentru a minimiza curbura tubulaturii. Măsurătorile acustice au fost realizate cu două sonometre de clasă 1, amplasate la 1 m de sursă, unul aproape axial și unul la 90°, semnalele brute fiind achiziționate la 50 kS/s. Configurații experimentale similare, dar mai complexe, pentru palete în rețea sunt raportate în [88] [58], iar corecțiile de propagare și efectele de reflexie sunt discutate în [117] și [118].

Testele au inclus combinații de palete serate și grile printate 3D, paletel fiind prevăzute cu serații triunghiulare rotunjite de amplitudine egală cu 20% din coardă. Grilele de turbulență au fost amplasate în două poziții distincte în zona convergentă, pentru controlul caracteristicilor curgerii. Corelarea rezultatelor experimentale cu modelele teoretice a necesitat determinarea vitezei curgerii, realizată cu un tub Pitot de tip L, măsurătorile fiind efectuate ținând cont de configurația în rețea și unghiul de instalare al paletelor. Valorile măsurate pe lungimea paletel au fost mediate pentru fiecare dintre cele cinci cazuri analizate.

## 5.3. Rezultate

Testele preliminare au fost structurate în trei serii, prima fiind dedicată identificării zgomotului propriu al paletelor (self-noise) și a zgomotului generat exclusiv de jet, cu și fără plăcile de susținere. Spectrele obținute indică prezența unui zgomot nedorit semnificativ, dominat de o componentă tonală în jurul frecvenței de 786 Hz și prima armonică, asociată rotorului și propagată prin conducta de aer. Jetul contribuie suplimentar cu zgomot în jurul valorii de 1000 Hz, iar zgomotul de interacțiune are un caracter broadband, mecanismul de reducere fiind mai evident la frecvențe peste 1500 Hz, în timp ce vârfurile de frecvență ridicată pot fi asociate etanșărilor imperfecte.

A doua serie de teste a inclus plasarea unei grile de turbulență în amonte paletelor, ceea ce a condus la o reducere a nivelului global al presiunii acustice de aproximativ 1,5 dB pentru paletel cu bord de atac seriat, comparativ cu cele cu bord drept, în timp ce pentru serațiile la bordul de fugă reducerea a fost sub 1 dB, rezultatele fiind ilustrate în Figura 16. O evaluare cantitativă detaliată a eficienței celor două tratamente ar putea fi realizată utilizând relații de tip logaritmic bazate pe niveluri de putere acustică și numărul Strouhal, precum cele propuse în [88] și [70].

Pentru o interpretare corectă, spectrele acustice au fost transformate din RMS în PSD, ținând cont de fereastra Hanning, rezoluția spectrală ( $\Delta f$ ) și pătratul presiunii RMS. În acord cu observațiile din literatură, spectrul Von Kármán prezintă limitări în domeniul frecvențelor înalte, unde tranziția de la panta de  $-5/3$  la o scădere exponențială nu este corect surprinsă [88]. Această deficiență poate fi corectată prin aplicarea corecției propuse de Pope [108], care ajustează gama de disipare prin modificarea spectrului de energie.

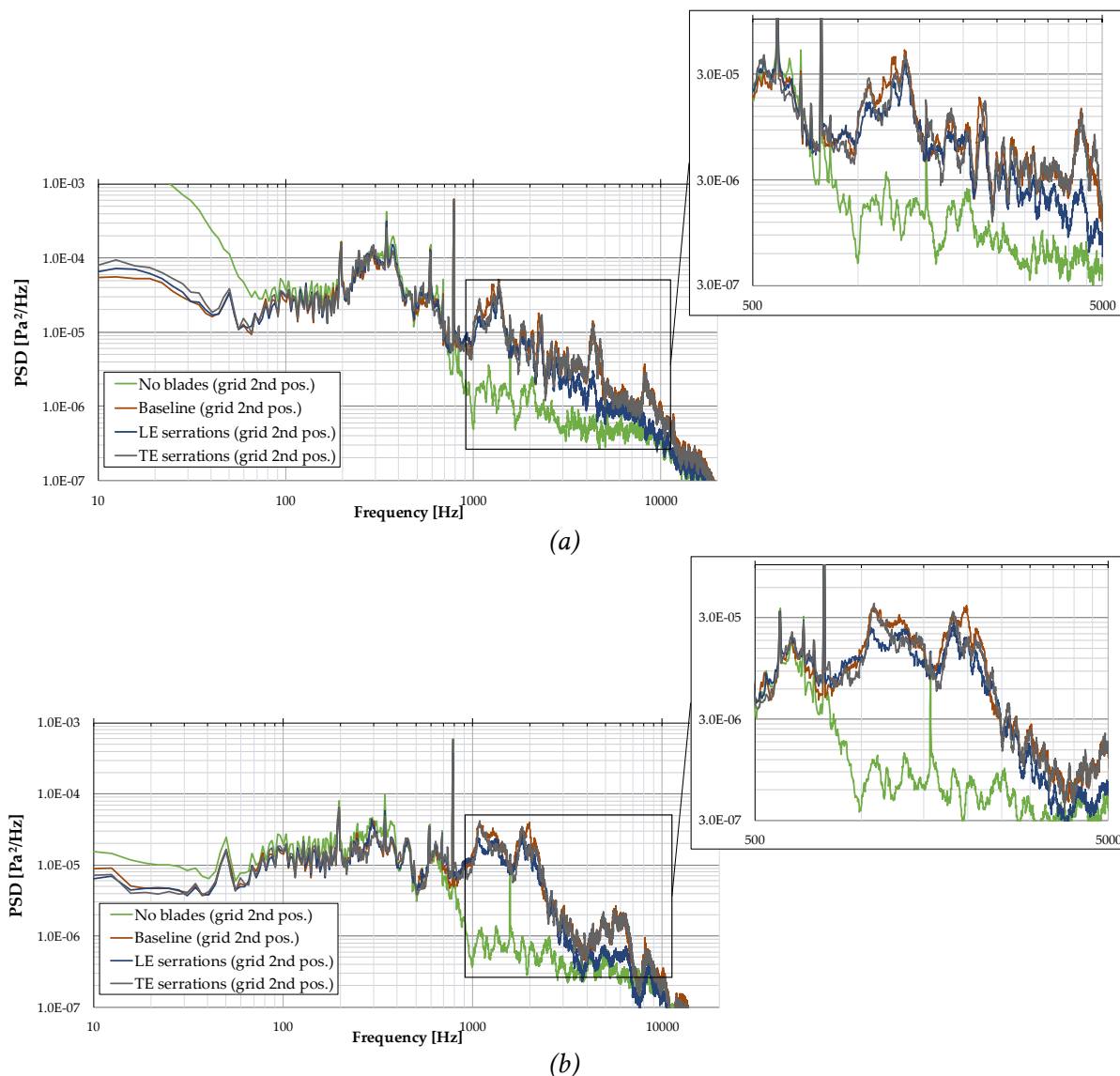
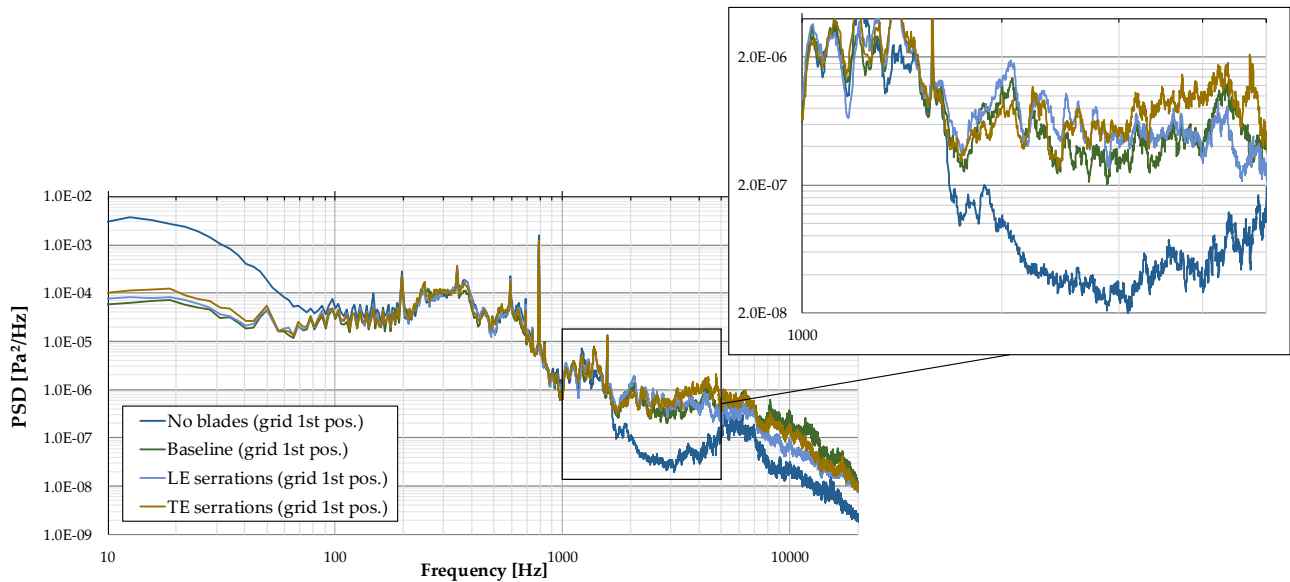
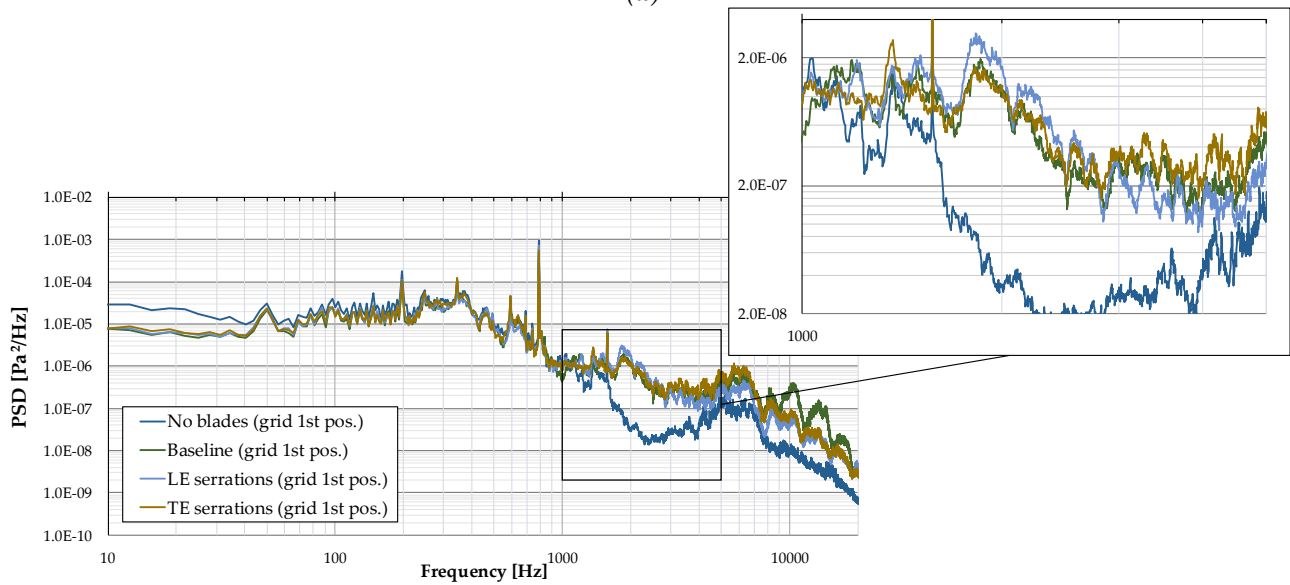


Figura 16. Zgomot de interacțiune: (a) spectru 0-20kHz + detaliu (multiplii de BPF) - Microfon 1 (10 grade față de direcția axială); (b) spectru 0-20kHz + detaliu (multiplii de BPF) - Microfon 2 ( $\perp$  pe direcția axială).

Plasarea grilei în prima poziție (la mai mult de 500 mm în amonte de palete) nu a condus la producerea unei turbulențe de intensitate mare, astfel încât spectrele înregistrate în Figura 16 nu sunt apropiate de cele obținute cu sursa de turbulență plasată mai aproape de ieșire. Totuși, se observă o scădere a nivelului presiunii sonore în intervalul 2-5 kHz (înregistrată de ambele microfoane) pentru paletelor cu serrații la bordul de fugă. Această reducere (chiar și de 15 dB pe unele frecvențe) poate fi o particularitate a directivității unor astfel de soluții și ar trebui investigată în continuare. În general, s-a observat că, pentru a menține caracterul fluctuant al curgerii, mecanismul generator de turbulență ar trebui plasat aproape de paletă, vârtejurile formate disipându-se foarte rapid în masa de fluid.



(a)



(b)

Figura 17. Zgomot de interacțiune: (a) spectru 0-20kHz + detaliu (multiplii de BPF) - Microfon 1 (10 grade față de direcția axială); (b) spectru 0-20kHz + detaliu (multiplii de BPF) - Microfon 2 ( $\perp$  pe direcția axială).

Prezentarea OASPL (Nivelul global al presiunii sonore) este preferată, deoarece oferă o măsură globală a intensității sunetului în dB. În contrast, PSD (densitatea spectrală a puterii) examinează doar distribuția puterii pe frecvențe, fără a ține cont de efectul acustic cumulativ. O reprezentare comparativă a nivelurilor globale ale presiunii acustice, derivată din spectrele corespunzătoare, este prezentată în Figura 18. Componentele tonale, inclusiv primul ton la 780 Hz (Figura 17), au fost filtrate.

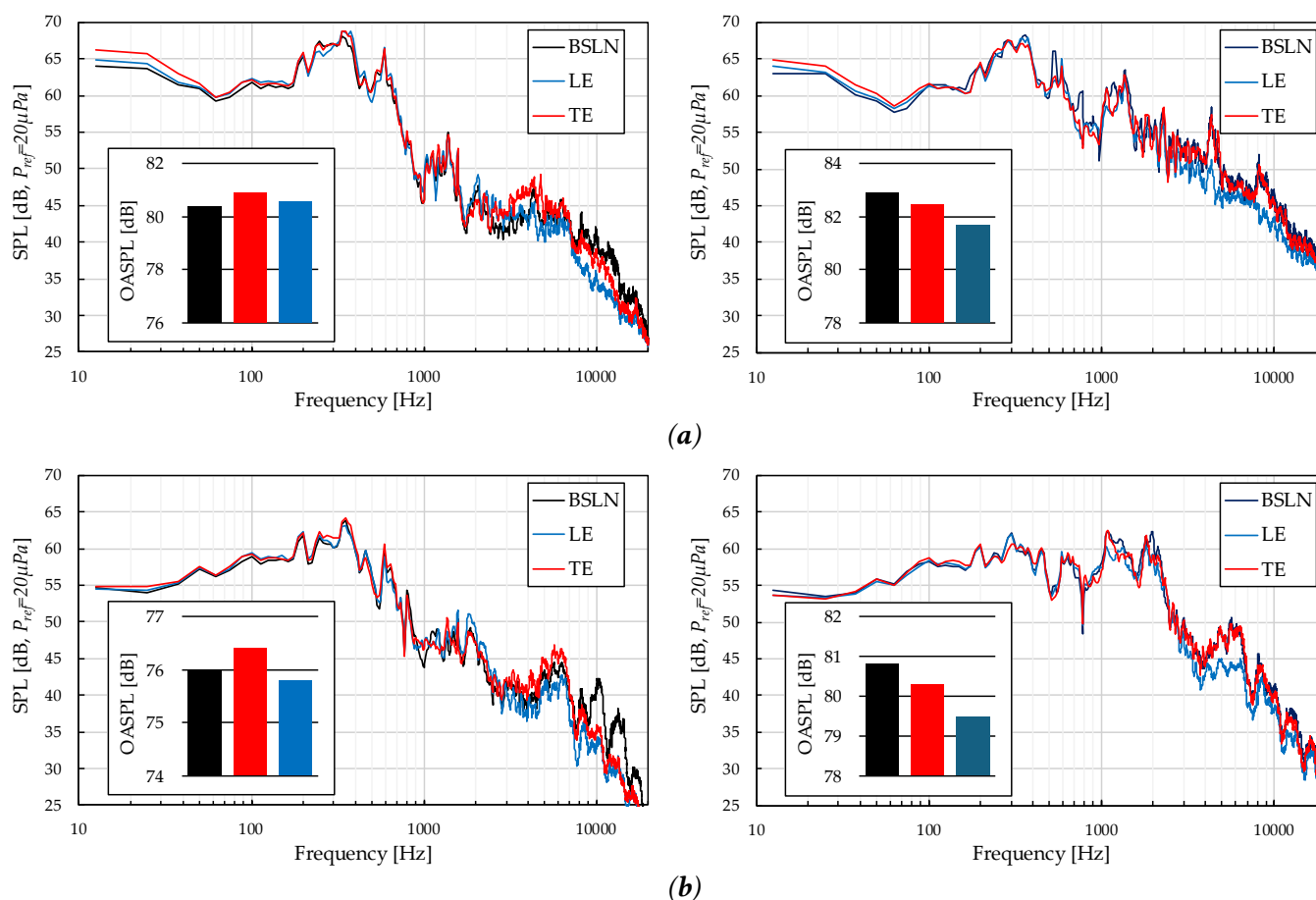


Figura 18. Spectrul nivelului de presiune acustică (stânga- grid la prima poziție; dreapta- grid la a 2-a poziție): (a) 10 grade relativ la axa instalației; (b)  $\perp$  pe axa instalației.

Se poate observa că plasarea grilei în prima poziție alterează valorile globale (acest lucru a fost evident și numeric în spectrele de putere, unde interacțiunea nu a fost bine reprezentată). În contrast, s-a observat o reducere de aproximativ 1.5 dB (OASPL) pentru zgomotul de interacțiune grilă-bord de atac în ambele direcții de măsurare. Zgomotul de la bordul de fugă a fost mai puțin atenuat; totuși, astfel de seratii au avut un impact similar pe întregul interval de frecvențe. Intervalul operațional optim pentru seratiile plasate la bordul de atac, în combinațiile testate, pare a fi în intervalul de frecvență mediu (2000-5000 Hz). Diferența în nivelurile globale observate în Figura 18 poate fi o caracteristică a directivității, care va fi abordată în continuare în viitor prin utilizarea unor aranjamente de microfoane.

## CAPITOLUL 6. ANALIZA EXPERIMENTALĂ A ZGOMOTULUI DE INTERACȚIUNE JET TURBULENT-PALETE CU SERAȚII LA BORDUL DE ATAC ÎN CONFIGURAȚIE DE REȚEA CU 4 PALETE

### 6.1. Descrierea configurației de testare

În aplicațiile aeronautice, rețelele de palete sunt caracteristice ventilatoarelor și compresoarelor motoarelor turboreactoare, unde interacțiunea dintre turbulența incidentă și bordul de atac, precum și desprinderile din zona bordului de fugă, generează zgomot tonal și broadband [6] [44] [41] [49] [43] [119] [16] [68]. Nivelurile de presiune acustică pot atinge valori ridicate în proximitatea sursei și contribuie semnificativ la zgomotul perceput în fazele apropiate decolării. Reglementările internaționale impun reduceri cumulative de ordinul 10–15 dB față de nivelurile de

referință din anii 2000 pentru certificarea noilor configurații de aeronave, conform standardelor ICAO [120] [121] [122] [123]. Reducerea zgomotului în rețelele de palete poate fi realizată prin soluții active, eficiente dar complexe, sau prin soluții pasive, precum tratamente acustice integrate, profilări ale bordului de atac și/sau de fugă de tip serații, sau geometrii inspirate din natură, care oferă avantaje de scalabilitate fără penalități majore de masă sau performanță [6] [7] [43] [55] [124] [125] [126] [127] [142]. În acest context, testele acustice în rețea sunt esențiale pentru evaluarea distribuției spațiale și spectrale a câmpului acustic și pentru validarea soluțiilor pasive, prin utilizarea aranjamentelor de microfoane și a tehnicilor de beamforming. Astfel pot fi identificate modificări ale lobilor acustici și reduceri ale nivelului SPL de ordinul 2–6 dB în domeniul frecvențelor medii și înalte, sau chiar mai mari pentru componentele tonale [55] [60] [62] [66].

Instalația experimentală utilizată este aceeași ca în studiile anterioare, fiind prezentată în Figura 19, și include o sursă de aer cu secțiune convergentă amplasată într-o cameră anecoică. În testele actuale, pe traseul de curgere a fost introdus un grid pentru generarea unei turbulențe controlate, cu parametri globali bine definiți [128]. Au fost proiectate și fabricate mai multe variante de palete, cu coardă medie de 50 mm și lungime de 75 mm, având o variație a corzii de  $\pm 10\%$ , generând o geometrie sinusoidală a bordului de atac, definită prin „diniți”, cu pasul determinat de numărul acestora. Câmpul acustic a fost măsurat utilizând un array de 13 microfoane dispuse pe un sector de cerc de  $180^\circ$ , cu posibilitatea rotirii planului de măsurare, metodă similară celor utilizate în centrele moderne de cercetare [130] [131] [132].



Figura 19. Schema instalatiei experimentale de testare a sectoarelor paletate

Paletetele ce au fost testate au fost montate în zona de ieșire a ajutorului între 2 plăci care setau unghiul de instalare în rețea (Figura 20). S-au folosit 4 perechi de plăci care setau o incidență de 0, 5, 10, respectiv 15 grade. Pentru înregistrări preliminare testelor propriu-zise, spectrul acustic al grid-ului de turbulență a fost surprins prin folosirea unui microfon profilat aerodinamic, respectiv un microfon de suprafață (Figura 21).

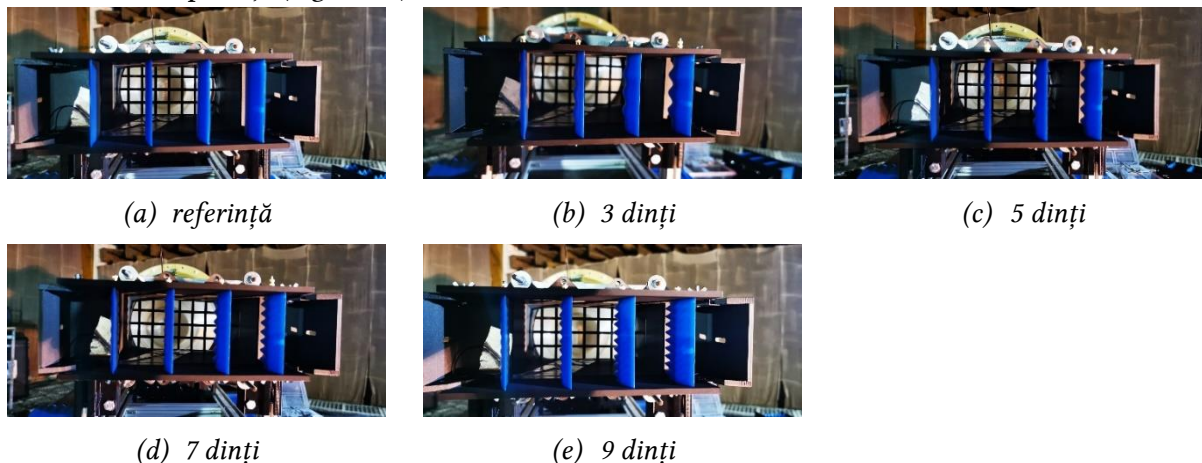


Figura 20. Instalarea paletelor in rețea





Figura 21. Plasarea microfoanelor pentru identificarea parametrilor turbulenței (stanga- microfon profilat aerodinamic, dreapta- microfon de suprafață)

Caracterizarea parametrilor turbulenței a fost realizată printr-o abordare indirectă, bazată pe măsurători acustice efectuate în avalul unui grid de generare a turbulenței, care permit extragerea informațiilor privind conținutul spectral al presiunii acustice asociate interacțiunii locale dintre curgerea turbulentă și pereții canalului. Experimentele s-au desfășurat într-un canal de test cu secțiune constantă, la o viteză medie a curentului de 50 m/s, gridul fiind utilizat pentru generarea structurilor turbulente coerente.

În avalul gridului au fost utilizate două tipuri de microfoane: un microfon de suprafață, montat în peretele canalului, pentru măsurarea presiunii la interfața fluid–solid, și un microfon profilat aerodinamic, introdus în curent, pentru captarea directă a zgomotului generat de vortexuri. Semnalele au fost achiziționate la 50 kHz și prelucrate prin transformata Fourier, în vederea determinării spectrelor de presiune acustică și a densității spectrale a puterii.

Pentru estimarea parametrilor turbulenței a fost adoptată o abordare semi-empirică, fundamentată pe modele clasice din literatura de aeroacustică a curgerilor. Relațiile analitice și dezvoltările matematice corespunzătoare sunt prezentate detaliat în lucrarea *in extenso*, în timp ce aici este descrisă metodologia aplicată și interpretarea fizică a rezultatelor.

Metoda pornește de la observația că presiunea acustică radiată de structuri turbulente convective reflectă direct intensitatea fluctuațiilor de viteză și dimensiunea structurilor coerente din curgere. Din punct de vedere spectral, acest comportament se manifestă printr-o creștere a energiei la frecvențe joase, urmată de o decădere la frecvențe înalte, controlată de o frecvență caracteristică asociată scării integrale a turbulenței, în concordanță cu modelele clasice ale surselor acustice de tip dipol.

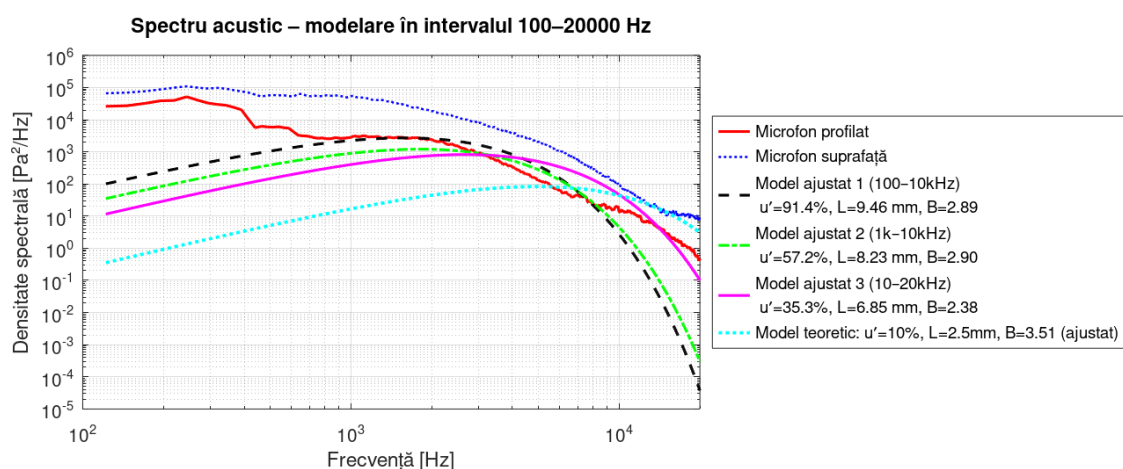
Modelul teoretic a fost ajustat pe baza spectrelor obținute experimental din semnalul microfonului de suprafață, printr-o procedură de potrivire a curbei care minimizează diferența dintre spectrul măsurat și cel estimat într-un interval spectral relevant. În urma acestui proces, au fost determinați parametrii globali care caracterizează intensitatea relativă a turbulenței și dimensiunea structurilor coerente.

Conținutul spectral al semnalelor acustice a fost analizat prin estimarea densității spectrale a puterii, utilizând o metodă standard de segmentare și mediere spectrală. Analiza a fost aplicată atât semnalului de presiune măsurat la perete, cât și celui înregistrat direct în curent, permițând evidențierea diferențelor induse de poziționarea relativă față de structurile turbulente. Utilizarea densității spectrale de putere în unități fizice permite o interpretare energetică directă și o corelare coerentă cu modelele teoretice ale curgerii turbulente.

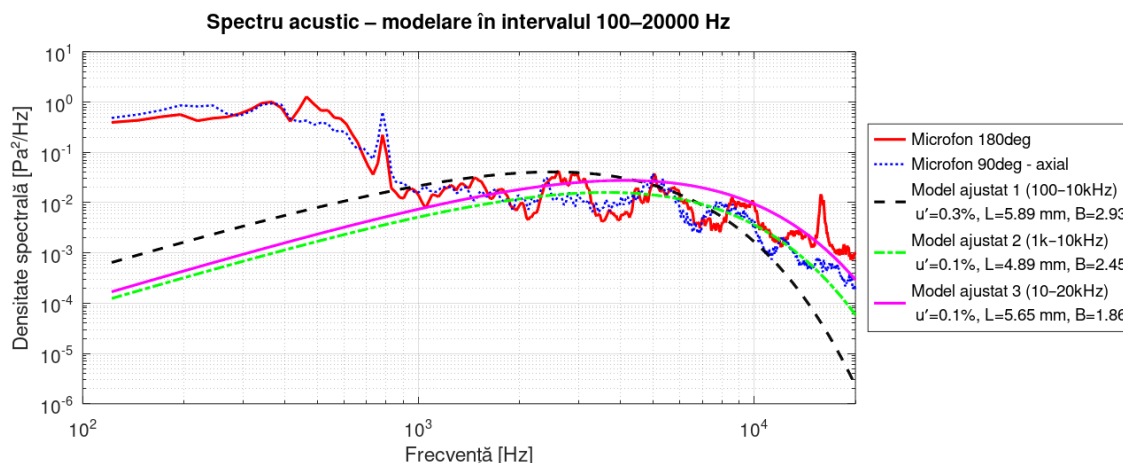
Pe datele brute ale spectrelor înregistrate de cele 2 microfoane s-au aplicat următoarele: fragmentare în ferestre Hann cu 50% suprapunere, aplicarea de FFT pe fiecare fereastră și medierea energiei spectrale, normalizarea rezultatului cu energia ferestrei (în acest sens fiind în lucrare atașate coduri dedicate ce folosesc și structuri similare funcției “pwelch” din matlab), construirea vectorului de frecvență și reprezentarea distribuției de nivel de presiune acustică (SPL). Estimarea parametrilor turbulenței pe baza semnalului acustic măsurat se poate realiza prin analiza funcției de autocorelare a presiunii acustice, metodă frecvent utilizată în studiile de aeroacustică a curgerilor turbulente. Abordarea se bazează pe ipoteza că fluctuațiile de presiune înregistrate în apropierea sursei sunt direct

corelate cu fluctuațiile de viteză din curgerea turbulentă, iar structura temporală a semnalului reflectă organizarea spațială a vârtejurilor. Analiza funcției de autocorelare permite extragerea a doi parametri globali relevanți: lungimea caracteristică a structurilor turbulente și intensitatea relativă a turbulenței. Lungimea caracteristică este asociată cu dimensiunea medie a structurilor coerente și se obține din integrarea funcției de autocorelare pe un interval temporal finit, ales astfel încât să surprindă decorelarea semnalului. Intensitatea turbulentă este estimată indirect, prin corelarea nivelului energetic al semnalului acustic cu această lungime caracteristică, utilizând ipoteze simplificatoare privind propagarea undelor de presiune.

Aplicarea metodei atât asupra semnalului măsurat la perete, cât și asupra celui înregistrat direct în curent, permite compararea parametrilor turbulenței în două poziții distincte din câmpul de curgere. Această comparație oferă informații suplimentare privind evoluția, atenuarea și reorganizarea structurilor turbulente după trecerea prin elementele generatoare de turbulență. Metoda prezintă avantajul unei implementări relativ simple și a unei legături directe cu mărimi fizice măsurabile, fiind adecvată pentru caracterizarea globală a turbulenței în experimentele aeroacustice.



(a) măsurători în canalul de curgere



(b) măsurători în exteriorul ajutajului

Figura 22. Suprapunerea spectrelor înregistrate și corelate (curve fitting)

Prin comparația metodelor utilizate, valorile mai mici ale parametrilor turbulenței sunt mai plauzibile deoarece metodele PSD/autocorelare integrează semnalele de presiune acustică în domeniul energetic și se bazează pe relațiile specifice undelor plane ( $S_{uu} = S_{pp}/(\rho^2 c^2)$ ). Pentru rezultate mai realiste se poate folosi un model ce urmărește conversia spectru acustic- curgere turbulentă (modele avansate ca de ex. Lighthill [28] și Curle [27]) sau din măsurători directe de viteză (LDA [144], PIV [145], hot wire [146] etc.). Din rezultate, intensitatea  $u'/U$  de 73% rezultată din datele de presiune ca și



componentă dinamică sunt eronate deoarece natura semnalului brut este alta (presiune acustică). Din Figura 22 se observă ca toate metodele pe intervalul 100-20kHz plasează lungimea caracteristică în jurul valorii de 5mm, valoare care era de așteptat conform analizelor din rapoartele precedente.

Prin funcția de autocorelare sau PSD, integrarea spectrului  $S_{uu}(f)$  poate fi folosit pentru obținerea energiei cinetice turbulente. Mersul de calcul este următorul: se pornește de la relația (29):

$$k = \frac{1}{2} u'^2 \rightarrow k/U^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{u'}{U} \right)^2 \quad (\text{valoare adimensională}) \quad (29)$$

iar legătura între presiunea acustică și viteză se poate scrie:

$$S_{uu}(f) = \frac{S_{pp}(f)}{\rho_0^2 c_0^2} \rightarrow u'^2 = \int S_{uu}(f) df \rightarrow k = \frac{1}{2} \int \frac{S_{pp}(f)}{\rho_0^2 c_0^2} df \quad (30)$$

deci pentru  $S_{pp}(f)$  cunoscut se poate calcula direct  $k$ . De remarcat faptul că valorile obținute sunt locale, în punctul în care se află microfonul și nu reprezintă energia turbulentă totală din sistem. Această mărime se referă doar la componentele longitudinale (dacă considerăm semnalul ca fiind axat pe o singură direcție). Spectrul  $S_{uu}(f)$  derivat din presiunea brută presupune o propagare de tip undă plană, ceea ce poate fi o aproximație rezonabilă la distanță mare dar discutabilă aproape de sursă.

## 6.2. Rezultate experimentale

Semnalele brute înregistrate de cele 12 microfoane GRAS 40AE prin intermediul sistemului de achiziție de la Dewesoft au fost procesate (FFT) și exportate ulterior sub formă de nivel de presiune acustică. Pentru fiecare poziție în spațiu s-a înregistrat o valoare, s-a reprezentat pe calota sferică din Figura 23 iar datele interpolate au permis crearea unei distribuții mult mai netede (Figura 24). Codul din anexa atasată lucrării în extenso urmează următoarea logică: construirea câmpului de măsurare (cunoscând planurile și spațierea între microfoane), importarea rezultatelor pentru fiecare punct, importarea ajutorului (ca și geometrie simulată dintr-o multitudine de puncte), reprezentarea markerelor fiecărui punct cu o culoare corespunzătoare valorii SPL-ului, alegerea unei singure valori pentru microfoanele fixe (de la 0 și 180grade) și interpolarea rezultatelor pe suprafață (calotă sferică) prin triangulare (varianta „rough”) sau interpolare de tip v4 (specifică Matlab/Octave, superioară lui cspline pentru cazul de față). Acest mers de calcul s-a aplicat tuturor datelor existente (combinații de palete- placi superioare pentru setarea unghiului de instalare), rezultatele fiind explicate mai jos.

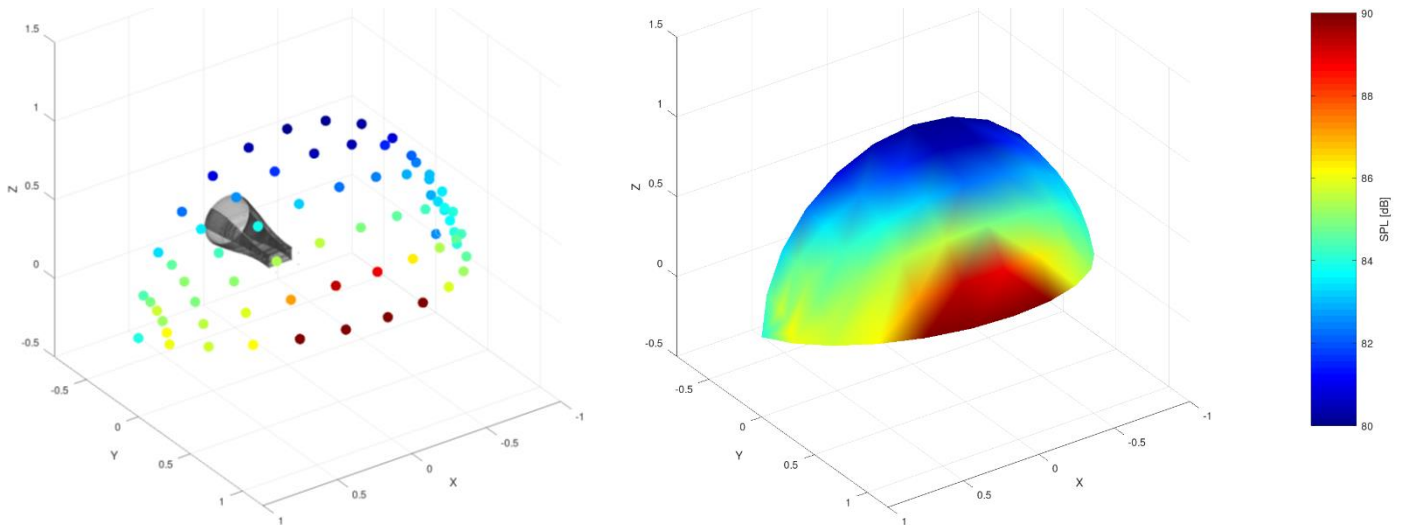


Figura 23. Reprezentarea SPL: în punctele de masurare (stanga) și pe calota sferică (dreapta, interpolare de tip “trisurf”)

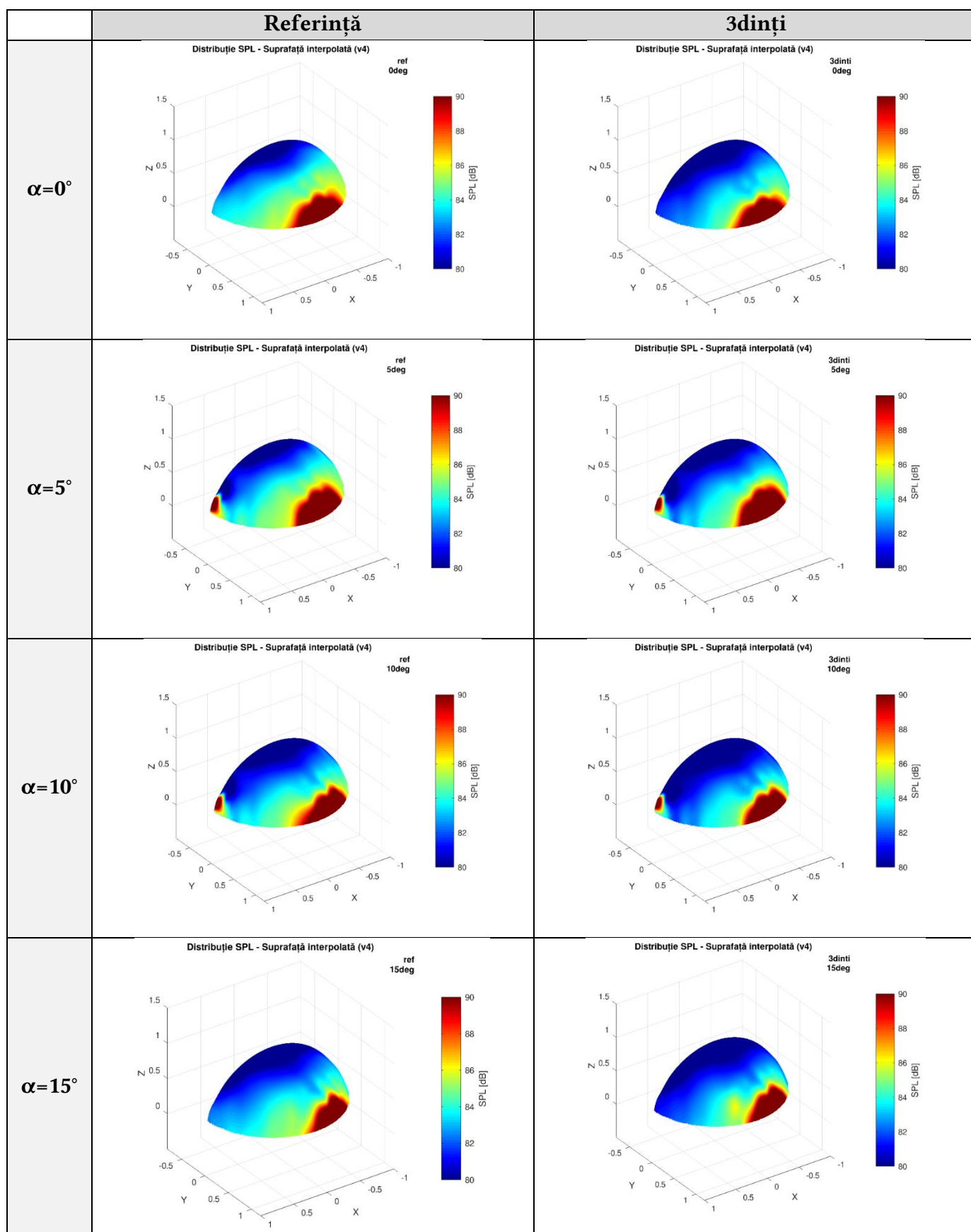


Figura 24. Reprezentarea SPL pe calotă sferică (interpolare de tip “v4”, extras- geometrie “3 dinți”)

În Figura 25 se prezintă pentru toate combinațiile de palete și unghiuri rezultatele (ca diferență de nivel de presiune acustică, în dB(Z, rms). Exceptând planurile de măsurare de la 15 și 30grade, unde jetul tinde să interfereze cu microfoanele din jurul celui de-al 6-lea (poziția 75° și cele din jur), se

observă o reducere globală la toate pozițiile, cu valoare din ce în ce mai mare (în modul) pe măsură de numărul de dinți crește (pasul serațiilor scade). Valori interesante se obțin și la sectoarele cu palete având 5 dinți, comparabile cu cele având pasul minim (9 dinți).

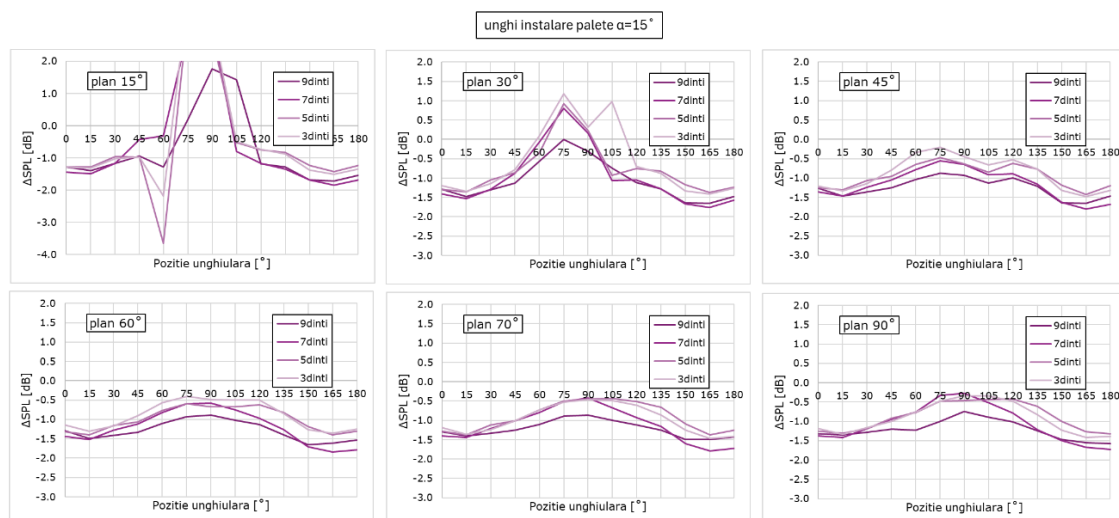


Figura 25. Reprezentarea  $\Delta SPL$  pentru combinațiile testate (extras, alfa 15 grade)

Dacă se mediază toate microfoanele, la toate pozițiile din același plan, se obține Figura 26. Sunt prezentate aici 2 variante de rezultate, atât cu mediere simplă (aritmetică) cât și o mediere logaritmică (care se practică la diferențe de peste 3dB între microfoane [147]).

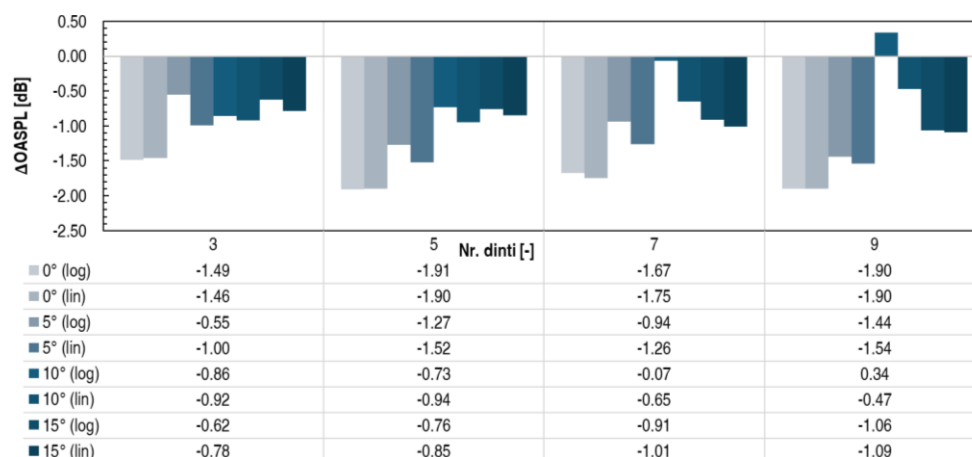


Figura 26. Nivele globale (comparație mediere aritmetică – logarimică)

Beamforming-ul acustic este o tehnică de procesare spațială a semnalelor obținute de la o rețea de microfoane, utilizată pentru localizarea și cuantificarea surselor de zgomot. În cazul studiului zgomotului generat de jeturi turbulente, această metodă permite obținerea unei distribuții spațiale a nivelului de presiune acustică (SPL) într-un plan de observație, oferind informații esențiale despre intensitatea și direcția predominantă a radiației acustice. Beamforming-ul acustic a fost utilizat pentru caracterizarea distribuției spațiale a zgomotului generat de jetul turbulent și de interacțiunea acestuia cu paletelile analizate. Metoda permite identificarea direcțiilor preferențiale de radiație și evaluarea comparativă a efectului geometriei paletelor asupra câmpului acustic, pe baza semnalelor înregistrate cu o rețea de microfoane dispuse pe un semicerc și poziționate în mai multe planuri înclinate.

Analiza s-a concentrat pe un domeniu de frecvențe relevant pentru zgomotul jetului, selectat în funcție de parametrii geometrici și dinamici ai curgerii. Procesarea semnalelor a condus la obținerea unor hărți bidimensionale ale nivelului de presiune acustică, exprimate relativ la maximumul local, care evidențiază modificările spațiale induse de soluțiile pasive aplicate. Deoarece datele au fost achiziționate secvențial, distribuțiile acustice finale au fost obținute prin medierea rezultatelor

individuale, furnizând o estimare robustă a câmpului acustic mediu. Detaliile de calcul și implementarea numerică sunt prezentate în lucrarea în extenso, iar codurile dedicate sunt incluse în anexele aferente.

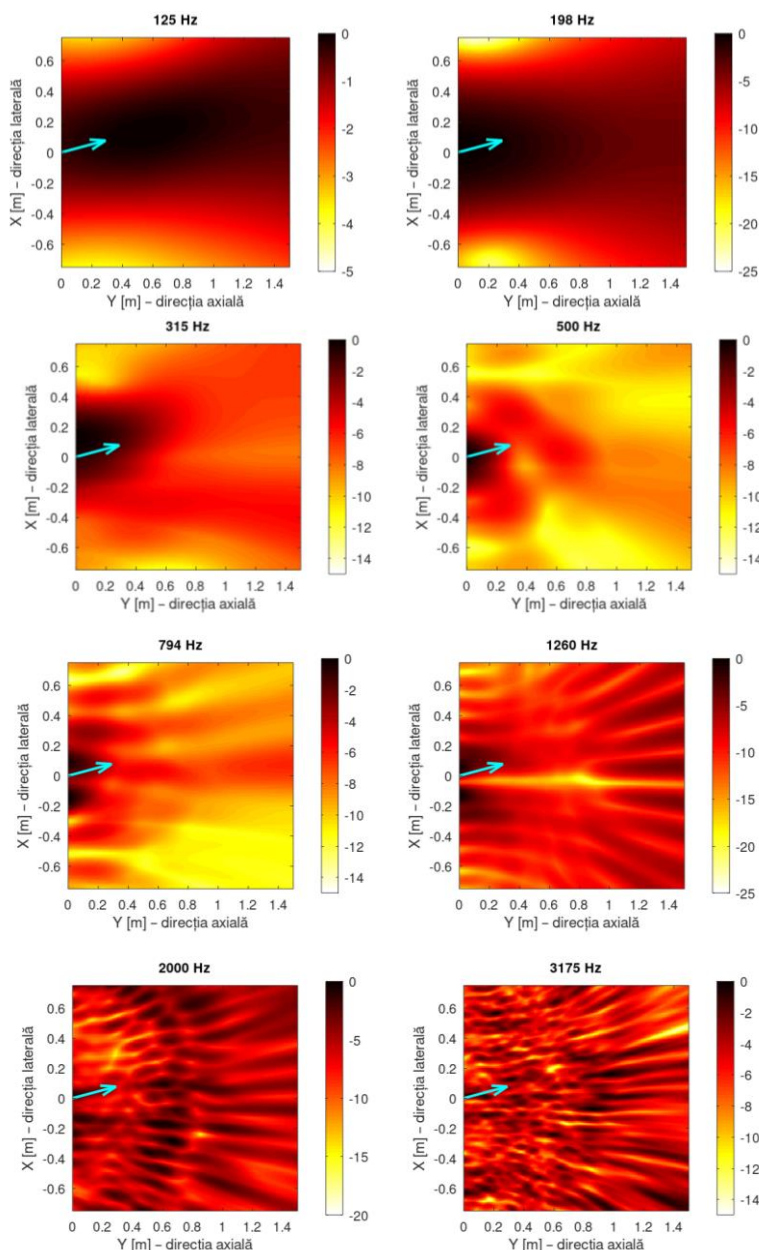


Figura 27. Beamforming paleta referinta (alfa 15 grade)

În absența unei funcții inverse de transfer (obținută prin modelare numerică sau calibrare experimentală), hărțile de beamforming furnizează informații privind distribuția relativă și direcționalitatea energiei acustice, fiind adecvate pentru comparații între configurații și pentru identificarea surselor dominante (Figura 27). Pentru sintetizarea distribuțiilor bidimensionale într-o formă ușor comparabilă, hărțile SPL din planul XY au fost transformate în curbe de directivitate prin agregarea valorilor în funcție de unghiul polar asociat fiecărui punct de observație. Această procedură conduce la o variație a nivelului sonor în funcție de direcție, reprezentată sub formă de curbe polare („butterfly plots”). Reprezentările obținute evidențiază forma, lărgimea și orientarea lobilor acustici, precum și poziția direcțiilor dominante față de axa jetului, permițând identificarea direcției principale de reducere a zgomotului pentru fiecare configurație analizată (Figura 28). Detaliile de calcul și implementarea numerică sunt prezentate în lucrarea în extenso, iar codul dedicat este inclus în anexele corespunzătoare. În Figura 29, reprezentarea 3D adaugă context geometric prin reconstituirea

formelor lobilor direcționali în spațiu, fiecare plan fiind proiectat în direcția sa de înclinare ( $15^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ). Fiecare curbă este scalată relativ și amplasată într-un sistem comun de coordonate, unde este vizibilă și geometria ajutajului. Această metodă permite evaluarea orientării globale a sursei acustice și a eventualelor asimetrii între planuri, completând analiza polară cu o imagine intuitivă a directivității spațiale.

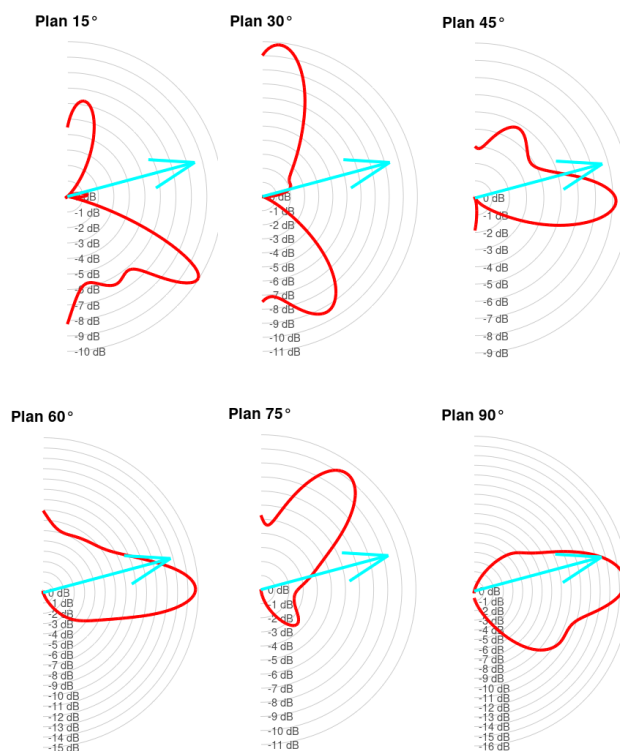


Figura 28. Directivitate paleta referință, 315Hz (alfa 15 grade)

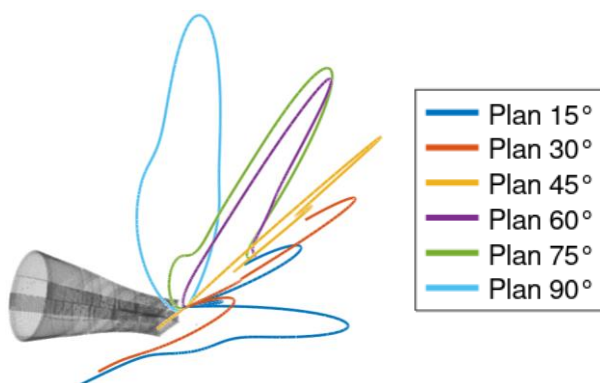


Figura 29. Directivitate pe fiecare plan- suprapunere la ieșirea din ajutaj

### 6.3. Influența serațiilor

Hărțile de beamforming (a se vedea Figura 30; au fost selectate doar reprezentările în intervalul 1–3 kHz, fiind cele mai relevante în contextul influenței semnificative a componentei BPF) oferă o primă indicație asupra modului în care serațiile de pe bordul de atac influențează distribuția spațială a surselor de zgomot. Configurația de referință, cu bord de atac drept (0T), prezintă maxime compacte și bine definite în apropierea paletelor, cu energia concentrată de-a lungul direcției axiale. Introducerea serațiilor modifică progresiv acest tipar: pe măsură ce numărul de dinți crește, sursele par să se distribuie pe o regiune mai extinsă, iar intensitatea maximă scade. Cazurile cu cinci și șapte dinți sunt deosebit de sugestive, evidențiind o reducere a coerenței surselor și o structură mai fragmentată atât



la 2000 Hz, cât și la 3175 Hz, în concordanță cu ipoteza conform căreia sereațiile decorează (schimbă faza) turbulența incidentă și diminuează intensitatea împrăștierii coerente.

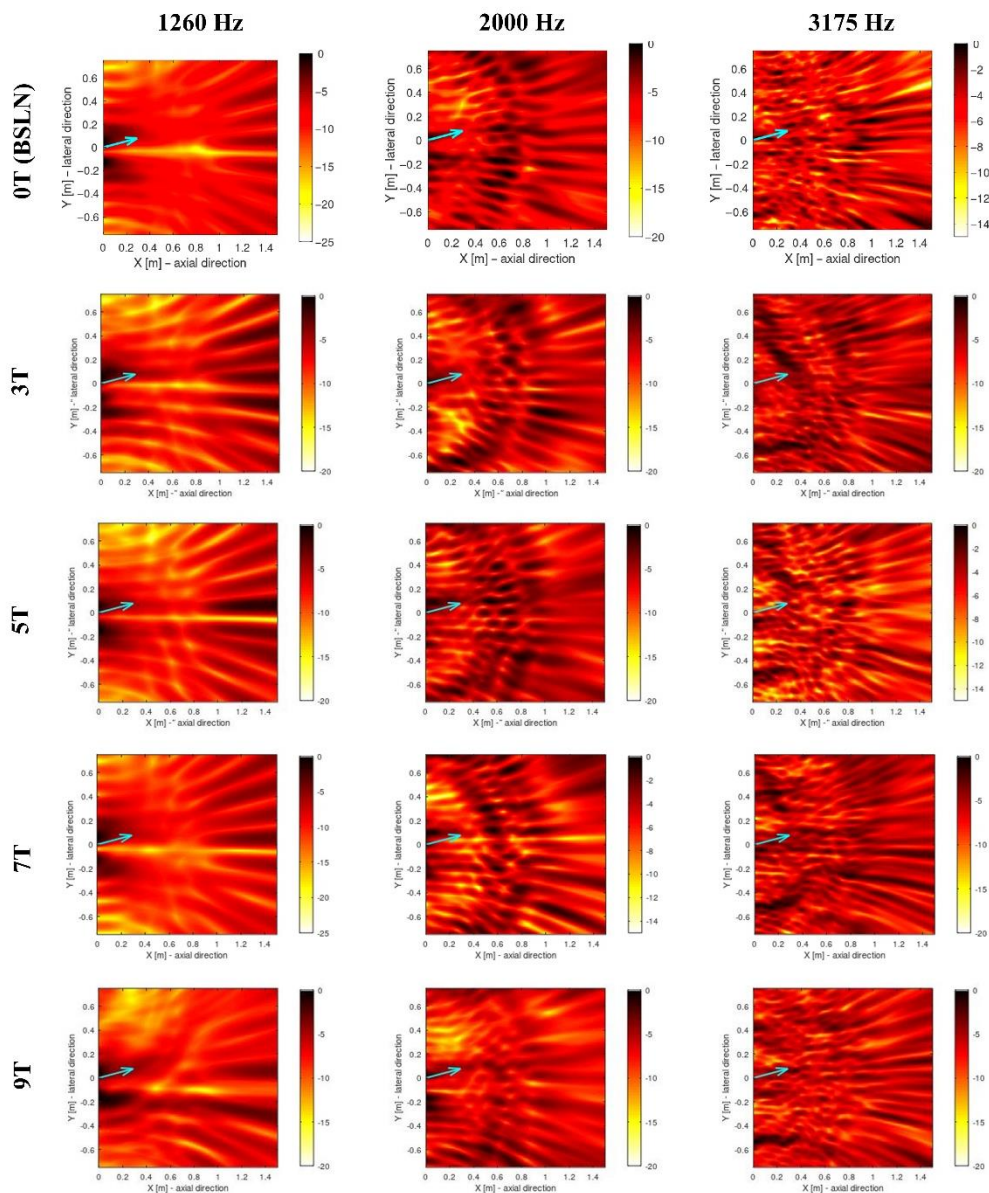


Figura 30. Beamforming (de la BA drept la sereații cu până la 9 dinți)

Diagramele de directivitate polară (a se vedea Figura 31) completează aceste observații, evidențiind modul în care energia radiată este redistribuită în câmpul îndepărtat. La frecvențe medii (aproximativ 1260–2000 Hz), configurațiile cu sereații prezintă, în general, distribuții unghiulare mai netede și reduceri moderate ale lobilor principali, în timp ce la frecvențe mai ridicate (3175 Hz) efectul devine mai pronunțat, manifestându-se prin lobi mai largi și niveluri maxime reduse comparativ cu cazul de referință. Aceste rezultate sunt în acord cu așteptarea că sereațiile acționează în principal prin modificarea coerenței de fază, mecanism care devine mai eficient pe măsură ce lungimea de undă acoustică se apropie de dimensiunea caracteristică a sereațiilor. Combinația dintre analiza prin beamforming și cea de directivitate confirmă astfel atât modificările locale ale surselor, cât și consecințele acestora asupra câmpului acoustic din depărtare.

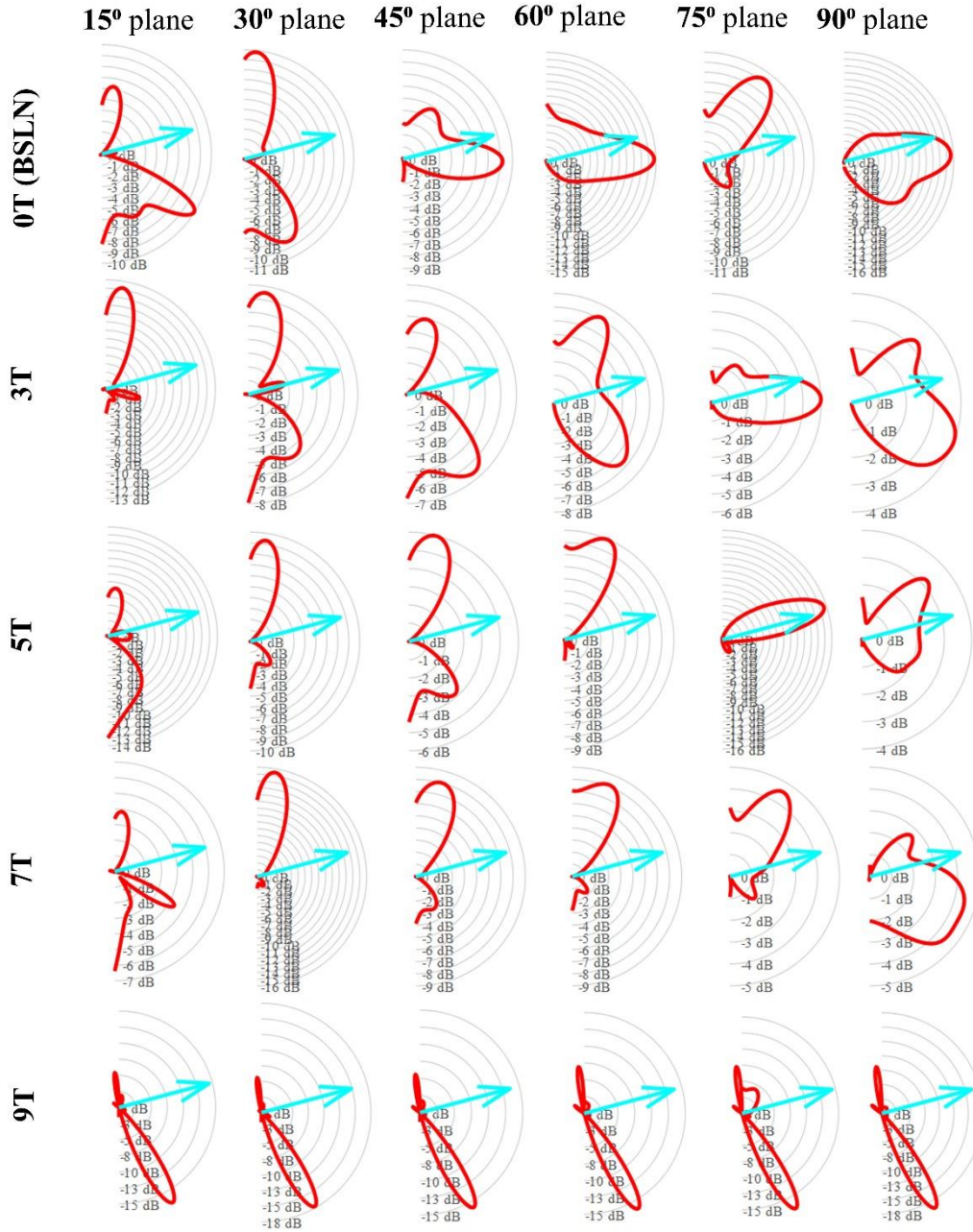


Figura 31. Directivitate (de la BA drept la serații cu până la 9 dinți)

#### 6.4. Estimarea efectului serațiilor asupra energiei acustice radiate

Presiunile acustice au fost măsurate cu 13 microfoane distribuite pe 5 planuri înclinate (30°–90°), configurate pe o calotă sferică. Planul de 15° a fost exclus pentru a evita influențele near-field. Ipotezele de lucru sunt: propagare în mediu nelimitat, izotropie locală, absența reflexiilor și sursă acustică punctuală echivalentă în centrul aranjamentului.

Puterea totală radiată prin calotă s-a estimat pe baza intensității acustice punctuale:

$$I_i = \frac{p_{rms,i}^2}{\rho c} \rightarrow P_{calotă} = \sum_{i=1}^N I_i \cdot d\Omega_{eff} \cdot r^2 \quad (31)$$

unde  $d\Omega_{eff}$  este unghiul solid efectiv asociat fiecărui microfon. Această putere a fost utilizată ca valoare inițială pentru a estima distribuția în câmpul îndepărtat, sub ipoteza unui câmp sferic:



$$I(r) = \frac{P_{calotă}}{4\pi r^2} \rightarrow SPL(r) = 20 \log_{10} \left( \frac{\sqrt{I(r)\rho c}}{p_0} \right) \quad (32)$$

Pentru fiecare configurație (referință și cu serații), s-a calculat energia acustică cumulată emisă până la o distanță  $r$  prin integrarea intensității:

$$E(r) = \int_{r_0}^r I(r') \cdot 4\pi r'^2 dr' \rightarrow \Delta E(r) = E_{ref}(r) - E_{serații}(r) \quad (33)$$

Pentru a evalua impactul global al tratamentelor pasive asupra propagării zgomotului, diferențele energetice dintre configurația de referință și cea cu serații au fost raportate la volumul sferic de propagare, obținându-se indicatori de densitate energetică în funcție de distanță. Acești indicatori au fost analizați pe intervalul 5–100 m, permițând estimarea efectului cumulativ al reducerii de zgomot nu doar în apropierea sursei, ci și asupra dispersiei energiei acustice în câmp îndepărtat. Metodologia de calcul, ipotezele de propagare și implementarea numerică sunt prezentate detaliat în lucrarea *in extenso*, fiind însoțite de un cod dedicat în anexe. Aplicarea procedurii pentru cazurile „ref\_15deg” și „7dinti\_15deg”, pe baza semnalelor brute de presiune, conduce la variațiile prezentate în Figura 32, evidențiind diferențele de atenuare acustică în funcție de distanță.

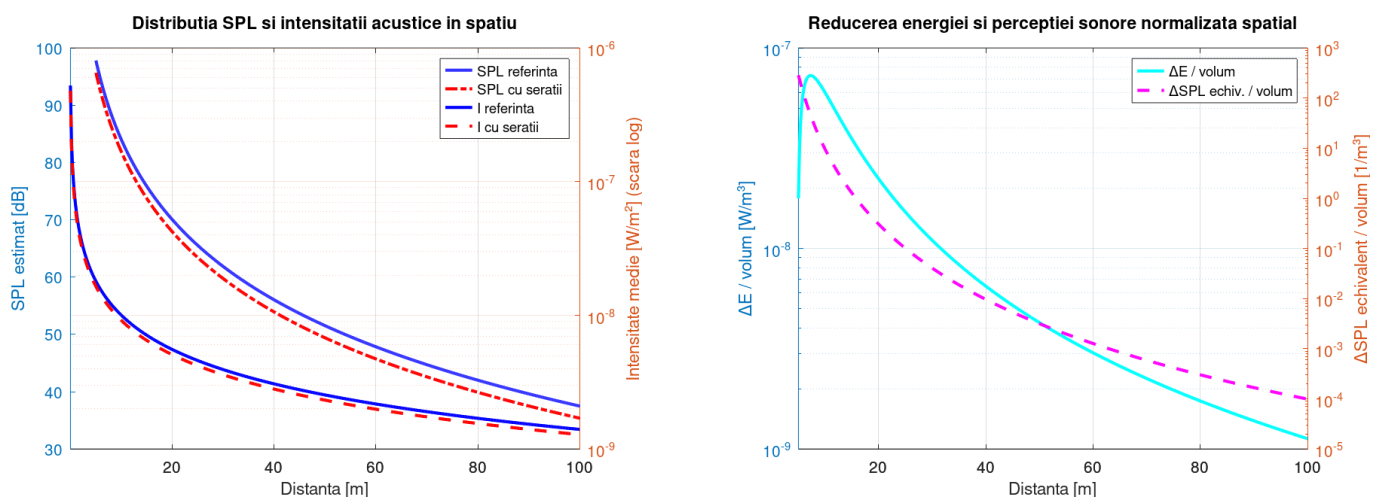


Figura 32. Evoluția unor parametri relevanți cu distanța

## CAPITOLUL 7. DEDUCEREA RELAȚIILOR SEMI-EMPIRICE ȘI SIMULAREA PERFORMANȚELOR ACUSTICE ALE SECTOARELOR DE PALETE CU BORD DE ATAC MODIFICAT

### 7.1. Obținerea legilor semi-empirice

Generarea zgomotului aerodinamic asociat interacțiunii dintre structurile turbulente și suprafețele solide rămâne o provocare majoră în proiectarea componentelor aerodinamice care operează la numere Mach mici și moderate, în special pentru aplicații precum rotoare libere, turbine eoliene și vehicule aeriene fără pilot, unde soluțiile pasive sunt preferate datorită constrângerilor de masă, consum energetic și robustețe [8] [12] [152] [153] [154] [155] [156] [157]. În acest context, serațiile aplicate la bordul de atac sau de fugă s-au dovedit eficiente în reducerea zgomotului broadband, prin modificarea mecanismelor de împrăștiere a fluctuațiilor de presiune turbulentă din vecinătatea discontinuităților geometrice [6] [14].

Bazele teoretice clasice, precum formulările lui Howe [23], Amiet [24] sau cadrul empiric BPM [13], au contribuit semnificativ la înțelegerea acestor mecanisme, însă se bazează frecvent pe ipoteze

simplificatoare care limitează aplicabilitatea lor la geometrii și regimuri de curgere complexe [161] [166] [167]. În consecință, numeroase studii recente au evidențiat necesitatea unor abordări complementare, bazate pe date experimentale, capabile să surprindă tendințele de atenuare broadband observate în practică [152] [158] [168].

În teză se adoptă o strategie semi-empirică, bazată pe regresii funcționale și metode de tip ensemble, pentru a corela direct nivelurile de presiune acustică cu parametri geometrici și aerodinamici măsurabili, fără a recurge la grupuri adimensionale prestabilite. Această abordare permite formularea unor modele predictive compacte și interpretabile, utile atât pentru analiza mecanismelor aeroacustice asociate serațiilor, cât și pentru sprijinirea procesului de proiectare. Spre deosebire de modelele consacrate, care sunt adesea calibrate punctual și dependente de ipoteze de similitudine, cadrul propus urmărește o generalizare controlată, validată pe seturi experimentale la scară redusă. Metodologia se concentrează pe modelarea diferențelor de SPL față de configurații de referință, fie rezolvate spectral, fie integrate pe benzi terțiare, utilizând variabile cu semnificație fizică directă, precum amplitudinea și densitatea serațiilor, unghiurile de instalare și de observație. Prin integrarea conceptelor fizice din teoriile clasice cu flexibilitatea metodelor bazate pe date, studiul contribuie la dezvoltarea unor instrumente predictive cu aplicabilitate practică în proiectarea componentelor aerodinamice cu zgomot redus. Ecuațiile generale sunt formulate astfel: liniară, polinomială, logaritmică și exponențială, utilizate pentru regresia metricei acustice ( $\Delta$ SPL, OASPL, PWL, PSD).

Pentru investigarea relației dintre răspunsul acustic și parametrii de control geometrici și unghiulari, au fost analizate mai multe tipuri de modele de regresie, selectate în funcție de capacitatea lor de a surprinde tendințele observate în datele SPL. Modelele liniare au fost utilizate ca referință de bază, oferind o descriere simplă a dependențelor proporționale, dar cu limitări în cazul comportamentelor neliniare sau direcționale pronunțate. Regresiile polinomiale, de ordin superior, au permis captarea curburilor și a extremelor locale, fiind adecvate pentru modelarea directivității și a pragurilor geometrice relevante. Modelele logaritmice au fost introduse pentru a descrie efecte de tip randament descrescător, frecvent întâlnite în variațiile SPL, în timp ce modelele exponențiale au fost utilizate pentru a reda comportamente de decădere sau amplificare rapidă asociate anumitor parametri de curgere sau orientare. În completarea acestor formulări analitice, a fost explorată și regresia de tip Random Forest, care permite identificarea automată a interacțiunilor neliniare complexe dintre variabile, fără impunerea unei forme funcționale prestabilite, însă cu un grad mai redus de interpretabilitate fizică. Toate modelele au utilizat același set de predictor geometrici și unghiulari, iar evaluarea performanței s-a realizat în principal prin coeficientul de determinare  $R^2$ , completat, pentru cazuri reprezentative, de indicatori precum RMSE și MAE, în vederea cuantificării erorilor absolute de predicție. Aceste forme nu sunt pur teoretice: dependențe funcționale similare au fost identificate în studii experimentale privind BA/BF cu serații. Pereira et al. [163] au raportat o relație logaritmică între  $\Delta$ SPL și parametrul de lungime de undă normalizat  $2h/\lambda$ , evidențiind un comportament de tip saturație dincolo de un anumit prag. Modelul lor,  $\Delta$ SPL<sub>max</sub> =  $10 \log_{10}[1 + 4(2h/\lambda)^2]$ , susține utilizarea acestor aproximații în regresie. O formulare logaritmică mai detaliată pentru SPL este prezentată în [170]. În cazul puterii acustice, relația dintre OASPL și directivitate este descrisă în [171] printr-un model care include termeni trigonometrico-logaritmici. Formulări suplimentare sunt menționate în [172], în special cele referitoare la zgomotul de bord de fugă asociat separației stratului limită. Lee et al. [152] au propus o expresie combinată log-polinomială pentru a descrie contribuțiile SPL în bandă îngustă în experimente pe rotor.

Studiile experimentale arată că răspunsul acustic al paletelor cu serații depinde în mod direct de parametrii de curgere și de geometria serațiilor, fiind raportate dependențe liniare, polinomiale, logaritmice sau exponențiale în funcție de parametri normalizați utilizați (de tip  $h/\delta$ ,  $h/\lambda$ , St, Re sau Mach). În special, formulările logaritmice și exponențiale descriu mai bine comportamentele de prag și de saturație observate experimental, atât pentru SPL spectral, cât și pentru indicatori globali precum OASPL și PWL. Aceste tendințe susțin utilizarea modelelor compacte, bazate pe regresie, ca

instrumente eficiente pentru descrierea influenței variabilelor geometrice și aerodinamice asupra generării zgomotului, în acord cu procesul analitic ilustrat în Figura 33.

Pentru cuantificarea influenței fiecărui parametru de control asupra SPL, a fost aplicată analiza unifactorială a varianței (ANOVA), care permite identificarea variabilelor cu impact statistic semnificativ și evaluarea ponderii acestora în variația globală a răspunsului acustic, prin intermediul mărimii efectului.

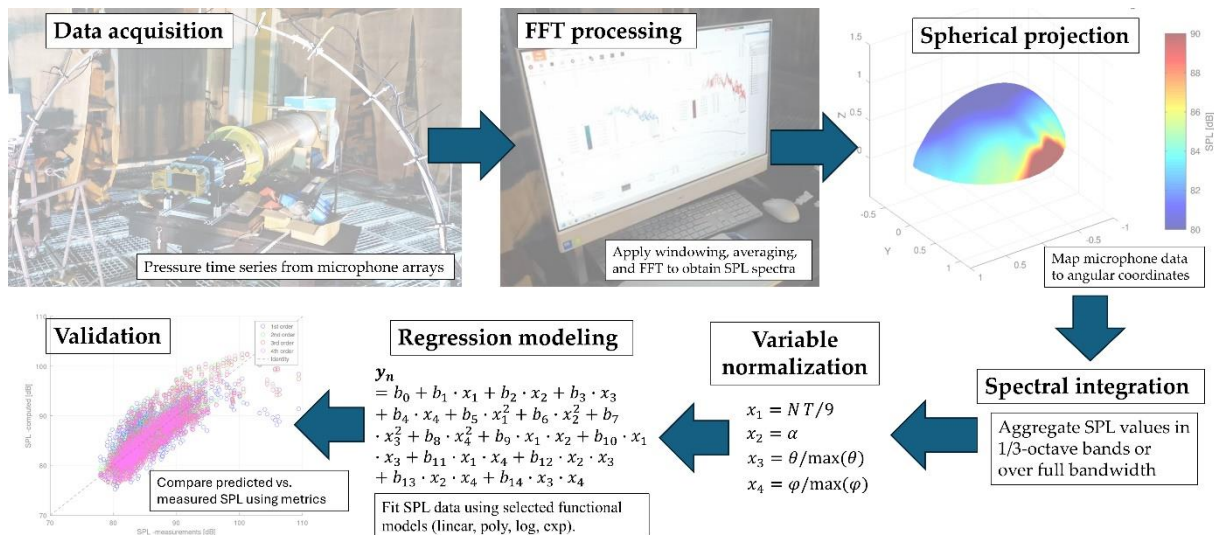


Figura 33. Schemă logică (de la achiziția de date la aplicarea regresiei și plotarea comparativă)

Seturile de date SPL au fost obținute din măsurători cu microfoane dispuse pe arcuri de cerc în mai multe planuri înclinate, acoperind 13 poziții azimutale discrete ( $\theta$ ) și 6 unghiuri de elevație ( $\phi$ ), reprezentate explicit în Figura 34. Campania experimentală a variat sistematic doi parametri geometrici esențiali: configurația serațiilor, definită prin numărul de dinți ( $NT = 0, 3, 5, 7, 9$ ), și unghiul de instalare ( $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ ), rezultând 20 de cazuri distincte de testare. Fiecare configurație surprinde astfel influența combinată a geometriei serațiilor, a unghiului de atac și a direcției de observație. Valorile SPL pentru fiecare caz de test au fost organizate în matrici CSV de dimensiune 6 (elevații)  $\times$  13 (azimuturi).

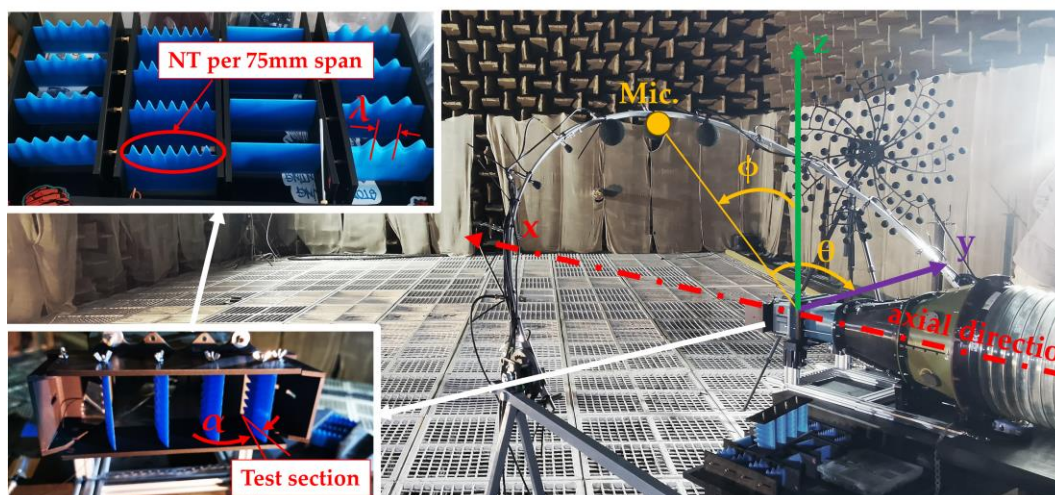


Figura 34. Parametrii importanți (vizualizare)

Pentru a elimina influențele asociate vibrațiilor mecanice sau cuplajului structural din camera anecoică, matricea de microfoane a fost decuplată complet de ansamblul aeroacustic de testare. Microfoanele au fost montate pe un suport semicircular independent, fără conexiuni fizice cu instalația de alimentare cu aer sau cu placa portantă prevăzută cu serații, prevenind transmiterea vibrațiilor

către sistemul de măsurare. Microfoanele aflate în proximitatea jetului au fost protejate cu spumă poroasă, pentru reducerea perturbațiilor aerodinamice locale, fără a afecta răspunsul acustic. Analiza semnalelor brute nu a evidențiat artefacte tonale sau zgomote parazite care să necesite preprocesări suplimentare.

În etapa de preprocesare, datele au fost normalizate în raport cu parametrii geometrici și unghiulari (numărul de dinți, unghiul de instalare și unghiurile de observație). Valorile corespunzătoare planurilor de elevație reduse ( $15^\circ$  și  $30^\circ$ ) au fost excluse, deoarece aceste poziții sunt puternic influențate de câmpul apropiat al jetului și de stratul de forfecare turbulent, conducând la variații SPL mai mari și la o degradare a calității ajustărilor statistice. Unghiurile de elevație mai mari ( $45^\circ$ – $90^\circ$ ) au furnizat tipare de directivitate mai stabile și reprezentative pentru radiația de câmp îndepărtat.

Setul de date final a inclus patru variabile independente normalizate, iar robustețea modelelor a fost evaluată folosind mai multe variante de selecție a predictorilor. Performanța a fost cuantificată prin coeficientul de determinare  $R^2$ , iar contribuția fiecărei variabile a fost estimată prin metode de tip permutare.

Toate modelele de regresie funcțională și de tip ensemble au fost implementate integral în GNU Octave, prin cod dedicat, fără utilizarea unor librării externe, asigurând transparență și control complet asupra procesului de modelare. Detaliile complete privind algoritmi de calcul și implementarea numerică sunt prezentate în lucrarea în extenso, unde este inclusă și o anexă dedicată cu codul aferent.

Aproximațiile polinomiale au următoarea structură (de la ordinul 1 până la ordinul 4), prezentate în ecuațiile (34)–(37).

$$y_{n1} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 \quad (34)$$

$$y_{n2} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_1^2 + b_6 \cdot x_2^2 + b_7 \cdot x_3^2 + b_8 \cdot x_4^2 + b_9 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{10} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{13} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{14} \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (35)$$

$$y_{n3} = [\text{toti termenii de ordin 2}] + b_{15} \cdot x_1^3 + b_{16} \cdot x_2^3 + b_{17} \cdot x_3^3 + b_{18} \cdot x_4^3 \quad (36)$$

$$y_{n4} = [\text{toti termenii de ordin 3}] + b_{19} \cdot x_1^4 + b_{20} \cdot x_2^4 + b_{21} \cdot x_3^4 + b_{22} \cdot x_4^4 \quad (37)$$

unde  $y_{ni}$  reprezintă SPL-ul normalizat,  $b_0$  este termenul liber (intercept), iar  $b_1 - b_{22}$  sunt coeficienții de regresie. Variabilele independente sunt definite astfel:  $x_1 = NT/9$ ,  $x_2 = \alpha$ ,  $x_3 = \theta/\max(\theta)$ , și  $x_4 = \varphi/\max(\varphi)$ . Unghiul  $\theta$  utilizat în regresii se află în intervalul  $[0, \pi]$ , în timp ce  $\varphi$  se situează între  $15^\circ$  și  $90^\circ$ . Unghiul de instalare  $\alpha$  este utilizat direct, cu valori de  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  sau  $15^\circ$ .

Metodele menționate anterior, aplicate pe seturile de date disponibile, au condus la suprapunerile prezentate ca și exemplu în Figura 35, cu valorile corespunzătoare ale coeficientului de determinare  $R^2$  (și alți indicatori cantitativi) listate (tot ca exemplu) în Tabelul 1. Coeficienții specifici ai polinoamelor obținute sunt prezentați explicit în anexele lucrării în extenso.

*Tabelul 1. Valori pentru  $R^2$  – toate planurile luate în considerare.*

	1st Degree	2nd Degree	3rd Degree	4th Degree
$\alpha = 0^\circ$	0.4151	0.6314	0.6453	0.6469
$\alpha = 5^\circ$	0.5398	0.7193	-1.9245	0.1198
$\alpha = 10^\circ$	0.4361	0.6660	0.6666	0.6753
$\alpha = 15^\circ$	0.3167	0.6387	0.6501	0.6573

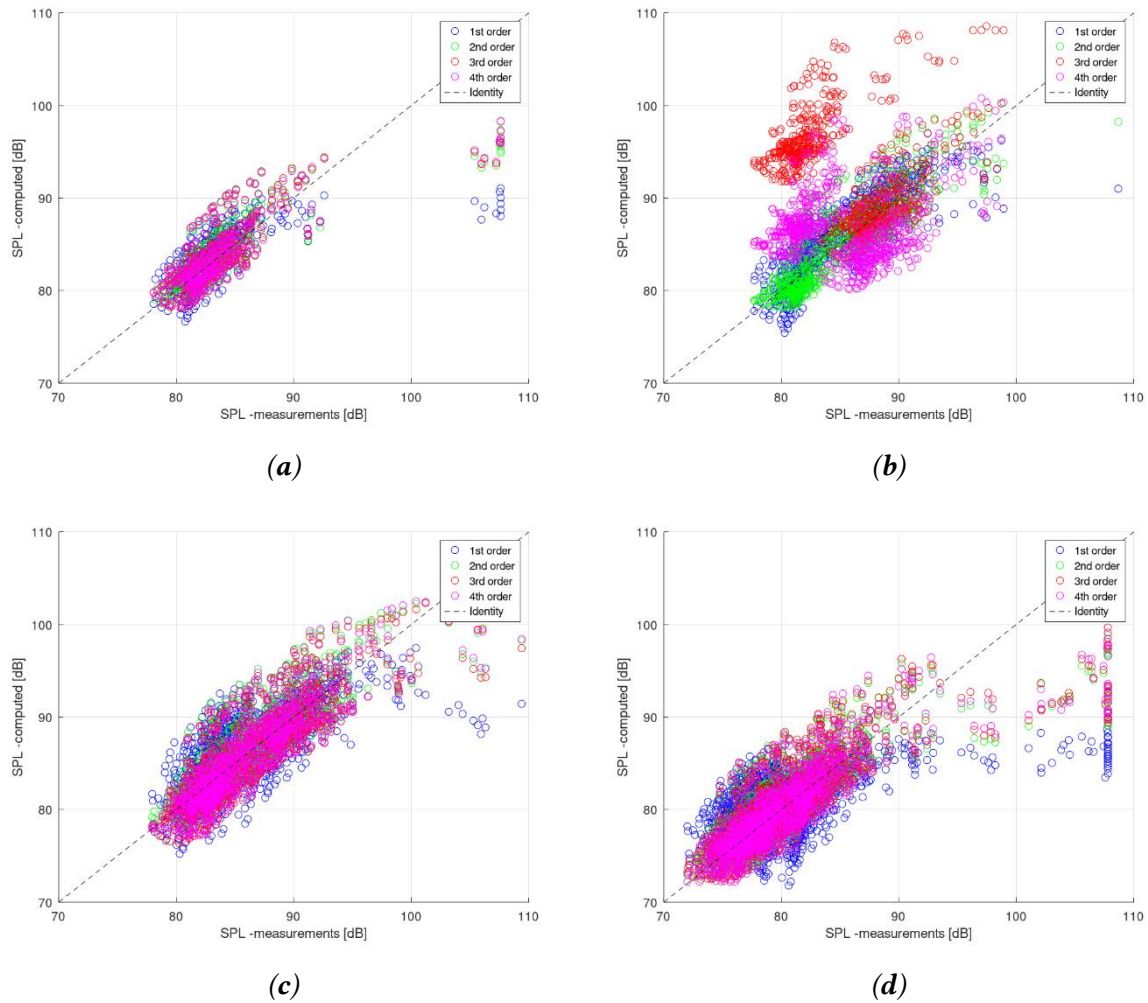


Figura 35. Toate datele (planuri 15–90 grade): (a)  $\alpha = 0^\circ$ ; (b)  $\alpha = 5^\circ$ ; (c)  $\alpha = 10^\circ$ ; (d)  $\alpha = 15^\circ$ .

Au fost testate și alte ecuații pentru ajustarea datelor experimentale, utilizând cât mai multe variabile independente, în încercarea de a obține valori cât mai apropiate de cele experimentale. Legile verificate sunt destul de generale, fiind întâlnite și în lucrări similare, și cu forme logaritmice, sinusoidale sau exponențiale. Ca și exemplu de apropiere a aproximării numerice de datele exacte, în Tabelul 2 sunt prezentate valori pentru parametrul  $R^2$ .

Tabelul 2. Valoarea lui  $R^2$  pentru alte legi; planuri 45–90 grade.

	<b>Liniar</b>	<b>Logaritm</b>	<b>Sin</b>	<b>Exponential</b>
$\alpha = 0^\circ$	0.6683	0.6750	0.6764	0.6697
$\alpha = 5^\circ$	0.5238	0.5439	0.5830	0.5849
$\alpha = 10^\circ$	0.2824	0.1055	-0.1296	0.2878
$\alpha = 15^\circ$	0.2583	0.1334	0.3064	0.3005

Analiza ANOVA unifactorială realizată pentru numărul de dinți, unghiul de atac  $\alpha$ , unghiul polar  $\theta$  și unghiul de elevație  $\varphi$  indică faptul că toate variabilele au o influență statistic semnificativă asupra SPL ( $p < 10^{-8}$ ), conform Figurii 36. Cea mai mare contribuție este asociată unghiului de elevație  $\varphi$  ( $\eta^2 = 0.219$ ), evidențiind rolul dominant al poziției observatorului în directivitatea acustică. Urmează unghiul de atac  $\alpha$  ( $\eta^2 = 0.169$ ) și unghiul polar  $\theta$  ( $\eta^2 = 0.113$ ), în timp ce numărul de dinți are un efect



mai redus, dar relevant statistic ( $\eta^2 = 0.026$ ), confirmând caracterul secundar al parametrilor geometrici față de condițiile de curgere și observație.

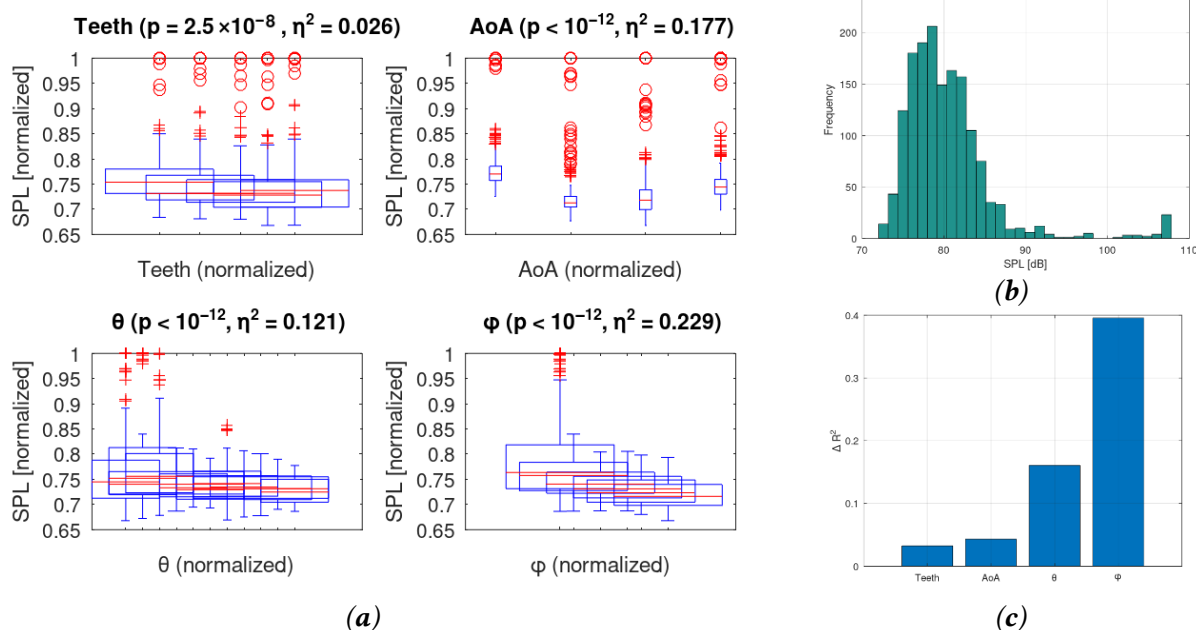


Figura 36. Analiză pe întregul set de date: (a) ANOVA boxplots; (b) distribuție SPL; (c) “variable importance” (Random Forest).

În ansamblu, rezultatele confirmă caracterul multi-parametric al zgomotului de jet, sensibil atât la parametri aerodinamici, cât și geometrici, susținând utilizarea modelelor de regresie multidimensionale pentru predicția SPL. Analiza ANOVA a indicat unghiul de elevație  $\phi$  drept cel mai influent predictor, în concordanță cu fizica propagării acustice și cu directivitatea radiației generate de interacțiunea jet-serație.

Pentru evaluarea capacității predictive, au fost testate mai multe configurații de regresie, corespunzătoare unor seturi de date limitate sau restrânse selectiv (variantele A–H descrise în lucrare), prin impunerea unor condiții asupra unghiurilor de observație și a parametrilor geometrici. Rezultatele arată că performanța maximă a fost obținută doar pentru configurații foarte specifice, în timp ce pentru majoritatea variantelor coeficientul de determinare a rămas moderat, indicând o interacțiune complexă și neliniară între variabile. Restrângerea excesivă a setului de date a condus, în unele cazuri, la degradarea semnificativă a performanței, din cauza reducerii variabilității și a numărului de eșantioane.

Deși nicio configurație nu a atins o performanță predictivă excelentă ( $R^2 > 0.9$ ), au fost obținute informații valoroase privind sensibilitatea SPL față de fiecare parametru. Rezultatele confirmă faptul că efectele multivariate și de interacțiune domină comportamentul SPL în curgeri cu bord de atac prevăzut cu serații. Abordările viitoare de modelare ar putea explora metode neliniare sau extinderea setului de date pentru a crește robustețea predicțiilor.

## 7.2. Simularea paletelor modificate la bordul de atac în configurație de rețea (sector)

Capitolul curent abordează validarea numerică–experimentală a treptelor cu bord de atac modificat. Experimentele la scară redusă oferă condiții controlate și rezoluție spațială ridicată, în timp ce o gamă de strategii de modelare a turbulenței—Spalart–Allmaras,  $k-\omega$  SST,  $k-\epsilon$ , SAS și LES (ale căror formulări sunt foarte bine documentate în [213], [214] și [215])—sunt evaluate în simulări tranzitorii cu rezoluții temporale variabile. Accentul se pune pe capacitatea acestora de a reproduce spectrele măsurate și de a surprinde mecanismele dominante ale zgomotului de interacțiune jet–

paletă. Comparațiile cu experimentele indică faptul că zgomotul de interacțiune este neglijabil la frecvențe joase și bine surprins la frecvențe înalte. În timp ce modelele Spalart–Allmaras și  $k-\omega$  SST reproduc regimul de joasă frecvență, SAS oferă cea mai bună concordanță globală în gama de frecvențe medii–înalte, deși cu o ușoară supraestimare, iar LES reproduce satisfăcător răspunsul de bază, dar cu un cost computațional mai ridicat. Aceste constatări evidențiază compromisurile dependente de model, clarifică cerințele de rezoluție temporală și confirmă relevanța simulărilor numerice ca instrumente predictive pentru beneficiile aeroacustice ale serațiilor bio-inspirate de bord de atac.

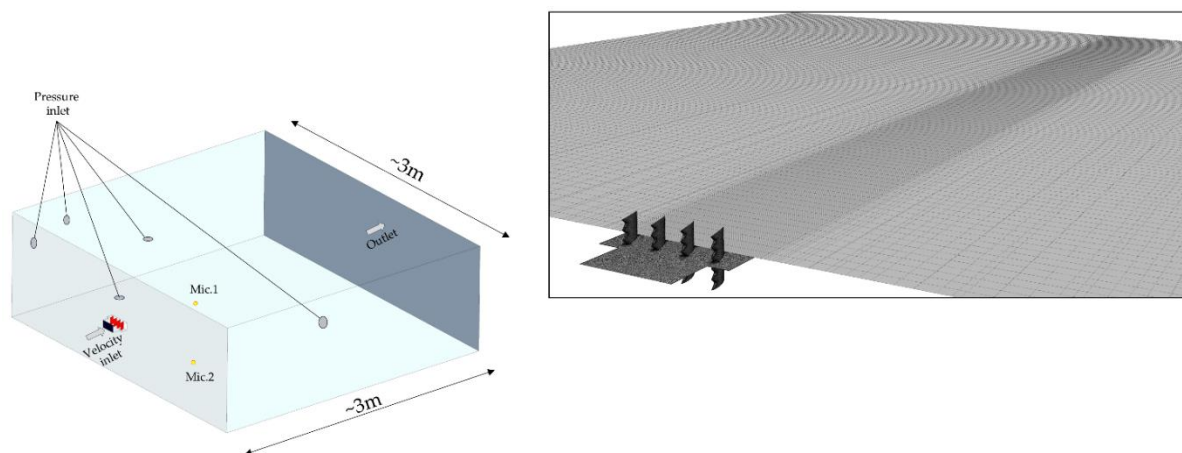


Figura 37. Domeniu și grila de calcul.

Simulările numerice au reprodus configurația experimentală și au fost împărțite în două regiuni. Regiunea de câmp apropiat a rezolvat interiorul cascadei și al duzei folosind o rețea predominant structurată (Figura 37) în jurul suprafețelor solide (palette și pereți), cu o distanțare de perete aleasă pentru a obține  $y^+ \approx 1$ . Condițiile la intrarea în rețea au prescris o viteză medie de 50 m/s, intensitatea turbulenței  $Tu=10\%$  și lungimea caracteristică integrală  $\Lambda=2,5\text{mm}$ , reprezentând condiția de zgomot de interacțiune produsă experimental prin grila fizică. Regiunea exterioară s-a extins pe  $\sim 3$  m în lungime și lățime pentru a include puncte de microfoane virtuale, coincidente cu pozițiile senzorilor experimentali (raza de 1 m la  $10^\circ$  și  $90^\circ$ ). Granițele câmpului îndepărtat au fost setate ca nereflexive pentru a evita contaminarea acustică a spectrelor. Cinci strategii de modelare a turbulenței, utilizate frecvent în aeroacustica broadband, au fost evaluate pentru ambele geometrii: Spalart–Allmaras (SA),  $k-\omega$  SST,  $k-\varepsilon$ , Scale-Adaptive Simulation (SAS) și Large-Eddy Simulation (LES). Soluțiile tranzitorii au fost inițializate dintr-o stare statistic staționară obținută cu un pas de timp fizic de 1 ms; stabilizarea a fost verificată prin monitorizarea evoluției temporale a  $p_{\text{rms}}$  și  $dp/dt$  până la atingerea staționarității (Figura 38). Rulările nestaționare au continuat apoi cu un pas de timp  $\Delta t=10^{-5}\text{s}$ , pentru 1.800–2.000 de pași și până la 20 de iterații interne per pas (pentru a asigura că scăderea spectrală și pozițiile maximelor nu au fost artefacte generate de o nerezoluție temporală insuficientă). Pentru predicția zgomotului utilizând ecuația FW–H, a fost folosită formularea descrisă în [197], pornind de la ecuația generală până la tensorul de stres Lighthill ( $T_{ij}$ ) și expresiile pentru tensorul de stres compresiv ( $P_{ij}$ ).

A fost realizat un studiu de convergență a rețelei numerice, fiind analizate mai multe niveluri de discretizare. O rețea intermediară a fost selectată pentru comparația modelelor de turbulență, oferind un compromis adecvat între fidelitatea spectrală și costul computațional. Figura 38 prezintă comparația dintre spectrele acustice măsurate experimental și cele obținute numeric, atât pentru zgomotul propriu al paletelor, cât și pentru zgomotul de interacțiune jet–paletă, pentru cele două poziții ale microfoanelor. Predicția numerică a fost realizată prin analogia FW–H și prin extracția presiunilor în puncte colocalizate cu microfoanele experimentale. Semnalele numerice au fost procesate identic cu cele experimentale, permițând o comparație directă, în special în banda de frecvență dominată de zgomotul de interacțiune.



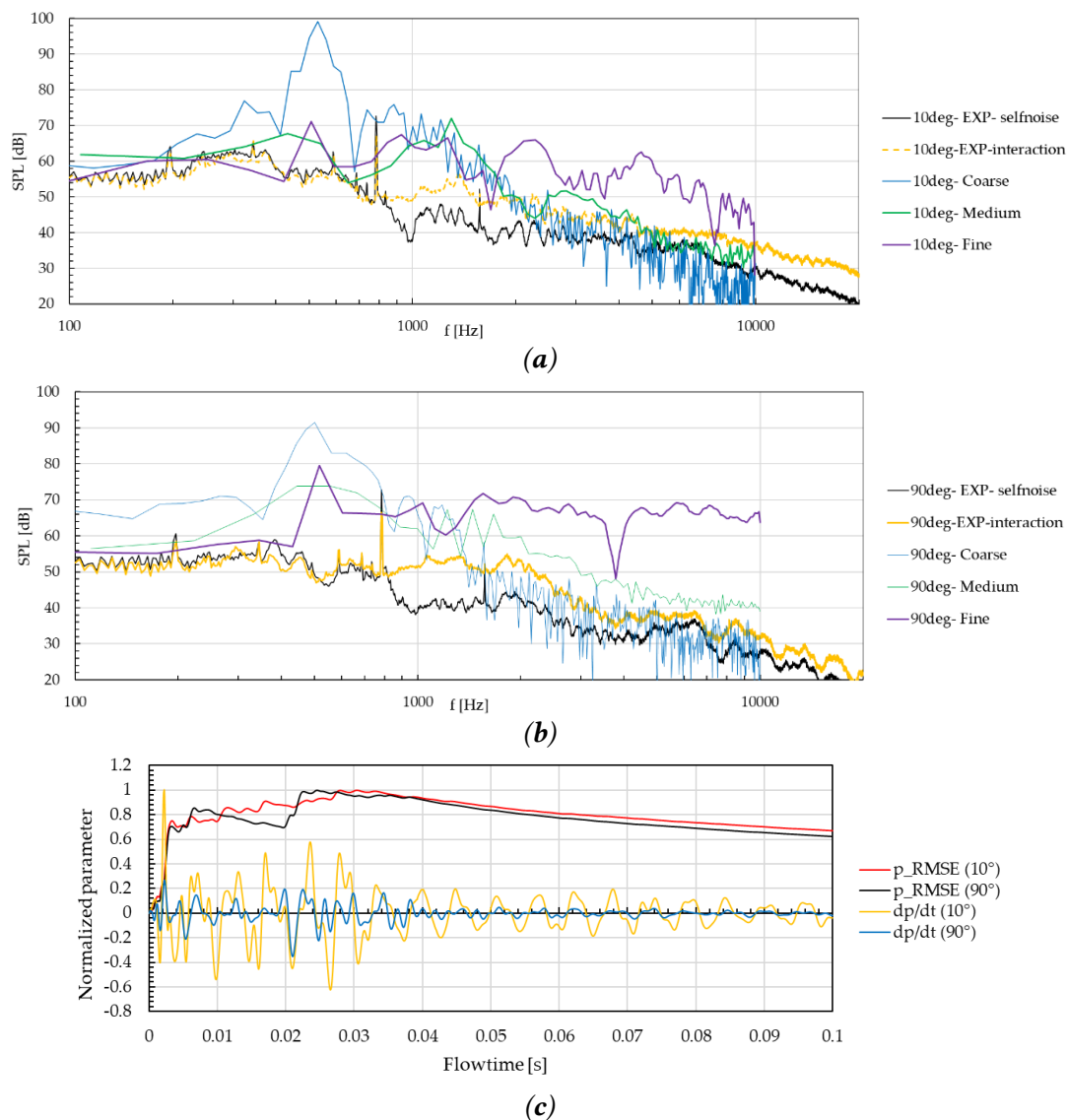


Figura 38. Solutia stabilizată și analiza stabilității mesh-ului: (a) microfon axial (10°), palete cu seratii; (b) microfon lateral (90°), palete cu seratii; (c) soluție stabilizată (1ms) înainte de rularea în tranzitoriu.

Pentru microfonul cvasi-axial, gridul grosier supraestimează frecvențele joase-medii, prezentând o umflătură largă ce atinge un maxim în jur de câteva sute de hertzi și rămâne ridicată până la  $\sim 1$  kHz. Grid-ul intermediar urmărește mai fidel tendința experimentală de zgomot de interacțiune în intervalul 1–5 kHz, în timp ce grid-ul fin prezintă ondulații pronunțate și maxime locale (de ex., între 1,5–3 kHz) care nu apar în măsurători. Pentru înregistrarea laterală, cazul cu grid grosier supraestimează din nou în banda 0,5–1 kHz; varianta intermediară este sistematic mai apropiată de spectrul de zgomot de interacțiune pe cea mai mare parte a benzii, în timp ce varianta fină rămâne mai ridicată și relativ plată pe o gamă largă de frecvențe, cu o scădere locală în jur de  $\sim 2$  kHz.

În ansamblu, Figura 38(a) și (b) indică atingerea unui platou de independență față de rețea la rezoluția medie: trecerea de la rețeaua Grosieră la cea Medie îmbunătățește clar concordanța spectrală, în timp ce rafinarea suplimentară nu aduce beneficii consistente și poate introduce artefacte dacă nu este susținută de istorice temporale mai lungi și rezoluție temporală mai strictă. Rezultatele comparative pentru configurația de referință și cea cu seratii sunt prezentate în Figura 39. Simulările au fost realizate, în lipsa altor mențiuni, pe rețeaua Medie, cu inițializare stabilizată și un număr comparabil de pași de timp, SPL-ul fiind derivat din PSD-ul numeric prin FFT. Predicțiile sunt, în general, consistente între modele, cu diferențe mai pronunțate la frecvențe joase ( $< 1$  kHz) și o concordanță bună în banda de interes 2–5 kHz, în special pentru modelul SAS, care oferă un compromis favorabil între acuratețe și cost computațional.

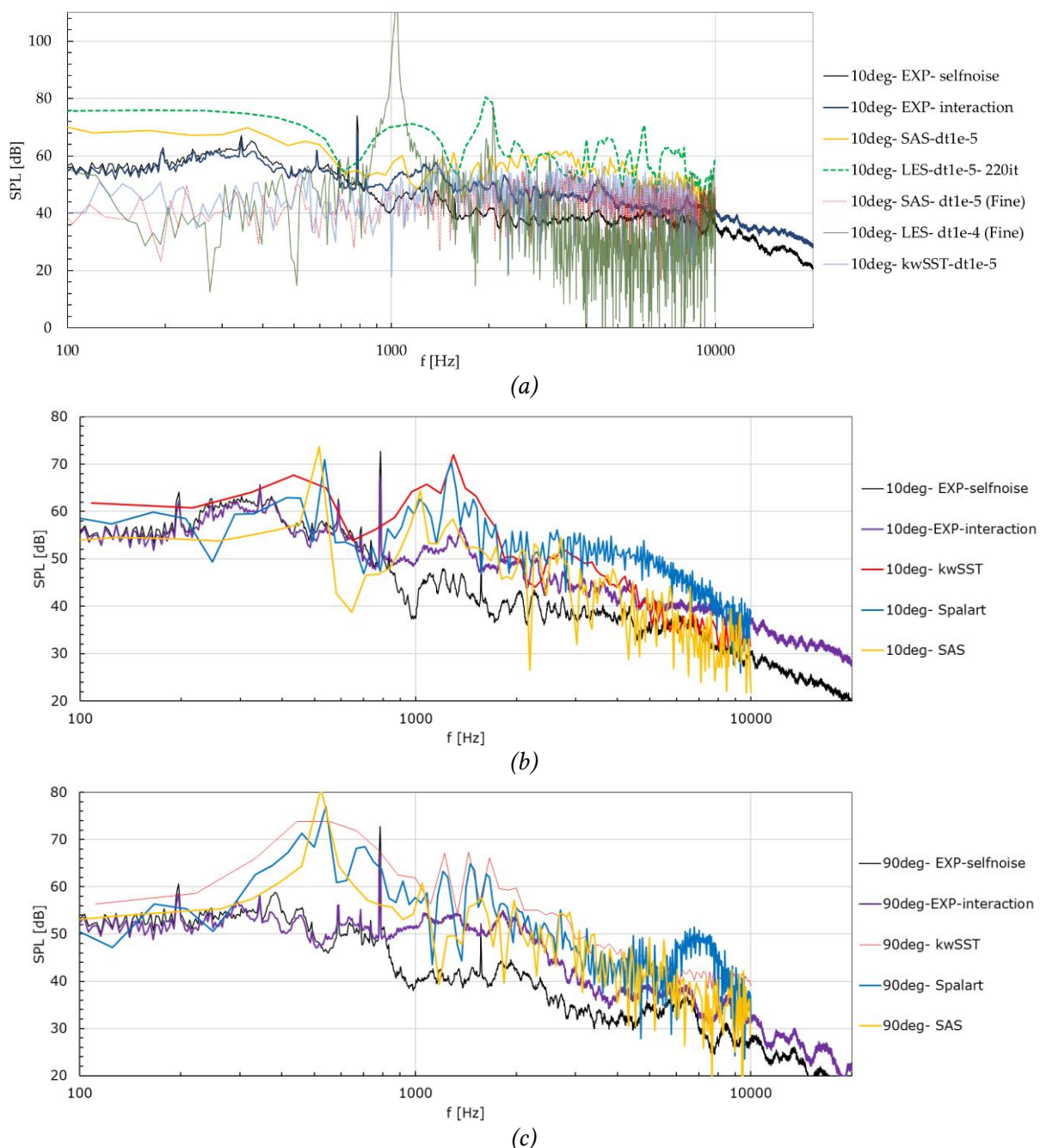


Figura 39. Spectre suprapuse: (a) diferite modele pe paleta de referință (BA drept, direcție  $10^\circ$ ); (b) diferite modele pe paleta de referință (BA drept, direcție  $10^\circ$ ,  $dt=10^{-5}$  s); (c) diverse modele pe paleta cu seratii (direcție  $90^\circ$ ,  $dt=10^{-5}$  s).

Analiza pentru microfonul la  $10^\circ$  (Figura 39(a)) evidențiază rolul critic al rezoluției temporale: LES necesită pași de timp foarte mici pentru a evita spectre zgomotoase, în timp ce SAS și  $k-\omega$  SST reproduc mai robust banda medie, cu ușoare supraestimări locale. Pentru geometria cu seratii (Figura 39(b)), niciun model nu domină întreaga bandă:  $k-\omega$  SST tinde să supraestimeze frecvențele joase, SA urmărește mai bine panta de frecvență înaltă, iar SAS rămâne competitiv în regiunea centrală.

Pentru poziția laterală (Figura 39(c)),  $k-\omega$  SST reproduce cel mai coerent anvelopa experimentală până la  $\sim 2-3$  kHz, în timp ce SA și SAS prezintă maxime locale absente experimental. Aceste rezultate arată că ierarhia modelelor depinde de unghiul de observație, subliniind necesitatea validării multi-unghi pentru evaluarea robustă a performanței numerice. Figura 40 suprapune spectrele calculate pentru trei scenarii de surse acustice—domeniul din apropierea paletii, domeniul exterior și cazul combinat—eșantionate în aceleași locații ale receptorilor ca în figurile precedente.

Pentru această analiză s-a utilizat modelul  $k-\omega$  SST cu un pas de timp de  $\Delta t=10^{-5}$ s, iar rezultatele au fost obținute după puțin peste 500 de pași de timp.

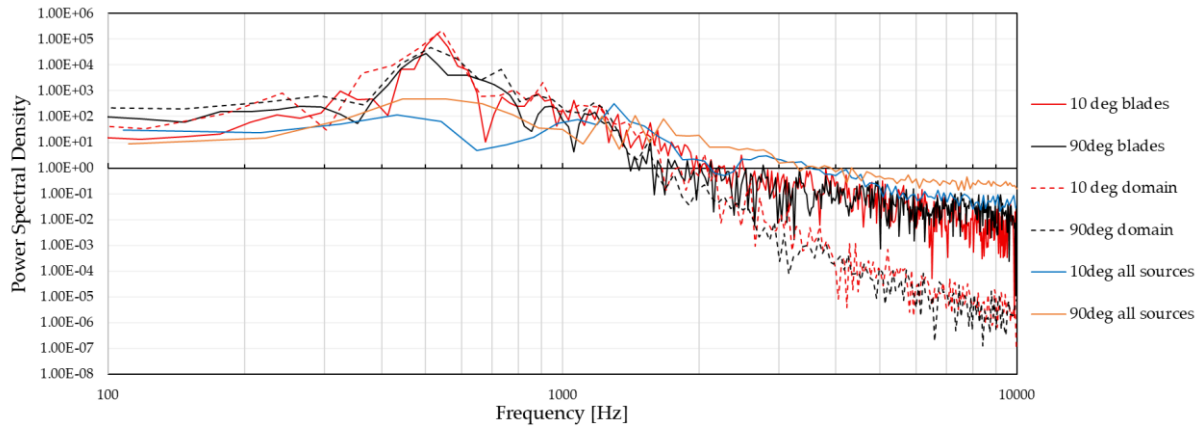


Figura 40. Influenta domeniu palete vs domeniu de curgere

### 7.3. Determinarea coerenței fluctuațiilor de presiune (“spanwise coherence”) pentru configurația cu serații la bordul de atac. Determinarea parametrilor nestăționari

Metodologia urmărește evaluarea organizării tridimensionale a câmpului de presiune nestăționară pe suprafața paletei, cu accent pe bordul de atac, prin cuantificarea corelării spațiale a fluctuațiilor de presiune în direcția spanwise folosind coerența de tip *magnitude-squared coherence*. Achiziția datelor a fost realizată numai după atingerea unui regim statistic staționar, verificat prin stabilizarea valorilor medii și RMS ale presiunii pe mai mulți timpi de traversare a curgerii. Analiza s-a bazat pe semnale de presiune extrase în puncte discrete de pe suprafața paletei, distribuite de-a lungul bordului de atac și alese astfel încât să includă atât regiuni de vârf, cât și de fund ale serației față de planul median (Figura 41), permițând caracterizarea structurii spațiale a fluctuațiilor și comparații ulterioare pe direcția corzii.

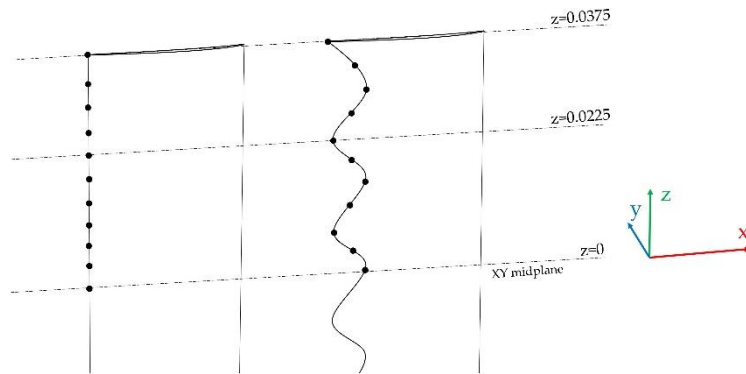


Figura 41. Puncte de înregistrare și export pe bordul de atac al paletelor.

$$p'_{i(t)} = p_{i(t)} - \overline{p_{i(t)}} \quad (38)$$

În analiza coerenței spațiale a fluctuațiilor de presiune, semnalele numerice au fost mai întâi preprocesate pentru a elimina variațiile cvasi-statice lente și porțiunea inițială tranzitorie, astfel încât evaluarea să se bazeze exclusiv pe un regim statistic stabil. Datele disponibile conțin doar coordonata spanwise  $z$ , motiv pentru care studiul vizează exclusiv decoralarea fluctuațiilor de-a lungul bordului de atac, în funcție de separația dintre puncte pe înălțimea paletei. Coerența a fost estimată în domeniul frecvenței pentru toate perechile de puncte disponibile, utilizând o metodă spectrală robustă (Welch),

apoi mediată atât pe benzi de frecvență, cât și pe perechi cu aceeași distanță spanwise, pentru a reduce sensibilitatea la zgomot numeric, vârfuri înguste și bias local. Din aceste rezultate a fost extrasă o lungime caracteristică de coerență, care sintetizează rata de scădere a corelării de-a lungul paletelor: valori mari indică structuri coerente extinse, iar valori mici sugerează decorare rapidă indusă de geometrie. Analiza s-a concentrat pe banda de frecvență relevantă pentru zgomotul de interacțiune (kilohertzi), unde serațiile sunt așteptate să modifice nu doar nivelul SPL, ci și organizarea spațială a sursei acustice. Rezultatele, prezentate în Figura 42, au fost obținute cu un cod dedicat implementat în GNU Octave (cu cod dedicat în lucrarea în extenso) și oferă un indicator complementar spectrelor acustice, direct legat de mecanismele fizice de reducere a zgomotului.

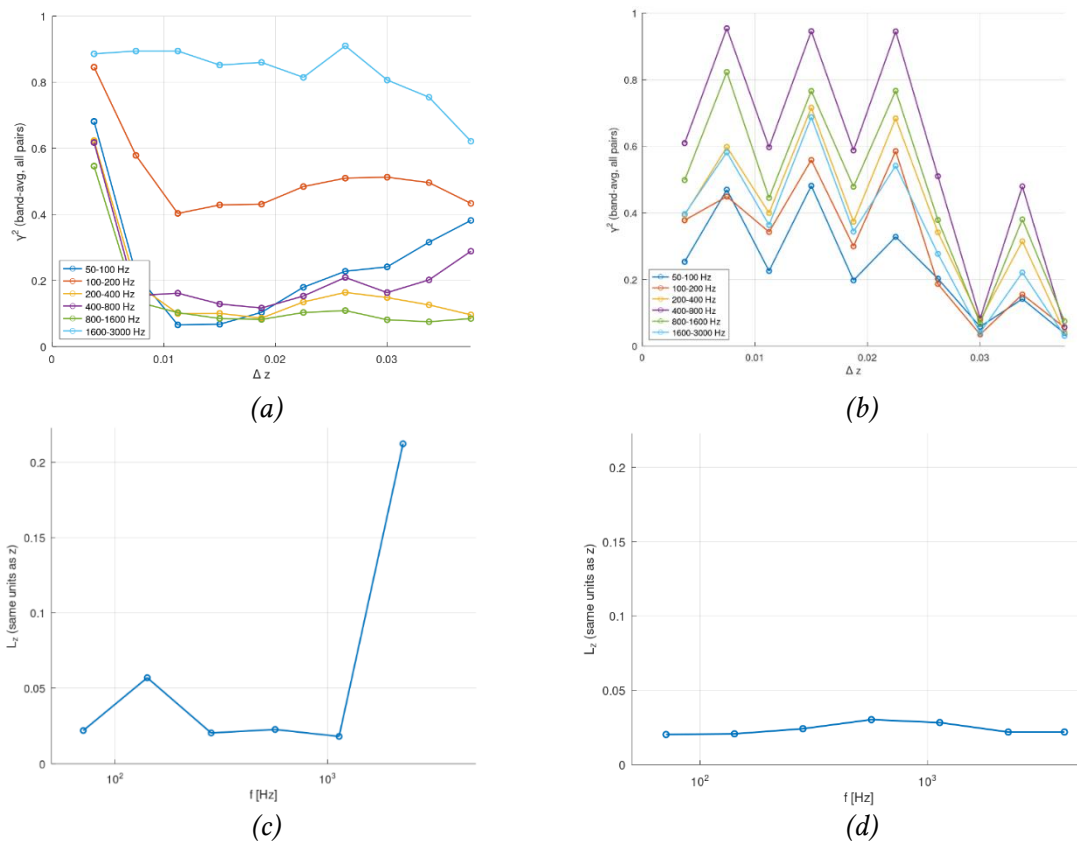


Figura 42. Analiza de coerență în lungul paletelor (“spanwise”): (a) coerență mediată pe benzi de frecvență, referință; (b) coerență mediată pe benzi de frecvență, serații; (c) lungimea caracteristică  $L_z$ , (rezultat mediat cu toate valorile), referință; (d) lungimea caracteristică  $L_z$ , (rezultat mediat cu toate valorile), serații.

Analiza nestaționarității presiunii pe suprafața paletelor este completată de reprezentări statistice care evidențiază diferențele dintre modelele de turbulență prin modul în care acestea tratează scările ne-staționare. Modelul  $k-\omega$  SST tinde să mențină niveluri mai ridicate de turbulență modelată în zona bordului de atac, ceea ce se reflectă într-un conținut mai pronunțat la frecvențe joase și medii. În schimb, SAS reduce adaptiv vâscozitatea turbulentă acolo unde nestaționaritatea este parțial rezolvată, favorizând transferul de energie către frecvențe mai înalte, în timp ce LES rezolvă o porțiune și mai mare din spectrul turbulent, cu un cost computațional semnificativ mai mare. Figura 43 (a–d) ilustrează aceste diferențe prin intermediul indicatorului de variație temporală a presiunii ( $dp/dt$ ): hărțile de pe suprafața paletelor și secțiunile axiale arată că, față de configurația de referință, paletelor cu serații prezintă o continuitate spanwise mai redusă și o atenuare mai rapidă a încărcărilor în aval. Această fragmentare spațială este coerentă cu o modulare de fază indusă de serațiile de la bordul de atac, care limitează acumularea coerentă a forțelor nestaționare și susține reducerile spectrale observate în banda de frecvență de interes.

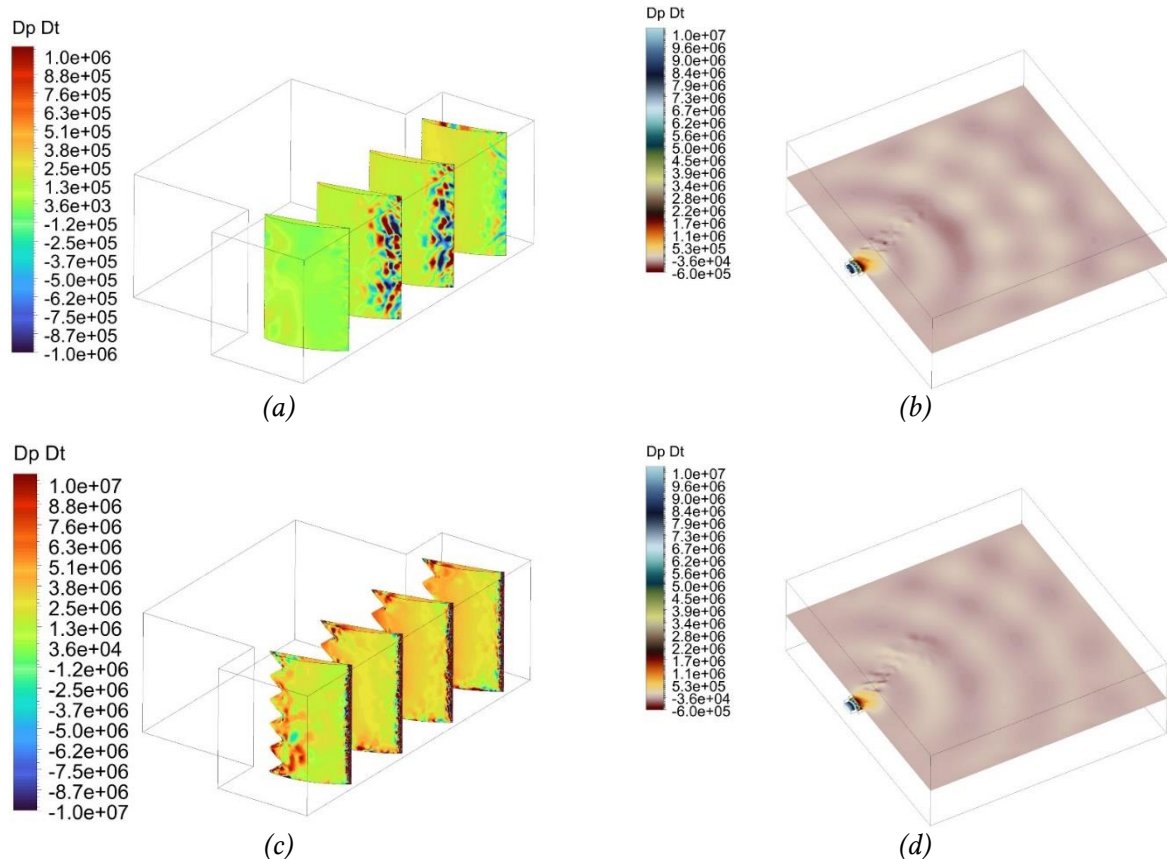


Figura 43. Comparație între  $dp/dt$ : BA drept vs serații, LES,  $dt=10^{-4}$  s,  $t \approx 50$  ms: (a) referință (reprezentare pe suprafața paletei); (b) referință (reprezentare în plan axial); (c) serații (reprezentare pe suprafața paletei); (d) serații (reprezentare în plan axial).

Iso-suprafețele din Figura 44 oferă o perspectivă tridimensională asupra structurilor nestaționare. În cazul bordului de atac drept, câmpul  $dp/dt$  formează lobi mari, cu continuitate în întreg domeniul de calcul, sugerând o încărcare corelată spanwise. În cazul cu serații, la același prag ( $dp/dt = 2 \times 10^{-4}$  Pa/s), lobii devin mai înguști și fragmentați, segmentați de geometria cu serații, având o continuitate laterală/longitudinală vizibil redusă. Această modificare topologică este coerentă cu o variație de fază impusă de geometria serațiilor: vortexurile/turbulența incidentă se decorează lateral, limitând acumularea constructivă a forțelor nestaționare și favorizând o atenuare mai rapidă în aval.

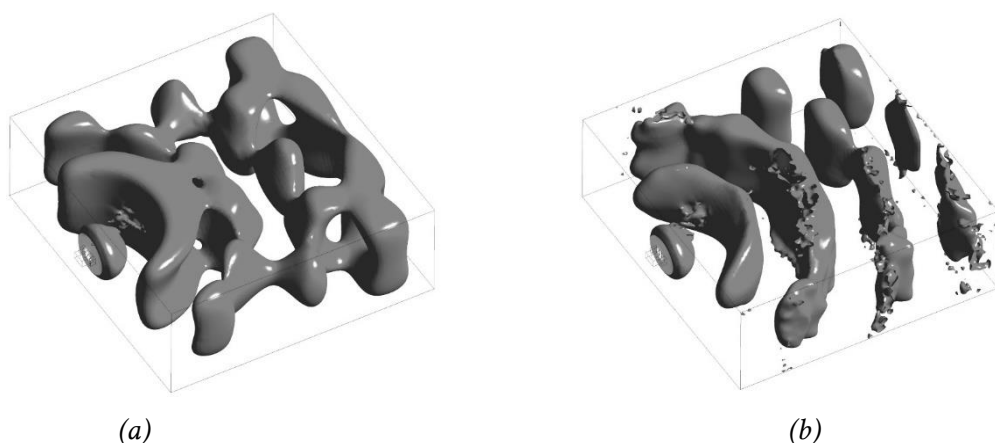


Figura 44. Iso-contururi ( $dp/dt=2 \cdot 10^{-4}$  Pa/s, LES): (a) referință; (b) serații.



#### 7.4. Dezvoltarea analizei de directivitate

Zgomotul generat de interacțiunea turbulență–profil aerodinamic și de mecanismele rotor–stator rămâne o problemă centrală în aeroacustica ventilatoarelor, elicelor și compresoarelor subsonice. În timp ce turbulența incidentă produce zgomot broadband dependent de intensitatea și scările vârtejurilor, interacțiunile de tip RSI introduc componente tonale bine definite. În acest context, serațiile de pe bordul de atac reprezintă o soluție pasivă promițătoare, deoarece modifică receptivitatea locală la turbulența incidentă, reduc coerența fluctuațiilor de presiune și favorizează redistribuirea energiei acustice în câmpul îndepărtat. Modelele analitice și studiile experimentale arată că eficiența acestui mecanism depinde critic de geometria serațiilor și de raportul dintre scările turbulenței și lungimea de undă a acestora, însă scalarea către configurații reale de tip rotor–stator rămâne incomplet înțeleasă. Studiul de față se concentrează strict pe interacțiunea turbulență–paletă și analizează influența parametrilor geometrici ai serațiilor asupra nivelurilor SPL și a redistribuirii unghiulare a zgomotului, utilizând beamforming și diagrame polare de directivitate.

Experimentele sunt realizate pe o rețea compactă de palete, expusă unui curent subsonic controlat, cu inserții serate imprimate 3D și grătare de turbulență plasate în amonte pentru controlul scărilor curgerii. Măsurătorile se desfășoară într-un mediu anecoic, folosind un array semicircular de microfoane dispus în mai multe planuri înclinate, ceea ce permite captarea distribuției tridimensionale a radiației acustice într-o singură campanie. Semnalele sunt prelucrate prin tehnici standard de analiză spectrală și beamforming, completate de metode de deconvoluție pentru îmbunătățirea contrastului surselor și de reprezentări polare pentru evaluarea directivității.

Hărțile de beamforming (Figura 45) indică faptul că paleta de referință, cu bord de atac drept, generează surse compacte și coerente concentrate în zona bordului de atac. Introducerea serațiilor conduce la o fragmentare progresivă a acestor surse și la reducerea intensității maxime, efect mai evident pentru configurațiile cu un număr mai mare de dinți, în concordanță cu ipoteza de decorare a turbulenței incidente. Diagramele polare (detaliată în lucrarea în extenso) arată că aceste modificări locale se traduc într-o redistribuire unghiulară a energiei acustice: la frecvențe medii și înalte, configurațiile serate prezintă lobi mai largi și niveluri de vârf reduse față de cazul de bază. Rezultatele confirmă că serațiile acționează în principal prin modificarea coerenței de fază a surselor, cu efecte mai pronunțate atunci când lungimea de undă acustică este comparabilă cu scara geometrică a serațiilor. Datele prezentate corespund unghiului de instalare maxim testat ( $15^\circ$ ), unde interacțiunea turbulență–bord de atac este cea mai intensă, oferind astfel un cadru robust pentru validarea metodologiei experimentale și a fluxului de procesare. Analiza cazurilor suplimentare, la incidențe mai mici, va permite completarea imaginii și evaluarea dependenței de unghi, contribuind la o interpretare sistematică a modului în care geometria serațiilor și condițiile de curgere guvernează caracteristicile spațiale și unghiulare ale zgomotului radiat.



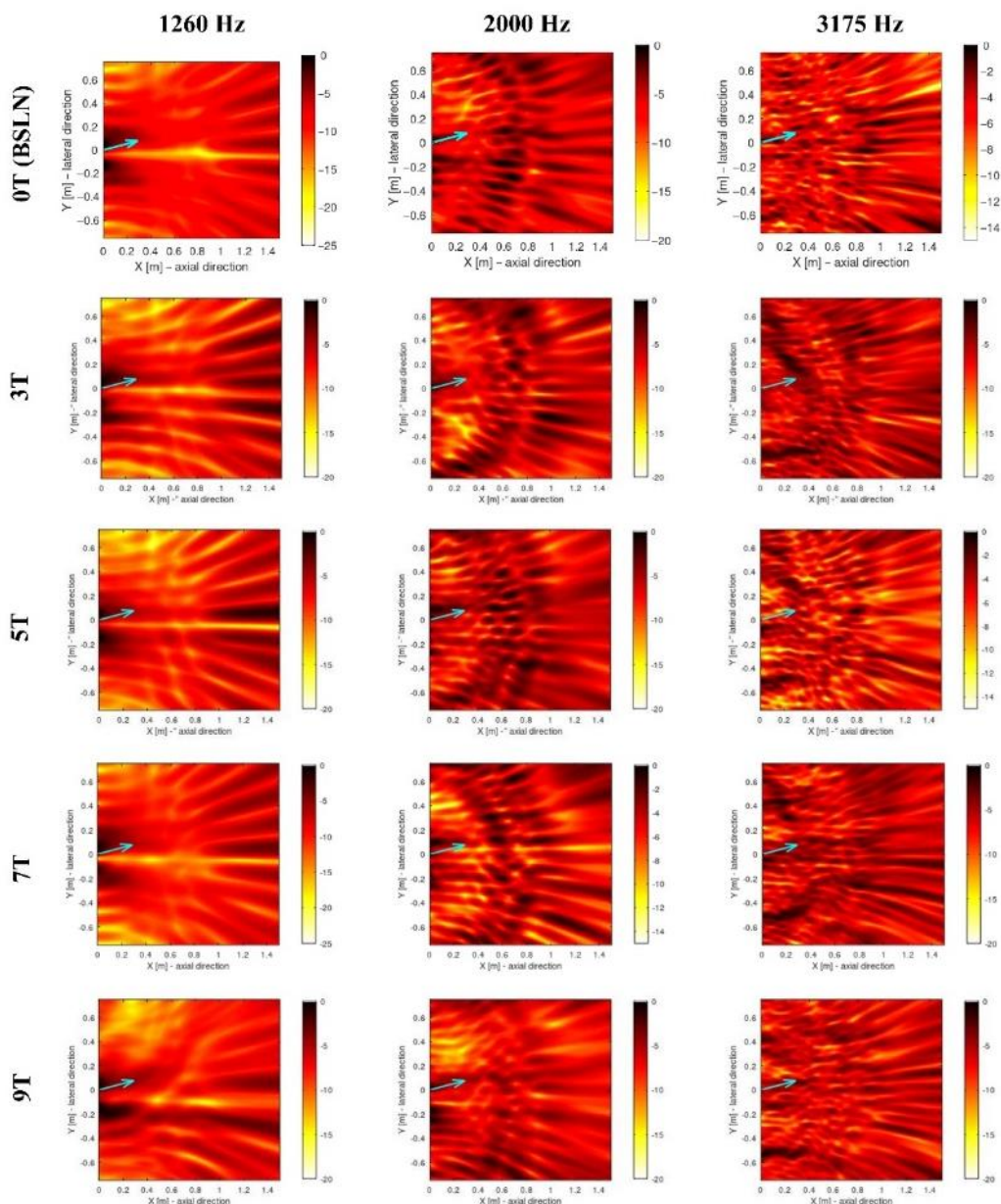


Figura 45. Beamforming (BA drept si diverse configurații de nr. dinți pe BA).

## CAPITOLUL 8. CONCLUZII

### 8.1. Concluzii generale

Prezenta teză a avut ca obiectiv principal investigarea mecanismelor de generare a zgomotului aerodinamic asociat paletelor de turbomașini și evaluarea eficienței soluțiilor pasive de tip serații, printr-o abordare integrată experimentală și numerică. Studiul a evidențiat caracterul profund interdependent al fenomenelor aerodinamice și acustice, confirmând faptul că zgomotul generat de palete este rezultatul direct al interacțiunii dintre structura curgerii turbulente și geometria profilului, în special în zona bordului de atac.

Rezultatele obținute arată că soluțiile de tip serații pot conduce la reduceri semnificative ale nivelului global de presiune acustică, însă eficiența acestora este puternic condiționată de parametrii geometrici, de caracteristicile turbulenței incidente și de configurația de montaj a paletelor. În acest sens, teza a demonstrat că ipotezele și concluziile formulate pentru palete izolate nu pot fi transferate

automat către palete aflate în rețea, unde apar mecanisme suplimentare de interacțiune aerodinamică și acustică.

Prin dezvoltarea unei instalații experimentale dedicate și prin analiza comparativă a mai multor configurații geometrice, a fost posibilă identificarea unor tendințe clare privind comportamentul aeroacustic al paletelor serate. Aceste rezultate contribuie la o mai bună înțelegere a fenomenului și oferă o bază pentru utilizarea controlată a serațiilor în aplicații reale de turbomașini și nu numai.

## **8.2. Noutatea tezei**

Noutatea principală a tezei constă în investigarea sistematică a comportamentului aeroacustic al paletelor serate nu doar în configurație de profil izolat, ci și în configurație de rețea, o abordare relativ rar întâlnită în literatura de specialitate, în ciuda relevanței sale practice evidente. Această direcție a permis evidențierea unor particularități specifice paletelor aflate în rețea, care nu pot fi surprinse prin studii clasice pe profile izolate.

Un alt element de originalitate îl reprezintă corelarea directă între parametrii geometrici ai serațiilor, caracteristicile turbulenței incidente și răspunsul acustic global (nivel de presiune acustică precum și defazarea fluctuațiilor de presiune în lungul paletei), pe baza unui set coerent de experimente controlate (unghiuri de instalare, parametri diverși pentru serații). Prin această abordare, teza depășește nivelul analizei calitative și oferă rezultate cuantificabile, utile pentru evaluarea comparativă a soluțiilor constructive.

De asemenea, formularea unor relații experimentale și semi-empirice derivate din date reale, adaptate configurațiilor studiate, reprezintă un aport original, având în vedere limitele modelelor analitice clasice în descrierea completă a fenomenelor aeroacustice în condiții reale de funcționare.

## **8.3. Contribuții personale**

Contribuțiile originale ale tezei se regăsesc într-un demers coerent, care integrează analiza critică a literaturii de specialitate, dezvoltarea experimentală și modelarea numerică, cu scopul de a aprofunda înțelegerea mecanismelor aeroacustice asociate paletelor de turbomașini echipate cu soluții pasive de tip serații. Un prim aport semnificativ constă în realizarea unei sinteze critice a soluțiilor pasive existente pentru reducerea zgomotului aerodinamic, cu accent pe aplicații relevante pentru turbomașini și motoare aeronautice. Această analiză a permis identificarea limitelor abordărilor existente și a evidențiat caracterul insuficient explorat al studiilor dedicate paletelor aflate în rețea, contribuind la clarificarea direcțiilor de cercetare abordate ulterior în teză.

O contribuție majoră o reprezintă proiectarea, realizarea și validarea unei instalații experimentale miniaturizate, dedicate studiului interacțiunii dintre jetul turbulent și palete cu sau fără serații. Standul experimental, realizat în mare parte prin tehnici de fabricație aditivă (printare 3D cu diferite materiale), a fost conceput astfel încât să permită controlul parametrilor globali ai curgerii și ai turbulenței incidente, precum intensitatea turbulenței și lungimea caracteristică (cu o predimensionare și o simulare în prealabil a traseului de curgere și a elementelor introduse în canalul convergent). În acest context, s-au realizat analize numerice ce vizează aerodinamica traseului de curgere, precum și calcule analitice ale spectrelor de turbulență generate de grile (propușe inițial în mai multe variante pentru apropierea de benzile relevante, din jurul BPF), urmat de validarea experimentală a acestuia, asigurând astfel consistența dintre ipotezele teoretice, simulări și măsurători.

Teza aduce contribuții originale și prin investigarea experimentală a paletelor cu modificări în zona bordului de atac (denumite serații pe parcursul tezei) dispuse în rețea. Analiza comparativă a paletelor cu profil aerodinamic constant pe lungime, cu serații aplicate pe bordul de atac și/sau pe bordul de fugă, a permis evidențierea unor particularități spectrale și spațiale ale zgomotului generat,

în funcție de geometrie, poziționarea microfoanelor și banda de frecvență analizată. Aceste rezultate completează literatura existentă, oferind date experimentale originale pentru configurații rar investigate anterior. Ordinul de mărime a reducerilor nivelelor de presiune acustică obținute în campaniile experimentale sunt comparabile cu cele identificate în literatură, pe unele benzi de frecvență fiind identificate performanțe mai bune, specifice apariției fenomenelor de interferență distructivă (ceea ce era de așteptat pentru configurația tip rețea).

Un aport important al lucrării îl constituie extinderea analizei acustice către evaluarea câmpului acustic pe o zonă spațială extinsă, prin utilizarea unui arc mobil echipat cu un aranjament de 13 microfoane. Adaptarea instalației experimentale pentru măsurători pe calotă sferică a permis obținerea unei imagini detaliate a distribuției spațiale a nivelului de presiune acustică. S-au dezvoltat metode proprii de procesare (codurile fiind atașate lucrării), interpolare și vizualizare a câmpului acustic, inclusiv reprezentări sub formă de lobi acustici (prin intermediul simulărilor numerice de tip CFD), care au facilitat compararea directă a diferitelor configurații de palete și identificarea particularităților direcționale ale zgomotului.

Contribuțiile tezei se extind și în zona modelării/prelucrării datelor experimentale, prin formularea unor legi semi-empirice pentru estimarea nivelului de presiune acustică în funcție de parametri geometrici și de funcționare. Pe baza unor seturi ample de date experimentale, s-au aplicat și dezvoltat tehnici de regresie funcțională și metode de tip ensemble learning, obținând relații polinomiale, exponențiale, logaritmice și sinusoidale capabile să surprindă tendințele globale ale zgomotului generat. Analizele statistice de tip ANOVA și aplicarea algoritmilor de regresie Random Forest au permis cuantificarea contribuției fiecărui parametru asupra zgomotului global și evaluarea robusteții modelelor propuse (o analiză de o complexitate atât de ridicată pe acest subiect nefiind identificată în literatura de specialitate).

În completarea abordării experimentale, teza contribuie printr-o analiză numerică avansată a paletelor cu serații aflate în rețea, prin compararea predicțiilor obținute cu diverse modele de turbulență cu rezultatele experimentale. Studiile numerice au evidențiat rolul diferitelor regiuni ale paletei în generarea zgomotului și au permis identificarea benzilor de frecvență pentru care se poate obține un acord satisfăcător între simulări și măsurători, inclusiv prin utilizarea unor modele RANS mai puțin costisitoare din punct de vedere computațional. Această abordare oferă o perspectivă realistă asupra utilizării modelelor numerice în proiectarea aeroacustică, subliniind atât potențialul, cât și limitările acestora.

#### **8.4. Perspective pentru dezvoltare ulterioară**

Rezultatele obținute în cadrul acestei teze deschid mai multe direcții de cercetare viitoare. O primă perspectivă o reprezintă extinderea studiului către un domeniu mai larg de parametri de funcționare, incluzând variații ale vitezei curgerii, ale nivelului de turbulență și ale unghiului de incidență, pentru a evalua robustețea soluțiilor de tip serații.

De asemenea, integrarea unor metode numerice avansate, precum simulările CFD cuplate aeroacustic, ar putea permite o analiză mai detaliată a mecanismelor locale de generare a zgomotului și o validare suplimentară a relațiilor experimentale propuse. O altă direcție de interes este investigarea serațiilor tridimensionale (cu formă complexă, nu doar sinusoidală) și a combinațiilor de soluții pasive, în vederea obținerii unor reduceri acustice sporite fără penalizări aerodinamice semnificative.

Nu în ultimul rând, metodologia dezvoltată în această teză poate fi extinsă și adaptată pentru alte aplicații ingineresti, precum turbinele eoliene, turbine pentru instalații de cogenerare, ventilatoarele industriale sau sistemele de ventilație, contribuind astfel la transferul rezultatelor către domenii conexe și la consolidarea cercetării aeroacustice aplicate.

## LUCRĂRI PUBLICATE ȘI PROIECTE

### I. Lucrări în jurnale WOS în domeniul lucrării de doctorat

- **Totu, A.-G.**, Cican, G., & Crunțeanu, D.-E. (2024). Serrations as a Passive Solution for Turbomachinery Noise Reduction. *Aerospace*, 11(4), 292. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040292> (*Aerospace*, Q2)
- **Totu, A.-G.**, Olariu, C.-T., Trifu, A.-T., Totu, A.-C., & Cican, G. (2024). Development and Assessment of a Miniaturized Test Rig for Evaluating Noise Reduction in Serrated Blades Under Turbulent Flow Conditions. *Acoustics*, 6(4), 978-996. <https://doi.org/10.3390/acoustics6040054> (*Acoustics*, Q3)
- **Totu, Andrei-George**, Marius Deaconu, Laurențiu Cristea, Alina Bogoi, Daniel-Eugeniu Crunțeanu, and Grigore Cican. 2024. "Experimental Analysis of Acoustic Spectra for Leading/Trailing-Edge Serrated Blades in Cascade Configuration" *Processes* 12, no. 11: 2613. <https://doi.org/10.3390/pr12112613> (*Processes*, Q2)
- **Totu, A.-G.**; Crunțeanu, D.-E.; Deaconu, M.; Cican, G.; Cristea, L.; Levențiu, C. Application of Passive Serration Technologies for Aero-Engine Noise Control in Turbulent Inflow Environments. *Technologies* 2025, 13, 363. <https://doi.org/10.3390/technologies13080363> (*Technologies*, Q1)
- **Totu, A.-G.**; Crunțeanu, D.-E.; Drăgășanu, L.; Cican, G.; Levențiu, C. SPL-Based Modeling of Serrated Airfoil Noise via Functional Regression and Ensemble Learning. *Computation* 2025, 13, 203. <https://doi.org/10.3390/computation13090203> (*Computation*, Q2)
- **Totu, A.-G.**; Crunțeanu, D.-E.; Isvoranu D.; Bio-Inspired Blade Cascades: Numerical Predictions versus Experimental Measurements, *Biomimetics* 2026, 11(3), 199; <https://doi.org/10.3390/biomimetics11030199> (*Biomimetics*, Q1)

### II. Participare la conferințe cu lucrări pe tematica lucrării de doctorat

- **Totu, A.-G.**; Crunțeanu, D.-E.; Cican, G.; *Aeroacoustic Directivity of Serrated Blades under Turbulent Jet Interaction*, CEAS/AIDAA 2025 Conference, 1-4 December 2025

## REFERINȚE

- [1] Azimi, Mohammadreza & Ommi, Fathollah. (2014). Fan Noise Sources and Passive Reduction Methodologies in High Bypass Turbofan Engines. *Noise & Vibration Worldwide*. 45. 18-22. 10.1260/0957-4565.45.5.18.
- [2] Paruchuri, Chaitanya. (2017). Aerofoil geometry effects on turbulence interaction noise, University of Southampton, Teză de doctorat
- [3] Weger M, Wagner H (2016) Morphological Variations of Leading-Edge Serrations in Owls (Strigiformes). *PLoS ONE* 11(3): e0149236. doi:10.1371/journal.pone.0149236
- [4] Fish, Frank & Weber, Paul & Murray, M. & Howle, Laurens. (2011). The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology. *Integrative and comparative biology*. 51. 203-13. 10.1093/icb/icr016.
- [5] B. Lyu, M. Azarpeyvand, On the noise prediction for serrated leading edges, *Journal of Fluid Mechanics* 826, DOI: 10.1017/jfm.2017.429
- [6] M. Gruber, Airfoil noise reduction by edge treatments, University of Southampton, Teză de doctorat, 2012
- [7] T. M. Biedermann, F. Kameier, C. O. Paschereit, Statistical–Empirical Modeling of Airfoil Noise Subjected to Leading-Edge Serrations, *AIAA JOURNAL*, DOI: 10.2514/1.J055633
- [8] J. Ryi, J. Choi, Estimation Method to Achieve a Noise Reduction Effect of Airfoil with a Serrated Trailing Edge for Wind Turbine Rotor, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73608>

- [9] B. Lyu, Mahdi Azarpeyvand, Samuel Sinayoko, Prediction of noise from serrated trailing edges, *Journal of Fluid Mechanics*, 2016
- [10] Yuan Tian, Benjamin Cotté, Antoine Chaigne. Wind Turbine Noise Modelling Based on Amiet's Theory. 5th International Meeting on Wind Turbine Noise, Aug 2013, Denver, CO, United States. CD-ROM proceedings. fhal-00975237f
- [11] Stefan Oerlemans, Peter Fuglsang, Low-noise wind turbine design, SIEMENS AG 2012
- [12] Paruchuri, Chaitanya & Subramanian, Narayanan & Joseph, Phillip & Kim, Jae. (2016). Leading edge serration geometries for significantly enhanced leading edge noise reductions. 10.2514/6.2016-2736.
- [13] Brooks T. F., Pope D.S., Marcolini M.A., Airfoil Self-Noise and Prediction, NTRS, Document ID 19890016302, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19890016302>
- [14] Al Tlua B., Experimental Wind Tunnel Testing and Numerical Optimization Studies for Airfoil Trailing Edge Noise Reduction, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Teză de doctorat, 2021
- [15] Alex Siu Hong Lau, Xun Huang, The control of aerodynamic sound due to boundary layer pressure gust scattering by trailing edge serrations, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 432, 2018, Pages 133-154, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.026>.
- [16] Alex S.H. Lau, Sina Haeri, Jae Wook Kim, The effect of wavy leading edges on aerofoil-gust interaction noise, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 332, Issue 24, 2013, Pages 6234-6253, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.06.031>.
- [17] Cyril Polacsek, Vincent Clair, Gabriel Reboul, Hugues Deniau. Turbulence-airfoil interaction noise reduction using wavy leading edge: an experimental and numerical study. Institute of Noise Control Engineering/Japan & Acoustical Society of Japan, Sep 2011, Osaka, Japan. pp.170-180. fhal02086677
- [18] NASA@SC15, Computational Aeroacoustic Open-Rotor Simulations for Green Aviation, Disponibil la <https://www.nas.nasa.gov/SC15/demos/demo8.html#prettyPhoto>
- [19] Shyam, Vikram & Ameri, Ali & Poinsette, Philip & Thurman, Douglas & Wroblewski, Adam & Snyder, Christopher. (2015). Application of Pinniped Vibrissae to Aeropropulsion. V02AT38A023. 10.1115/GT2015-43055.
- [20] Ito S., Aerodynamic Influence of Leading-Edge Serrations on an Airfoil in a Low Reynolds Number – A Study of an Owl Wing with Leading Edge Serrations-, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.4, No.1, 2009, DOI:10.1299/jbse.4.117
- [21] Paruchuri, Chaitanya, Joseph, Phillip, Narayanan, Subramanyam, Vanderwel, Christina, Turner, Jacob, Kim, Jae and Ganapathisubramani, Bharathram (2017) Performance and mechanism of sinusoidal leading edge serrations for the reduction of turbulence-aerofoil interaction noise. University of Southampton doi:10.5258/SOTON/405263
- [22] Carlos Arce León, Daniele Ragni, Stefan Pröbsting, Fulvio Scarano, Jesper Madsen, Flow topology and acoustic emissions of trailing edge serrations at incidence, *Exp Fluids* (2016) 57:91, DOI 10.1007/s00348-016-2181-1
- [23] M.S. Howe, Noise Produced by a Sawtooth Trailing Edge, *The Journal of the Acoustical Society of America* 90, 482 (1991)
- [24] Paterson W, Amiet R. K., Acoustic radiation and surface pressure response of an airfoil due to incident turbulence, NASA CR-2733
- [25] R. K. Amiet, Acoustic Radiation from an Airfoil in a Turbulent Stream, *Journal of Sound and Vibration* (1975) 41(4), 407--420
- [26] R. K. Amiet, Airfoil Gust Response and The Sound Produced By Airfoil-Vortex Interaction, United Technologies Research Center East Hartford, Connecticut
- [27] Curle, N. "The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 231, no. 1187 (1955): 505–14. <http://www.jstor.org/stable/99804>.
- [28] Lighthill, M. J. „On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 211, No. 1107 (Mar. 20, 1952), pp. 564-587, <http://www.jstor.org/stable/98943>
- [29] Liu, X. , Kamliya Jawahar, H., & Azarpeyvand, M. (2016). Wake Development of Airfoils with Serrated Trailing Edges. In 22nd AIAA CEAS Aeroacoustics Conference [AIAA 2016-2817] American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA). <https://doi.org/10.2514/6.2016-2817>

- [30] Woodhead, P.C., Chong, T.P., Joseph, P.F. et al. Aerofoil self-noise radiations subjected to serration flap angles. *Exp Fluids* 62, 152 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03239-y>
- [31] Dvorak P., Siemens low noise wind turbine blades inspired by silent flight of the owl, September 28, 2016, Preluat din <https://www.windpowerengineering.com/siemens-low-noise-wind-turbine-blades-inspired-silent-flight-owl/>
- [32] Sears, W. R., 1941, Some aspects of non-stationary airfoil theory and its practical application. *Journal of the Aeronautical Sciences* 8, 104–108.
- [33] Benshuai Lyu, Lorna J. Ayton, Rapid noise prediction models for serrated leading and trailing edges, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02645>
- [34] F. Tong, W. Qiao, W. Chen, H. Cheng, R. Wei, X. Wang, Numerical analysis of broadband noise reduction with wavy leading edge, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.03.020>
- [35] Liu, Xiao & Kamliya Jawahar, Hasan & Azarpeyvand, Mahdi & Theunissen, R.. (2015). Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Serrated Airfoils. 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 10.2514/6.2015-2201.
- [36] Soderman, P.T. 1972 Aerodynamic effects of leading-edge serrations on a two- dimensional airfoil. Tech. Rep.. NASA TM X-2643.
- [37] Hersh, A.S., Soderman, P.T. & Hayden, R.E. 1974 Investigation of acoustic effects of leading edge serrations on airfoils. *Journal of Aircraft* 11(4), 197–202
- [38] D. J. Moreau, On the noise reduction mechanism of a flats plate serrated trailing edge at low-to-moderate Reynolds number, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference) 04 - 06 June 2012, Colorado Springs, CO
- [39] Lianjie Liu, Liangliang Zhang, Bo Wu and Ben Chen, Numerical and Experimental Studies on Grid-Generated Turbulence in Wind Tunnel, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 10 (3) (2017) 159-169
- [40] S. Narayanan, Airfoil noise reductions through leading edge serrations, University of Southampton, Highfield, Southampton-SO17 1BJ, UK
- [41] Subramanian, Narayanan & Joseph, Phillip & Haeri, Sina & Kim, Jae & Paruchuri, Chaitanya & Polacsek, C.. (2014). Noise Reduction Studies from the Leading Edge of Serrated Flat Plates. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, USA. 10.2514/6.2014-2320.
- [42] Clair, Vincent & Polacsek, C. & Garrec, Le & Reboul, Gabriel. (2012). CAA methodology to simulate turbulence-airfoil noise. 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference). 10.2514/6.2012-2189.
- [43] Christopher Teruna, Francesco Avallone, Damiano Casalino, Daniele Ragni, Numerical investigation of leading edge noise reduction on a rod-airfoil configuration using porous materials and serrations, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 494, 2021, 115880, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115880>.
- [44] Agrawal, Bharat Raj, "Modeling fan broadband noise from jet engines and rod-airfoil benchmark case for broadband noise prediction" (2015). Graduate Theses and Dissertations. 14326. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/14326>
- [45] A. Aravind Raghavan Sreenivasan and B. Kannan Iyer , "Enhanced wall turbulence model for flow over cylinder at high Reynolds number", *AIP Advances* 9, 095012 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5118421>
- [46] Turner, J., & Kim, J. (2022). Quadrupole noise generated from a low-speed aerofoil in near- and full-stall conditions. *Journal of Fluid Mechanics*, 936, A34. doi:10.1017/jfm.2022.75
- [47] Weger M, Wagner H (2016) Morphological Variations of Leading-Edge Serrations in Owls(Strigiformes). *PLoS ONE* 11(3): e0149236. doi:10.1371/journal.pone.0149236
- [48] Cyril Polacsek, Vincent Clair, Gabriel Reboul, Hugues Deniau. Turbulence-airfoil interaction noise reduction using wavy leading edge: an experimental and numerical study. Institute of Noise Control Engineering/Japan & Acoustical Society of Japan, Sep 2011, Osaka, Japan. pp.170-180. fhal02086677
- [49] Jiang, Min & Li, Xiaodong & Zhou, Jia-jian. (2011). Experimental and numerical investigation on sound generation from airfoil-flow interaction. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*. 32. 765-776. 10.1007/s10483-011-1456-7.
- [50] Greschner, Björn & Peth, S. & Moon, Young & Seo, Jung Hee & Jacob, Marc & Thiele, Frank. (2007). Three-dimensional predictions of the rod wake-airfoil interaction noise by hybrid methods. 14th International Congress on Sound and Vibration 2007, ICSV 2007. 2. 1599-1610.



- [51] Lianjie Liu, Liangliang Zhang, Bo Wu and Ben Chen, Numerical and Experimental Studies on Grid-Generated Turbulence in Wind Tunnel, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 10 (3) (2017) 159-169
- [52] Hales ADG, Ayton LJ, Wills AO, et al. A mathematical model for the interaction of anisotropic turbulence with porous surfaces. *Journal of Fluid Mechanics*. 2024;1001:A16. doi:10.1017/jfm.2024.1067
- [53] Ito S., Aerodynamic Influence of Leading-Edge Serrations on an Airfoil in a Low Reynolds Number – A Study of an Owl Wing with Leading Edge Serrations-, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.4, No.1, 2009, DOI:10.1299/jbse.4.117
- [54] Kim, J., Haeri, S., & Joseph, P. (2016). On the reduction of aerofoil–turbulence interaction noise associated with wavy leading edges. *Journal of Fluid Mechanics*, 792, 526-552. doi:10.1017/jfm.2016.95
- [55] Lacagnina, Giovanni & Paruchuri, Chaitanya & Kim, Jung-Hoon & Berk, Tim & Joseph, Phillip & Choi, Kwing-So & Ganapathisubramani, Bharathram & Hasheminejad, Seyed Mohammad & Chong, Tze & Stalnov, Oksana & Shahab, Muhammad & Omidyeganeh, Mohammad & Pinelli, Alfredo. (2020). Leading edge serrations for the reduction of aerofoil self-noise at low angle of attack, pre-stall and post-stall conditions. *International Journal of Aeroacoustics*. 20. 10.1177/1475472X20978379.
- [56] Salama, Yehia. “Experimental and Numerical Investigation of Bio-Inspired Airfoil Trailing-Edge Designs for Noise Reduction.” .
- [57] Rajeshwaran, M.S. & Kushari, Abhijit. (2015). Experimental Study on the Flow Past Sinusoidal Leading Edge Serrations in a Compressor Cascade. V001T01A017. 10.1115/GTINDIA2015-1334.
- [58] Smith, E.G., Sowers, H.D., Cascade tests of serrated leading edge blading at high subsonic speeds, 1974, NASA CR-2472
- [59] Qiao, W & Ji, L & Tong, W & Xu, K & Chen, W. (2014). Application of Phased Array in the Study of Linear Cascade Noise Reduction on the Indoor Test Bed.
- [60] Craig, Mary E.. “Trailing-Edge Blowing of Model Fan Blades for Wake Management.” (2005).
- [61] Geiger, Derek. (2005). Comparative Analysis of Serrated Trailing Edge Designs on Idealized Aircraft Engine Fan Blades for Noise Reduction.
- [62] Ye, Xuemin & Zheng, Nan & Zhang, Ruixing & Li, Chunxi. (2022). Effect of serrated trailing-edge blades on aerodynamic noise of an axial fan. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 36. 2937-2948. 10.1007/s12206-022-0526-7.
- [63] Teruna, Christopher & Ragni, Daniele & Avallone, Francesco & Casalino, Damiano. (2019). A rod-linear cascade model for emulating rotor-stator interaction noise in turbofans: A numerical study. *Aerospace Science and Technology*. 90. 10.1016/j.ast.2019.04.047.
- [64] Liu, X. , Zang, B., & Azarpeyvand, M. (2022). Wake-aerofoil interaction noise control with trailing-edge serrations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, [110510]. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110510>
- [65] Alkhalifa, A.S.; Uddin, M.N.; Atkinson, M. Aerodynamic Performance Analysis of Trailing Edge Serrations on a Wells Turbine. *Energies* 2022, 15, 9075. <https://doi.org/10.3390/en15239075>
- [66] Cyril Polacsek, Adil Cader, Martin Buszyk, Raphaël Barrier, Fernando Gea-Aguilera, et al.. Aeroacoustic Design and Broadband Noise Predictions of a Fan Stage with Serrated Outlet Guide Vanes. *Physics of Fluids*, 2020, 32 (10), ff10.1063/5.0020190ff. fffhal-02968328v2f
- [67] Filamentive Limited, PLA/rPLA, Fișă de material, Disponibil la <https://www.farnell.com/datasheets/2913593.pdf>
- [68] C. Polacsek, R Barrier, M. Kohlhaas, T. Carolus, P. Kausche, et al.. Turbofan Interaction Noise Reduction Using Trailing Edge Blowing: Numerical Design and Assessment and Comparison with Experiments.V2. *Aerospace Lab*, 2014, 7, p. 1-9. ff10.12762/2014.AL07-03ff. fffhal-01184670f
- [69] Westley, R., & Lilley, G.M. (1952). An Investigation of the Noise Field from a Small Jet and Methods for its Reduction. *College of Aeronautics Report*.
- [70] Biedermann, T.M.; Czeckay, P.; Hintzen, N.; Kameier, F.; Paschereit, C.O. Applicability of Aeroacoustic Scaling Laws of Leading Edge Serrations for Rotating Applications. *Acoustics* 2020, 2, 579-594. <https://doi.org/10.3390/acoustics2030030>
- [71] Lee, H.M., Lim, K.M., Xie, J., & Lee, H.P., Experimental Study on the Half Flat Tip Serrated Trailing Edge for Stand Fan. *Archives of Acoustics*. 45, 2, pp. 359–365, 2020, DOI: 10.24425/aoa.2020.133156
- [72] Becker, S. & Riedel, Jörg & Kaltenbacher, Manfred & Schoder, Stefan & Czwielong, Felix. (2022). ON THE FLUID MECHANICAL AND ACOUSTIC MECHANISMS OF SERRATED LEADING EDGES. 10.26083/tuprints-00021712.

- [73] Chen, L.; Yang, P.; Zhang, B.; Chen, L. Aerodynamic Enhancement of Vertical-Axis Wind Turbines Using Plain and Serrated Gurney Flaps. *Appl. Sci.* 2023, 13, 12643. <https://doi.org/10.3390/app132312643>
- [74] Qaissi, K.; Elsayed, O.; Faqir, M.; Essadiqi, E. Aerodynamic Optimization of Trailing-Edge Serrations for a Wind Turbine Blade Using Taguchi Modified Additive Model. *Energies* 2023, 16, 1099. <https://doi.org/10.3390/en16031099>
- [75] Tay, Wb., Lu, Z., Ramesh, S.S., Khoo, Bc. (2020). Numerical Simulations of Serrated Propellers to Reduce Noise. In: Panda, D. (eds) *Supercomputing Frontiers. SCFA 2020. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 12082. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48842-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48842-0_6); Accesat la 09.07.2024
- [76] Hsiao Mun Lee, Zhenbo Lu, Kian Meng Lim, Jinlong Xie, Heow Pueh Lee, Quieter propeller with serrated trailing edge, *Applied Acoustics*, Volume 146, 2019, Pages 227-236, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.020>.
- [77] Tam C.K.W, Viswanathan K, Ahuja K.K., Panda J. The sources of jet noise: experimental evidence. *Journal of Fluid Mechanics.* 2008; 615:253-292. doi:10.1017/S0022112008003704
- [78] Auris Juknevičius, Tze Pei Chong, On the leading edge noise and aerodynamics of thin aerofoil subjected to the straight and curved serrations, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 425, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.038>; Accesat la 09.07.2024
- [79] Leandro Rego, Francesco Avallone, Daniele Ragni, Damiano Casalino, On the mechanisms of jet-installation noise reduction with flow-permeable trailing edges, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 520, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116582>; Accesat la 09.07.2024
- [80] Vieira, A. E., von den Hoff, B., Snellen, M., & Simons, D. G. (2022). Comparison of Semi-Empirical Noise Models with Flyover Measurements of Operating Aircraft. *Journal of Aircraft*, 59(6), 1574-1587. <https://doi.org/10.2514/1.C036387>
- [81] Brenda S. Henderson, Dennis L. Huff, Jeffrey J. Berton, Jet Noise Prediction Comparisons with Scale Model Tests and Learjet Flyover Data, Book Chapter, 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 10.2514/6.2019-2768
- [82] Danny Lewis, Jérôme de Laborderie, Marlène Sanjosé, Stéphane Moreau, Marc C. Jacob, Vianney Masson, Parametric study on state-of-the-art analytical models for fan broadband interaction noise predictions, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 514, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116423>; Accesat la 09.07.2024
- [83] Raposo, Henrique & Azarpeyvand, Mahdi. (2024). Turbulence ingestion noise generation in rotating blades. *Journal of Fluid Mechanics.* 980. 10.1017/jfm.2024.7.
- [84] Zorumski, W. E., Weir, D. S., Empirical source noise prediction method with application to subsonic coaxial jet mixing noise, NASA TP 2084 c.1, disponibil la <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830007878>
- [85] Powell, Alan. "On the Generation of Noise by Turbulent Jets.", The American Society of Mechanical Engineers, AD-A286 649, 1959
- [86] Seoud, Rich E. E. and John Christos Vassilicos. "Dissipation and decay of fractal-generated turbulence." *Physics of Fluids* 19 (2007): 105108.
- [87] Trevor A. Stout, Kent L. Gee, Tracianne B. Neilsen, Alan T. Wall, Michael M. James; Intensity analysis of the dominant frequencies of military jet aircraft noise. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2 December 2013; 20 (1): 040010. <https://doi.org/10.1121/1.4895772>
- [88] Cyril Polacsek, Martin Buszyk, Raphaël Barrier, Vincent Clair, Edouard Salze. Aeroacoustic performances of a low-noise airfoil cascade with serrated leading edges: predictions and measurements. ICAS 2022, Sep 2022, STOCKHOLM, Sweden. hal-03938107
- [89] Abbas, M.; Riggins, D.W. Analysis of Energy Utilization and Losses for Jet-Propelled Vehicles. *Aerospace* 2021, 8, 342. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110342>
- [90] Foggi Rota, G., Monti, A., Rosti, M.E. et al. Saving energy in turbulent flows with unsteady pumping. *Sci Rep* 13, 1299 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28519-x>
- [91] Mahmoudi, Mahsa & Banihashemi, Mohammad. (2023). Turbulence effect on total mechanical energy budget and energy loss of turbulent flows with different hydraulic regimes in open-channel transitions. *ISH Journal of Hydraulic Engineering.* 30. 10.1080/09715010.2023.2276924.
- [92] Wilson, David K., Three-Dimensional Correlation and Spectral Functions for Turbulent Velocities in Homogeneous and Surface-Blocked Boundary Layers, ARMY RESEARCH LAB ADELPHI MD, ADA327709, disponibil la <https://apps.dtic.mil/sti/citations/tr/ADA327709>

- [93] Ragni, D., Fiscaletti, D. & Baars, W.J. Jet noise predictions by time marching of single-snapshot tomographic PIV fields. *Exp Fluids* 63, 84 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03436-3>; Accesat la 09.07.2024
- [94] Riccardo da Soghe, Luca Innocenti, Antonio Andreini, Sébastien Poncet. Numerical Benchmark of Turbulence modelling in Gas Turbine Rotor-Stator System. ASME TURBO EXPO 2010: Power for Land, Sea & Air (GT2010), Jun 2010, Glasgow, United Kingdom. <https://hal.science/hal-00679123>
- [95] Maxime Fiore, Nicolas Gourdain. Reynolds, Mach, and Freestream Turbulence Effects on the Flow in a Low-Pressure Turbine. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143 (10), pp.101009-101002. <https://hal.science/hal-03238795>
- [96] Michel, Ulf & Ahuja, Krishan, On the Scaling of Jet Noise with Helmholtz Number Close to the Jet Axis., 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2014, DOI:10.2514/6.2014-2338.
- [97] Rajeshwaran, M.S. & Kushari, Abhijit. (2015). Experimental Study on the Flow Past Sinusoidal Leading Edge Serrations in a Compressor Cascade. V001T01A017. 10.1115/GTINDIA2015-1334.
- [98] Salehian, S.; Mankbadi, R. Jet Noise in Airframe Integration and Shielding. *Appl. Sci.* 2020, 10, 511. <https://doi.org/10.3390/app10020511>
- [99] Gabriele Grasso, P. Jaiswal, Hao Wu, Stéphane Moreau, Michel Roger. Analytical models of the wall-pressure spectrum under a turbulent boundary layer with adverse pressure gradient. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 877, pp.1007-1062., disponibil la <https://hal.science/hal-03158378>
- [100] Shahzad, H., Hickel, S. & Modesti, D. Permeability and Turbulence Over Perforated Plates. *Flow Turbulence Combust* 109, 1241–1254 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00337-7>; Accesat la 09.07.2024
- [101] Sravani Vemulapalli, Santhosh Krishnan Venkata, Parametric analysis of orifice plates on measurement of flow: A review, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 3, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.008>; Accesat la 09.07.2024
- [102] Yulian Pramiyanti, Suzairin Md Seri, Azwan Sapit, Incompressible Turbulent Swirling Flow through Circle Grid Perforated Plate, *Journal of Complex Flow*, Vol. 2 No. 1 (2020) p. 11-16
- [103] Larssen, Jon V., Devenport, William J., On the generation of large-scale homogeneous turbulence, *Experiments in Fluids*, 2011, <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0974-1>; Accesat la 09.07.2024
- [104] Christopher Teruna, Daniele Ragni, Francesco Avallone, Damiano Casalino, A rod-linear cascade model for emulating rotor-stator interaction noise in turbofans: A numerical study, *Aerospace Science and Technology*, Volume 90, 2019, Pages 275-288, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.047>.
- [105] Prince, Simon & Khodagolian, V. & Gaiind, R.. (2012). An experimental study of a pulsed air jet and an acoustic synthetic jet on a low speed turbulent boundary layer. 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012, ICAS 2012. 2. 1005-1014.
- [106] Blake, J.D.; Sescu, A.; Thompson, D.; Hattori, Y. A Coupled LES-Synthetic Turbulence Method for Jet Noise Prediction. *Aerospace* 2022, 9, 171. <https://doi.org/10.3390/aerospace9030171>
- [107] Dieste, M., Gabard, G., Broadband Interaction Noise Simulations Using Synthetic Turbulence, *The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration*, Krakow, Iulie 2009
- [108] dos Santos, Fernanda Leticia & Botero Bolivar, Laura & Venner, C. & Santana, Leandro. (2021). Modelling the Dissipation Range of von Kármán Turbulence Spectrum. 10.2514/6.2021-2292.
- [109] Philips, C., Bandyopadhyay, R., McComas, D.J., Taylor Microscale and Effective Reynolds Number near the Sun from PSP, *The Astrophysical Journal*, Volume 933, Number 1, DOI 10.3847/1538-4357/ac713f
- [110] Wang, Bing & Manhart, Michael. (2012). Two-phase micro- and macro-time scales in particle-laden turbulent channel flows. *Acta Mechanica Sinica*. 28. 10.1007/s10409-012-0034-6.
- [111] Li D, Salesky ST, Banerjee T. Connections between the Ozmidov scale and mean velocity profile in stably stratified atmospheric surface layers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;797:R3. doi:10.1017/jfm.2016.311
- [112] Wang, G-H, Clemens, N.T., Barlow, R.S., Varghese, P.L., A system model for assessing scalar dissipation measurement accuracy in turbulent flows, *Measurement Science and Technology*, Volume 18, Number 15, DOI 10.1088/0957-0233/18/5/015
- [113] Essa, K.S.M. (2000). Estimation of MONIN-OBUKHOV length using richardson and bulk richardson number. In Hanna, K.M. (Ed.). *Proceedings of the Second Conference on Nuclear and Particle Physics (NUPPAC-99)*, (p. 711). Egypt
- [114] Dong S, Huang Y, Yuan X, Lozano-Durán A. The coherent structure of the kinetic energy transfer in shear turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020;892:A22. doi:10.1017/jfm.2020.195

- [115] Kim, Sehoon & Jung, & Kong, & Lee, Kunwoo & An, Yun-Kyu. (2019). In-Situ Data-Driven Buffeting Response Analysis of a Cable-Stayed Bridge. *Sensors*. 19. 3048. 10.3390/s19143048.
- [116] Suresh Palani, Chaitanya C. Paruchuri, Phillip Joseph, Sergey A. Karabasov, Annabel Markesteijn, Hussain Abid, Tze Pei Chong and Sergey Utyuzhnikov. "Modified TNO-Blake model for aerofoil surface pressure prediction with canopies," AIAA 2023-3203. AIAA AVIATION 2023 Forum. Iunie 2023.
- [117] Goldstein, Marvin E., The 90 deg Acoustic Spectrum of a High Speed Air Jet, NASA E-14396, disponibil la <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050196696>
- [118] McLaughlin, Dennis & Kuo, Ching-Wen & Papamoschou, Dimitri. (2008). Experiments on the Effect of Ground Reflections on Supersonic Jet Noise. 10.2514/6.2008-22.
- [119] Lianjie Liu, Liangliang Zhang, Bo Wu and Ben Chen, Numerical and Experimental Studies on Grid Generated Turbulence in Wind Tunnel, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 10 (3) (2017) 159-169
- [120] Rutherford, Dan. 2025. "The International Civil Aviation Organization's CAEP/13 Aircraft Noise Standards." Disponibil la [https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/05/ID-358-%E2%80%93-Noise-standard\\_ICAO\\_final.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/05/ID-358-%E2%80%93-Noise-standard_ICAO_final.pdf).
- [121] "EASA Certification Noise Levels." n.d. EASA. Disponibil la <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/easa-certification-noise-levels>.
- [122] Zaporozhets, Oleksandr. (2022). Balanced Approach to Aircraft Noise Management. 10.1007/978-3-030-91194-2\_3.
- [123] "ICAO ENVIRONMENTAL REPORT." n.d., Disponibil la [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016\\_pg38-41.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg38-41.pdf).
- [124] Chaitanya, Paruchuri, Phillip Joseph, Tze Pei Chong, Matthew Priddin, and Lorna Ayton. 2020. "On the Noise Reduction Mechanisms of Porous Aerofoil Leading Edges." *Journal of Sound and Vibration* 485 (October): 115574. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115574>.
- [125] Pollok, Alexander, and Andreas Schröffer. n.d. "AST 2017 SIMULATION of HELMHOLTZ RESONANCE EFFECTS in AIRCRAFT ECS." Accessed Iunie 4, 2025. [https://elib.dlr.de/111334/1/AST2017\\_Paper117\\_Pollok.pdf](https://elib.dlr.de/111334/1/AST2017_Paper117_Pollok.pdf).
- [126] Zhang, Chengchun, Wen Cheng, Tianyu Du, Xiaowei Sun, Chun Shen, Zhengwu Chen, and Dong Liang. 2022. "Experimental and Numerical Study on Noise Reduction of Airfoil with the Bioinspired Ridge-like Structure." *Applied Acoustics* 203 (December): 109190. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109190>.
- [127] Lu, Yu, Ziyang Li, Xin Chang, Zhenju Chuang, and Junhua Xing. 2021. "An Aerodynamic Optimization Design Study on the Bio-Inspired Airfoil with Leading-Edge Tubercles." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 15 (1): 292–312. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1856723>.
- [128] Andrei-George Totu, Grigore Cican, and Daniel-Eugeniu Crunțeanu. 2024. "Serrations as a Passive Solution for Turbomachinery Noise Reduction." *Aerospace* 11 (4): 292–92. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040292>.
- [129] Andrei-George Totu, Marius Deaconu, Laurențiu Cristea, Alina Bogoi, Daniel-Eugeniu Crunțeanu, and Grigore Cican. 2024. "Experimental Analysis of Acoustic Spectra for Leading/Trailing-Edge Serrated Blades in Cascade Configuration." *Processes* 12 (11): 2613–13. <https://doi.org/10.3390/pr12112613>.
- [130] Yu, Xishuai, Jianxi Zhou, and Yong Li. 2025. "Noise Control in Tandem Airfoil Configurations Using Leading-Edge Serrations on the Front Airfoil." *Experiments in Fluids* 66 (5): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00348-025-04033-w>.
- [131] Piccolo, A, R. Zamponi, F Avallone, and D Ragni. 2024. "Turbulence Distortion and Leading-Edge Noise." *Physics of Fluids* 36 (12): 125183. <https://doi.org/10.1063/5.0244627>.
- [132] Geyer, Thomas, Sahan Wasala, and Ennes Sarradj. 2020. "Experimental Study of Airfoil Leading Edge Combs for Turbulence Interaction Noise Reduction." *Acoustics* 2 (2): 207–23. <https://doi.org/10.3390/acoustics2020014>.
- [133] Goldstein, M.E. "Aeroacoustics", McGraw-Hill International. Book Company, 1976. Disponibil la <https://archive.org/details/Aeroacoustics/page/52/mode/2up>.
- [134] "Computational Aeroacoustics-Issues and Methods-Tam1995 - AIAA JOURNAL Vol. 33, No. 10, October 1995 - Studocu." 2019. Studocu. 2019. <https://www.studocu.com/gr/document/eoniko-metsobio-polytexneio/aeroakoustikh/computational-aeroacoustics-issues-and-methods-tam1995/30207542>.

- [135] Steve Cawser, MEng CEng MIOA, Acoustic measurements in airflow, AECOM, Disponibil la [https://www.ioa.org.uk/sites/default/files/Acoustic%20measurements%20in%20airflow%20Mar\\_Apr%202019.pdf](https://www.ioa.org.uk/sites/default/files/Acoustic%20measurements%20in%20airflow%20Mar_Apr%202019.pdf)
- [136] “Welch’s Power Spectral Density Estimate - MATLAB Pwelch.” n.d. [Www.mathworks.com. https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html](https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html).
- [137] “Siemens PLM.” 2019. Siemens.com. 2019. <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flattop-uniform-tukey-and-exponential>.
- [138] “Fourier Analysis and Power Spectral Density 4.1 Fourier Series and Transforms.” n.d. Accessed Iunie 4, 2025. <https://www.fccdecastro.com.br/pdf/FAPSD.pdf>.
- [139] Chan, Stanley. n.d. “ECE 302: Lecture 10.6 Power Spectral Density.” Accessed Iunie 4, 2025. [https://engineering.purdue.edu/ChanGroup/ECE302/files/Slide\\_10\\_06.pdf](https://engineering.purdue.edu/ChanGroup/ECE302/files/Slide_10_06.pdf).
- [140] “Chapter 7 Basic Turbulence.” n.d. <https://www.astronomy.ohio-state.edu/ryden.1/ast825/ch7.pdf>.
- [141] Agrawal, Bharat R, and Anupam Sharma. 2014. “Aerodynamic Noise Prediction for a Rod-Airfoil Configuration Using Large Eddy Simulations.” 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference, Iunie. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3295>.
- [142] Zamponi, R., S. Satcunanathan, S. Moreau, D. Ragni, M. Meinke, W. Schröder, and C. Schram. 2020. “On the Role of Turbulence Distortion on Leading-Edge Noise Reduction by Means of Porosity.” *Journal of Sound and Vibration* 485 (October): 115561. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115561>.
- [143] Carley, Michael. n.d. “Turbulence and Noise.” <https://people.bath.ac.uk/ensmjc/Notes/tnoise.pdf>.
- [144] Lau, Y.L, R.M.C So, and R.C.K Leung. 2004. “Flow-Induced Vibration of Elastic Slender Structures in a Cylinder Wake.” *Journal of Fluids and Structures* Vol. 19 (November): 1061–83. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.06.007>.
- [145] Troolin, D. R., E. K. Longmire, and W. T. Lai. 2006. “Time Resolved PIV Analysis of Flow over a NACA 0015 Airfoil with Gurney Flap.” *Experiments in Fluids* 41 (2): 241–54. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0143-8>.
- [146] Fischer, A. (2012). Hot Wire Anemometer Turbulence Measurements in the wind Tunnel of LM Wind Power. Wind Energy Department, Technical University of Denmark. DTU Wind Energy E No. 0006
- [147] “Understanding the 3dB Rule - Pulsar Instruments.” n.d. Disponibil la <https://pulsarinstruments.com/news/understanding-3db-rule/>.
- [148] Castellini, Paolo, and Milena Martarelli. 2007. “Acoustic Beamforming: Analysis of Uncertainty and Metrological Performances.” *Mechanical Systems and Signal Processing* 22 (3): 672–92. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.09.017>.
- [149] Silva, Ikaro. 2023. “Mathematics of Beam Forming - Ikaro Silva - Medium.” Medium. Iulie 25, 2023. <https://medium.com/@ikarosilva/mathematics-of-beam-forming-a518e59542ad>.
- [150] Barry Van Veen, et. Al. “Beamforming Techniques for Spatial Filtering.” 2000 CRC Press LLC., Disponibil la <https://dsp-book.narod.ru/DSPMW/61.PDF>
- [151] Chu, Zhigang, Shuyi Zhao, Yang Yang, and Yongxin Yang. 2018. “Deconvolution Using CLEAN-SC for Acoustic Source Identification with Spherical Microphone Arrays.” *Journal of Sound and Vibration* 440 (October): 161–73. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.10.030>.
- [152] Lee, S. Trailing-Edge Noise and its Applications to Urban Air Mobility Noise. 2024. disponibil online: [https://www.nasa.gov/assets/nas/pdf/ams/2024/AMS\\_20240314\\_Lee.pdf](https://www.nasa.gov/assets/nas/pdf/ams/2024/AMS_20240314_Lee.pdf) (accesat la 26 Iulie 2025).
- [153] Shen, Y.; Bai, Y.; Liu, X.; Zang, B. Drone Noise Reduction Using Serration–Finlet Blade Design and Its Psychoacoustic and Social Impacts. *Sustainability* 2025, 17, 3451. <https://doi.org/10.3390/su17083451>.
- [154] Candeloro, P.; Ragni, D.; Pagliaroli, T. Unconventional Application of Serrated Trailing Edges for Quieter Propeller Drones. In *Proceedings of the 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, 4–7 Iunie 2024*. <https://doi.org/10.2514/6.2024-3107>.
- [155] Robert, J.; Antoine, M.; Sébastien, G.; Rainer, S. Optimization of Trailing-Edge Serrations to Reduce Open-Rotor Tonal Interaction Noise. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, HI, USA, 10–15 April 2016*. fhal-01884252.
- [156] Hansen, C.; Hansen, K. Recent Advances in Wind Turbine Noise Research. *Acoustics* 2020, 2, 171–206. <https://doi.org/10.3390/acoustics2010013>.

- [157] Deaconu, M.; Cican, G.; Toma, A.-C.; Drăgășanu, L.I. Helicopter Inside Cabin Acoustic Evaluation: A Case Study—IAR PUMA 330. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 2021, 18, 9716. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189716>.
- [158] Ragni, D.; Avallone, F.; van der Velden, W.C.P.; Casalino, D. Measurements of near-wall pressure fluctuations for trailing-edge serrations and slits. *Exp. Fluids* 2018, 60, 6. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2654-5> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [159] Chaitanya, P.; Joseph, P. Slitted leading edge profiles for the reduction of turbulence-aerofoil interaction noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2018, 143, 3494–3504. <https://doi.org/10.1121/1.5040972>.
- [160] Singh, S.M.; Garg, M.; Narayanan, S.; Ayton, L.J.; Paruchuri, C.C. On the Reductions of Airfoil Broadband Noise through Sinusoidal Trailing-Edge Serrations. *J. Aerosp. Eng.* 2022, 35, 04022003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0001386](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0001386).
- [161] Cao, H.; Zhang, M.; Zhang, Y.; Zhou, T. A general model for trailing edge serrations simulation on wind turbine airfoils. *Theor. Appl. Mech. Lett.* 2021, 11, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2021.100284> (accesat la 18 Iulie 2025).
- [162] Xue, W.; Jia, S.; Wang, H.; Chen, Z.; Yang, B. An Experimental Study of Noise Reduction in Wind Turbine Airfoils with Serrated Trailing Edges. 2025. disponibil online: <https://arxiv.org/pdf/2307.12188> (accesat la 18 Iulie 2025).
- [163] Pereira, L.T.L.; Avallone, F.; Ragni, D.; Scarano, F. A parametric study of serration design for trailing-edge broadband noise reduction. *Appl. Acoust.* 2023, 211, 109470. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109470> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [164] Chong, T.P.; Dubois, E. Optimization of the poro-serrated trailing edges for airfoil broadband noise reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 2016, 140, 1361–1373. <https://doi.org/10.1121/1.4961362> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [165] Mayer, Y.D.; Lyu, B.; Jawahar, H.K.; Azarpeyvand, M. A semi-analytical noise prediction model for airfoils with serrated trailing edges. *Renew. Energy* 2019, 143, 679–691, ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.132>. (accesat la 21 Iulie 2025).
- [166] Tian, C.; Liu, X.; Wang, L.; Li, Y.; Wu, Y. Analytical Solution and Analysis of Aerodynamic Noise Induced by the Turbulent Flow Interaction of a Plate with Double-Wavelength Bionic Serration Leading Edges. *Biomimetics* 2025, 10, 193. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10040193>.
- [167] Lee, S. The Effect of Airfoil Shape on Trailing Edge Noise. *J. Theor. Comput. Acoustics*. 2018, 27, 1850020. <https://doi.org/10.1142/S2591728518500202>.
- [168] Chong, T.P.; Joseph, P.F. An experimental study of airfoil instability tonal noise with trailing edge serrations. *J. Sound. Vib.* 2013, 332, 6335–6358, ISSN 0022-460X. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.06.033> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [169] Ayton, L.J.; Kim, J.W. An analytic solution for the noise generated by gust–aerofoil interaction for plates with serrated leading edges. *J. Fluid. Mech.* 2018, 853, 515–536. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.583>. disponibil online: <https://arxiv.org/pdf/1805.05118> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [170] Schlegel, R.; King, R.; Mull, H. Helicopter rotor noise generation and propagation. In US Army Aviation Materiel Laboratories; US Army Garrisons: Fort Eustis, VA, USA, 1966. disponibil online: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0645884.pdf> (accesat la 21 Iulie 2025).
- [171] Stuckey, T.J.; Goddard, J.O. Investigation and prediction of helicopter rotor noise part I. Wessex whirl tower results. *J. Sound. Vib.* 1967, 5, 50–80.
- [172] Hua, J.; Mankbadi, R.R. Prediction and Control of Broadband Noise Associated with Advanced Air Mobility—A Review. *Appl. Sci.* 2024, 14, 8455. <https://doi.org/10.3390/app14188455>.
- [173] Greenberg, M.; Kushnir, U.; Frid, V. Innovative Regression Model for Frequency-Dependent Acoustic Source Strength in the Aquatic Environment: Bridging Scientific Insight and Practical Applications. *Sensors* 2025, 25, 1560. <https://doi.org/10.3390/s25051560>.
- [174] D.S.; Jumper, S.J.; Burley, C.L. Rotorcraft System Noise Prediction System (ROTONET), Aircraft Noise Prediction Theoretical Manual, NASA Technical Memorandum 83199, Part 4. disponibil online: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950019972/downloads/19950019972.pdf> (accesat la 25 Iulie 2025).
- [175] Küçükosman, Y.C.; Christophe, J.; Schram, C. Trailing edge noise prediction based on wall pressure spectrum models for NACA0012 airfoil. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 2018, 175, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.030>. (accesat la 21 Iulie 2025).
- [176] ISO 3745:2012; Acoustics—Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure—Precision Methods for Anechoic Rooms and Hemi-Anechoic



- Rooms. ISO: Geneva, Switzerland, 2012. disponibil online: <https://www.iso.org/standard/45362.html> (accesat la 2 Iulie 2025).
- [177] Akiwate, Deepak & Parry, Anthony & Joseph, Phillip & Paruchuri, Chaitanya. (2021). On the balance between the tonal and broadband noise of uninstalled propellers. 10.2514/6.2021-2308.
- [178] Peeters B., Nusselder R., Overview of critical noise values in the European Region, M+P report revision 4, prepared for EPA Network Interest Group on Noise Abatement (IGNA) (2019). [https://epanet.eea.europa.eu/reports-letters/reports-and-letters/ig-noise\\_critical-noise-values-in-eu.pdf](https://epanet.eea.europa.eu/reports-letters/reports-and-letters/ig-noise_critical-noise-values-in-eu.pdf) (accesat la 25 August 2025)
- [179] Edouard Salze, A. Pereira, Christoph Brandstetter, Vincent Clair, Fernando Gea-Aguilera, et al.. Noise Reduction of Aero-Engines Using Innovative Stators With Leading Edge Features. 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Jun 2024, Rome, Italy. 10.2514/6.2024-3159
- [180] Du, H.; Jiang, H.; Yang, Z.; Xia, H.; Chen, S.; Wu, J. Experimental Investigation of the Effect of Bio-Inspired Wavy Leading-Edges on Aerodynamic Performance and Flow Topologies of the Airfoil. *Aerospace* 2024, 11, 194. <https://doi.org/10.3390/aerospace11030194>
- [181] Yaroslav Pochkin, Yuri Khaletskiy, Aircraft Fan Noise Reduction Technology Using Leaned Stator Blades, *Procedia Engineering*, Volume 106, 2015, Pages 368-376, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.047> (accesat la 25 August 2025).
- [182] Wei, Z., Wang, S., Farris, S., Chennuri, N., Wang, N., Shinsato, S., Demir, K., Horii, M., & Gu, G. X. (2023, August 17). Nature-inspired three-dimensional surface serration topologies enable silent flight by suppressing airfoil-turbulence interaction noise. *arXiv.org*. <https://arxiv.org/abs/2308.08788> (accesat la 25 August 2025)
- [183] Moreau, S.; Roger, M. Turbomachinery Noise Review. *Int. J. Turbomach. Propuls. Power* 2024, 9, 11. <https://doi.org/10.3390/ijtp9010011>
- [184] Kholodov, P.; Moreau, S. Identification of Noise Sources in a Realistic Turbofan Rotor Using Large Eddy Simulation. *Acoustics* 2020, 2, 691-706. <https://doi.org/10.3390/acoustics2030037>
- [185] Cican, G.; Frigioescu, T.-F.; Crunteanu, D.-E.; Cristea, L. Micro Turbojet Engine Nozzle Ejector Impact on the Acoustic Emission, Thrust Force and Fuel Consumption Analysis. *Aerospace* 2023, 10, 162. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020162>
- [186] Tongwei Lu, Chun Liu, Nengyin Wang, Chen Shao, Yong Li, Ultra-broadband acoustic metaliner for fan noise reduction, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 293, 2025, 110173, ISSN 0020-7403, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110173> (accesat la 25 August 2025)
- [187] Andrea Cattanei, Fabio Mazzocut Zecchin, Alessandro Di Pasquali, Andrea Lazari, Effect of the uneven blade spacing on the noise annoyance of axial-flow fans and side channel blowers, *Applied Acoustics*, Volume 177, 2021, 107924, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.107924> (accesat la 25 August 2025)
- [188] Wang, Y.; Zhao, K.; Lu, X.-Y.; Song, Y.-B.; Bennett, G.J. Bio-Inspired Aerodynamic Noise Control: A Bibliographic Review. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2224. <https://doi.org/10.3390/app9112224>
- [189] Qiao, C.; Ye, X.; Wu, Y.; Li, C. Insight into the Impact of Blade Perforation on the Aerodynamics and Acoustics of a Two-Stage Variable-Pitch Axial Fan. *Energies* 2025, 18, 1966. <https://doi.org/10.3390/en18081966>
- [190] Lahoz, M.; Nabhani, A.; Saemian, M.; Bergada, J.M. Wind Turbine Enhancement via Active Flow Control Implementation. *Appl. Sci.* 2024, 14, 11404. <https://doi.org/10.3390/app142311404>
- [191] Parra, H.G.; Ceron, H.D.; Gomez, W.; Gaona, E.E. Experimental Analysis of Bio-Inspired Vortex Generators on a Blade with S822 Airfoil. *Energies* 2023, 16, 4538. <https://doi.org/10.3390/en16124538>
- [192] Wang, J.; Nakata, T.; Liu, H. Development of Mixed Flow Fans with Bio-Inspired Grooves. *Biomimetics* 2019, 4, 72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4040072>
- [193] Juangphanich, Paht. Bio-inspired Design of a Turbine Stage. Purdue University Graduate School. Thesis, 2019. <https://doi.org/10.25394/PGS.10055423.v1> (accesat la 25 August 2025)
- [194] Tan, J. , Dong, P. , Gao, J. , Wang, C. and Zhang, L. (2023). Coupling Bionic Design and Numerical Simulation of the Wavy Leading-Edge and Seagull Airfoil of Axial Flow Blade for Air-conditioner. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(7), 1316-1330. doi: 10.47176/jafm.16.07.1634 (accesat la 25 August 2025)
- [195] Jiaxin Rong, Hao Liu; Effects of owl-inspired leading-edge serrations on tandem wing aeroacoustics. *AIP Advances* 1 November 2022; 12 (11): 115103. <https://doi.org/10.1063/5.0128543> (accesat la 25 August 2025)

- [196] Lei Wang, Xiaomin Liu, Liming Wu, Dian Li, Effect of the asymmetric bio-inspired trailing-edge serrations on sound suppression in a coupled owl-based airfoil, *Applied Acoustics*, Volume 191, 2022, 108667, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108667>. (accesat la 25 August 2025)
- [197] Xing, Y.; Chen, W.; Wang, X.; Tong, F.; Qiao, W. Effect of Wavy Leading Edges on Airfoil Trailing-Edge Bluntness Noise. *Aerospace* 2023, 10, 353. <https://doi.org/10.3390/aerospace10040353>
- [198] Li, J.; Liu, C.; Li, X. Effects of Wavy Leading-Edge Protuberance on Hydrofoil Performance and Its Flow Mechanism. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1138. <https://doi.org/10.3390/jmse9101138>
- [199] Wang, D.; Cai, C.; Zha, R.; Peng, C.; Feng, X.; Liang, P.; Meng, K.; Kou, J.; Maeda, T.; Li, Q. Impact of Leading-Edge Tubercles on Airfoil Aerodynamic Performance and Flow Patterns at Different Reynolds Numbers. *Energies* 2024, 17, 5518. <https://doi.org/10.3390/en17215518>
- [200] Pal A, Ghoshal R. Acoustic radiation characteristics of shark skin inspired surface modified plates. *Sci Rep.* 2024 Oct 9;14(1):23639. doi: 10.1038/s41598-024-72489-7. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11464837> (accesat la 25 August 2025).
- [201] Cheng, M.; Zhu, Z.; Wu, B.; Ye, L.; Song, K. Simulation and Experimental Study of the Suppression of Low-Frequency Flow Noise Signals by a Placoid-Scale Skin. *Appl. Sci.* 2024, 14, 3855. <https://doi.org/10.3390/app14093855>
- [202] Lloyd, C. J., Peakall, J., Burns, A. D., Keevil, G. M., Dorrell, R. M., Wignall, P. B., & Fletcher, T. M. (2021). Hydrodynamic efficiency in sharks: the combined role of riblets and denticles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(4), 046008. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/abf3b1> (accesat la 25 August 2025).
- [203] Powerful owl. (n.d.). Adaptations in the Grampians. <https://biology-adaptations-telkington.weebly.com/powerful-owl.html> (accesat la 25 August 2025).
- [204] Arrondeau, B.; Rana, Z.A. Computational Aerodynamics Analysis of Non-Symmetric Multi-Element Wing in Ground Effect with Humpback Whale Flipper Tubercles. *Fluids* 2020, 5, 247. <https://doi.org/10.3390/fluids5040247>
- [205] Day, L. (2023, August 31). Sharkskin coating reduces airliner fuel use, emissions. Hackaday. <https://hackaday.com/2023/08/23/sharkskin-coating-reduces-airliner-fuel-use-emissions/> (accesat la 25 August 2025).
- [206] Vathylakis, Alexandros, Reduction of broadband trailing edge noise by serrations, Brunel University London, Doctoral Thesis, <https://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/11554> (accesat la 25 August 2025).
- [207] Thompson, C., Biler, H., Symon, S., & Ganapathisubramani, B. (2023). Effects of integral length scale variations on the stall characteristics of a wing at high free-stream turbulence conditions. *Journal of Fluid Mechanics*, 974, A9. doi:10.1017/jfm.2023.789 (accesat la 25 August 2025).
- [208] Sivakumar, Aravind & Porteous, Ric & Mimani, Akhilesh & Doolan, Con. (2015). AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TURBULENT BOUNDARY- LAYER INTERACTION WITH DIFFERENT SERRATED TRAILING-EDGE CONFIGURATIONS. *ACOUSTICS 2015*, Annual Conference of the Australian Acoustical Society, Australia
- [209] Tian, H., & Lyu, B. (2024). The impact of non-frozen turbulence on the modelling of the noise from serrated trailing edges. *Journal of Fluid Mechanics*, 990, A4. doi:10.1017/jfm.2024.495 (accesat la 25 August 2025).
- [210] Stephane Moreau, Georgios Bampanis, Michel Roger. Analytical and experimental investigation of leading-edge noise reduction on a flat plate with serrations. *AIAA AVIATION 2020 FORUM*, AIAA, Jun 2020, VIRTUAL EVENT, United States. DOI:10.2514/6.2020-2542, <https://hal.science/hal-04929001v1> (accesat la 25 August 2025).
- [211] Huang, X. A theoretical study of serrated leading edges in aerofoil and vortical gust interaction noise. *Adv. Aerodyn.* 1, 6 (2019). <https://doi.org/10.1186/s42774-019-0010-y> (accesat la 25 August 2025).
- [212] Kaya, M.N.; Satcunanathan, S.; Meinke, M.; Schröder, W. Leading-Edge Noise Mitigation on a Rod–Airfoil Configuration Using Regular and Irregular Leading-Edge Serrations. *Appl. Sci.* 2025, 15, 7822. <https://doi.org/10.3390/app15147822>
- [213] Oluseyi O. Ajayi, Logan Unser, Joseph O. Ojo, Implicit rule for the application of the 2-parameters RANS turbulence models to solve flow problems around wind turbine rotor profiles, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 13, 2023, 100609, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100609> (accesat la 25 August 2025).
- [214] Intizar Ali, Tanweer Hussain, Imran Nazir Unar, Laveet Kumar, Inam Ul Ahad, Turbulence model study for aerodynamic analysis of the leading edge tubercle wing for low Reynolds number flows, *Heliyon*, Volume 10, Issue 11, 2024, e32148, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32148> (accesat la 25 August 2025).

- [215] Muhammed, M.; Virk, M.S. On the Fidelity of RANS-Based Turbulence Models in Modeling the Laminar Separation Bubble and Ice-Induced Separation Bubble at Low Reynolds Numbers on Unmanned Aerial Vehicle Airfoil. *Drones* 2024, 8, 148. <https://doi.org/10.3390/drones8040148>
- [216] Amiet, R. K. "Noise Due to Turbulence–Airfoil Interaction." NASA Technical Report (1975). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19780024880/downloads/19780024880.pdf>
- [217] Tyler, J. M., and T. G. Sofrin. "Axial Flow Compressor Noise Studies." SAE Transactions (1962). [https://ae.metu.edu.tr/~ae548/ref\\_papers/Axial\\_Flow\\_Compressor\\_Noise\\_Studies.pdf](https://ae.metu.edu.tr/~ae548/ref_papers/Axial_Flow_Compressor_Noise_Studies.pdf)
- [218] Ayton, L. J., and J. W. Kim. "An Analytic Solution for Gust–Airfoil Interaction with Serrated Leading Edges." arXiv preprint arXiv:1805.05118 (2018). <https://arxiv.org/abs/1805.05118>
- [219] Lyu, B., L. J. Ayton, and P. Chaitanya. "On the Acoustic Optimality of Leading-Edge Serration Profiles." *Journal of Sound and Vibration* (2019). Author OA PDF: [https://eprints.soton.ac.uk/433818/1/1\\_s2.0\\_S0022460X19304857\\_main.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/433818/1/1_s2.0_S0022460X19304857_main.pdf)
- [220] Mayer, Y. D., B. Zang, and M. Azarpeyvand. "On the Effects of Leading-Edge Serrations on Aeroacoustic Properties during Stall." University of Bristol Report (2019). [https://research-information.bris.ac.uk/files/209220556/Full\\_text\\_PDF\\_final\\_published\\_version.pdf](https://research-information.bris.ac.uk/files/209220556/Full_text_PDF_final_published_version.pdf)
- [221] Al-Okbi, Y., et al. "Noise Reduction Using Leading-Edge Serrations with Blowing." *Applied Sciences* 11, no. 6 (2021): 2593. <https://doi.org/10.3390/app11062593>
- [222] Totu, A.-G.; Crunțeanu, D.-E.; Drăgășanu, L.; Cican, G.; Leventiu, C. SPL-Based Modeling of Serrated Airfoil Noise via Functional Regression and Ensemble Learning. *Computation* 2025, 13, 203. <https://doi.org/10.3390/computation13090203>
- [223] Totu, A.-G.; Crunțeanu, D.-E.; Deaconu, M.; Cican, G.; Cristea, L.; Leventiu, C. Application of Passive Serration Technologies for Aero-Engine Noise Control in Turbulent Inflow Environments. *Technologies* 2025, 13, 363. <https://doi.org/10.3390/technologies13080363>
- [224] Merino-Martínez, R., S. Luesutthiviboon, R. Zamponi, et al. "Assessment of the Accuracy of Microphone Array Methods for Aeroacoustic Measurements." *JSV* 470 (2020): 115176. [https://research.tudelft.nl/files/71596148/1\\_s2.0\\_S0022460X20300079\\_main\\_1.pdf](https://research.tudelft.nl/files/71596148/1_s2.0_S0022460X20300079_main_1.pdf)
- [225] Sijtsma, P. "High-Resolution CLEAN-SC: Theory and Experimental Validation." *International Journal of Aeroacoustics* 16, no. 4–5 (2017): 274–298. <https://research.tudelft.nl/files/23308367/1475472X17713034.pdf>
- [226] Brooks, T. F., and W. M. Humphreys Jr. "A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays." AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2004). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050209957/downloads/20050209957.pdf>
- [227] VanDercreek, C., R. Merino-Martínez, M. Snellen, D. Ragni, and D. G. Simons. "Comparison of Cavity Geometries for a Microphone Array in an Open-Jet Wind-Tunnel Experiment." Berlin Beamforming Conference (BeBeC-2020). <https://www.bebec.eu/fileadmin/bebec/downloads/bebec-2020/papers/BeBeC-2020-D07.pdf>
- [228] Casagrande Hirono, F., P. F. Joseph, and F. M. Fazi. "An Open-Source Implementation of Analytical Turbulence–Airfoil Interaction Noise Model." AIAA Aviation Forum (2020). [https://eprints.soton.ac.uk/441573/1/Hirono\\_Joseph\\_Fazi\\_Open\\_Source\\_Implementation\\_of\\_Airfoil\\_Noise.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/441573/1/Hirono_Joseph_Fazi_Open_Source_Implementation_of_Airfoil_Noise.pdf)
- [229] Merino-Martínez, R. Microphone Arrays for Imaging of Aerospace Noise Sources. PhD thesis, Delft University of Technology, 2018. [https://research.tudelft.nl/files/47465472/PhD\\_Thesis\\_RobertoMerinoMarti](https://research.tudelft.nl/files/47465472/PhD_Thesis_RobertoMerinoMarti)

