

MATERIALE PIEZOELECTRICE MOI ȘI DURE PENTRU CONSTRUCȚIA UNUI MOTOR PIEZOELECTRIC SONOTRON

Yelda VELI¹, Alexandru M. MOREGA^{1,2}

¹Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Națională de Științe și Tehnologie
POLITEHNICA București

²Institutul de Statistică Matematică și Matematică Aplicată "Gh. Mihoc – C. Iacob",
Academia Română

yelda.veli@upb.ro¹, alexandru.morega@upb.ro²

Rezumat. Lucrarea prezintă o analiză comparativă a materialelor piezoceramice moi (PZT-5H) și dure (PZT-8) utilizate în construcția unui motor piezoelectric sonotrod pentru aplicații de extracție asistată ultrasonică a compușilor din plante. Modelele numerice sunt bidimensionale, cu simetrie axială, și sunt analizate la frecvențele proprii și de rezonanță prin cuplarea câmpurilor electric, structural și acustic. Sunt investigate influențele materialului și ale geometriei, prin definirea unui factor de formă, asupra frecvențelor proprii, puterii absorbite și impedanței electrice.

1. INTRODUCERE

Tehnologiile piezoelectrice (PZE) ultrasonice (US) sunt utilizate pe scară largă în aplicații industriale [1], biomedicale [2] și de procesare a materialelor, datorită capacității lor de a transfera energie mecanică în medii solide și fluide [3]. Extracția asistată US a compușilor bioactivi din plante a devenit o alternativă atractivă la metodele convenționale, prin reducerea timpului de procesare, creșterea randamentului și reducerea degradării termice [4,5] a substanțelor volatile. Procesul de extracție este puternic dependent de frecvența de lucru, de puterea acustică transferată și de adaptarea structurală a traductorului PZE de US la mediul de extracție [3], care este caracterizat prin sarcină acustică variabilă și neomogenă.

Proiectarea dispozitivelor motoarelor PZE-US trebuie să considere atât geometria ansamblului, cât și selecția materialului piezoceramic, care influențează direct cuplajul electromecanic, pierderile interne și stabilitatea în timpul funcționării. Astfel, piezoceramicele moi și dure prezintă comportamente distincte. Materialele moi, precum PZT-5H, se caracterizează prin coeficienți ridicați de cuplaj și de deformare, ceea ce conduce la deplasări mecanice mari și la o bandă largă de frecvențe de funcționare, însă cu pierderi mecanice și dielectrice mai mari. În schimb, materialele dure, precum PZT-8, oferă stabilitate superioară și pierderi reduse, fiind preferate în aplicații de putere mare, dar prezintă deplasări mai mici și o gamă de frecvențe îngustă.

Studii numerice anterioare [6] au evidențiat că variația raportului geometric dintre dimensiunile straturilor de material piezoceramic, prin introducerea unui factor de formă, A (unde $A = \hat{I}/L$ și $\hat{I}$ reprezintă înălțimea, iar L lungimea stratului PZE), menținând constant volumul de material, conduce la modificări ale gamei de frecvențe proprii și ale regimurilor de rezonanță relevante pentru extracția asistată ultrasonică. Introducerea unui factor de formă adimensional permite astfel identificarea unor configurații geometrice, în care frecvențele naturale ale sistemului sunt plasate în intervalul 20–40 kHz, specific proceselor de extracție ultrasonică, atât pentru sonotrodul individual, cât și pentru întreg ansamblul cu vasul de lucru, în care se regăsește amestecul de frunze de lavandă, apă și solvent, și care are rolul de a stabiliza și reduce gama de frecvențe disponibile.

Pornind de la aceste rezultate, prezenta lucrare se concentrează asupra analizei comparative a influenței materialului piezoceramic asupra performanței unui motor PZE sonotrod destinat extracției asistate US a compușilor din plante. Analiza vizează materiale piezoceramice moi (PZT-5H) și dure (PZT-8) pentru diverse configurații geometrice. Modelele numerice sunt dezvoltate în regim bidimensional, cu simetrie axială, și includ cuplarea câmpurilor electric, structural și acustic. Sunt investigate influențele materialului asupra frecvențelor de rezonanță, puterii absorbite și impedanței electrice, în condiții apropiate de cele reale de funcționare, evidențiind compromisurile specifice fiecărui tip de piezoceramic în aplicațiile de extracție. Studiile sunt realizate în regim armonic, iar curgerea Navier-Stokes din interiorul vasului de lucru nu este considerat în această lucrare, aceasta fiind o sarcină utilă în procesul de adaptare a frecvenței de lucru, iar în această lucrare se consideră o dimensiune fixă a acesteia.

2. MODELAREA NUMERICĂ

2.1 Domeniul de calcul

Structura modelului numeric a motorului liniar PZE-US și componentele acestuia sunt prezentate în Fig. 1, a. Sunt incluse și condițiile la limită pentru problema de câmp mecanic (săgeți verzi) și pentru problema de câmp acustic (săgeți roșii). Condițiile la limită pentru problema de câmp electric, care dictează modul de cuplare a straturilor PZE de material activ, sunt incluse în Fig.1,b. Este reprezentată și direcția polarizării electrice a straturilor PZE prin săgeți.

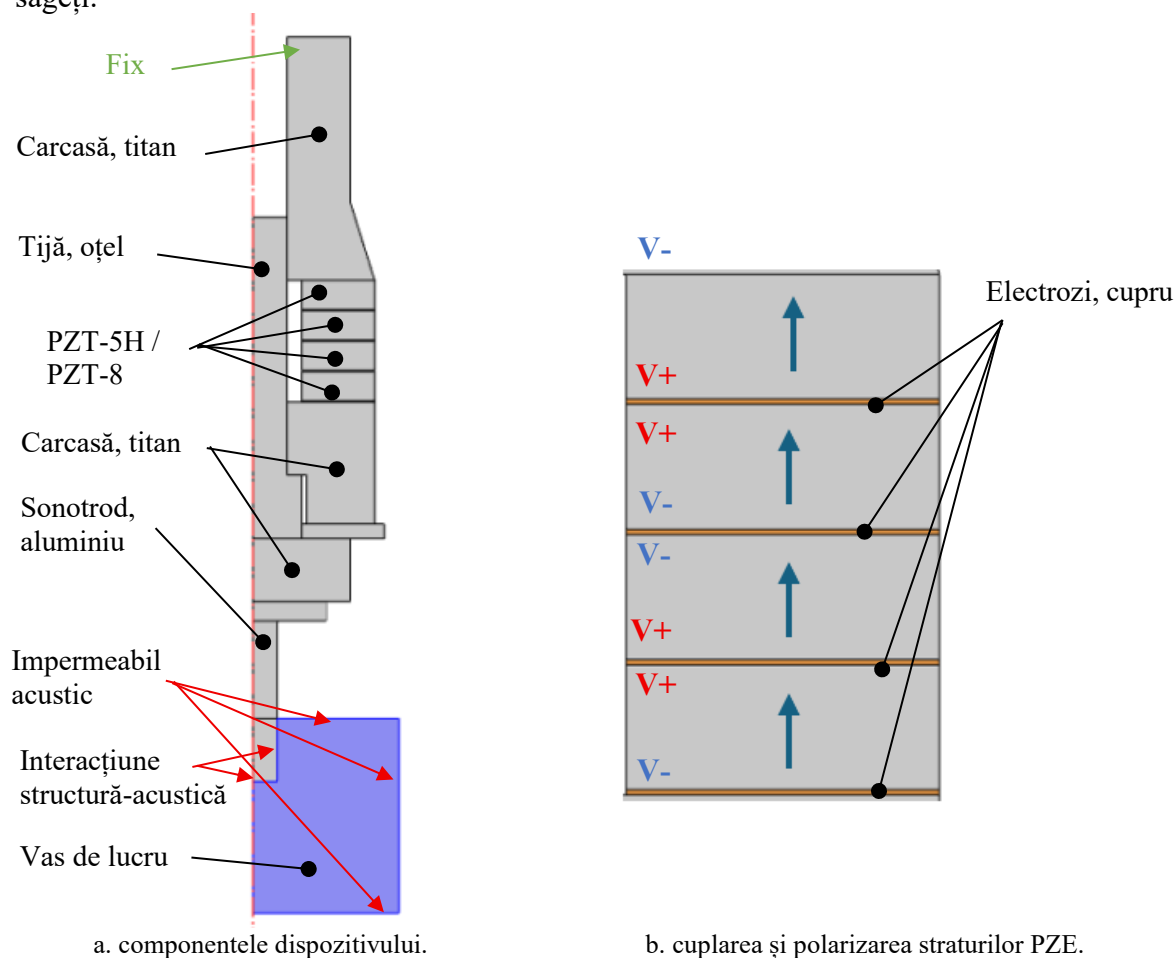


Fig. 1 – Domeniul de calcul și condițiile la limită ale motorului PZE sonotrod.

Astfel, întreg ansamblul este fixat la un capăt, în timp ce celelalte frontiere sunt lăsate să se deformeze liber. La nivelul vârfului sonotrodului are loc interacțiunea câmp de deformare structurală – câmp acustic, iar pereții vasului de probă sunt impermeabili acustic. Straturile de material PZT sunt cuplate electric în paralel și polarizate în aceeași direcție. Celelalte frontiere sunt izolate electric.

2.2 Modelul matematic

Modelul numeric rezolvă câmpul electric-mecanic prin relațiile piezoelectrice constitutive:

$$\{S = s^E T - d^T E D = d T + \epsilon^T E, \quad (1)$$

unde S [/] reprezintă deformarea mecanică, s^E [1/Pa] este tensorul complianței elastice, T [N/m²] este sollicitarea mecanică, d^T [C/N] este tensorul constantei piezoelectrice la o sollicitare mecanică T constantă, E [V/m] este intensitatea câmpului electric, D [C/m²] este inducția câmpului electric, ϵ^T [F/m] este tensorul constantei dielectrice măsurat la T constant.

Câmpul acustic se rezolvă utilizând ecuația presiunii undei de ultrasunet:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho c_s^2} = 0, \quad (2)$$

unde p [Pa] este presiunea sunetului, c_s este viteza sunetului [m/s] și ρ [kg/m³] este densitatea de masă.

3. REZULTATELE SIMULĂRII NUMERICE

Frecvențele naturale, proprii, f_n , au fost calculate inițial pentru motorul PZE-US, fără a considera sarcina (vasul de lucru) atașată vârfului sonotrodului, pentru diverse valori ale factorului de formă A (de la A_1 , pentru $L = 16$ mm, la A_{11} , pentru $L = 10$ mm), deci dimensiuni diferite ale straturilor de material piezoelectric.

Valorile factorului de formă A și ale dimensiunilor straturilor de material activ sunt ilustrate în Tabelul 1. Dimensiunile sunt în milimetri.

Tabelul 1
Dimensiunile straturilor PZE în funcție de factorul de formă, A

$A_1=0,35$	$A_2=0,4$	$A_3=0,46$	$A_4=0,5$	$A_5=0,53$	$A_6=0,58$	$A_7=0,63$	$A_8=0,68$	$A_9=0,74$	$A_{10}=0,82$	$A_{11}=0,9$
L=16 mm	L=15 mm	L=14 mm	L=13,5 mm	L=13 mm	L=12,5 mm	L=12 mm	L=11,5 mm	L=11 mm	L=10,5 mm	L=10 mm
$\hat{I}=5,6$ mm	$\hat{I}=6$ mm	$\hat{I}=6,4$ mm	$\hat{I}=6,7$ mm	$\hat{I}=6,923$ mm	$\hat{I}=7,2$ mm	$\hat{I}=7,5$ mm	$\hat{I}=7,826$ mm	$\hat{I}=8,181$ mm	$\hat{I}=8,571$ mm	$\hat{I}=9$ mm

Studii anterioare [6] au arătat relevanța a patru frecvențe proprii pentru gama de frecvențe necesară extracției materiei prime (20 – 40 kHz). Figura 2 prezintă frecvențele naturale, f_{n2} , f_{n3} , f_{n4} și f_{n5} în funcție de factorul de formă, A , pentru materialul piezoelectric moale PZT-5H, respectiv materialul dur PZT-8.

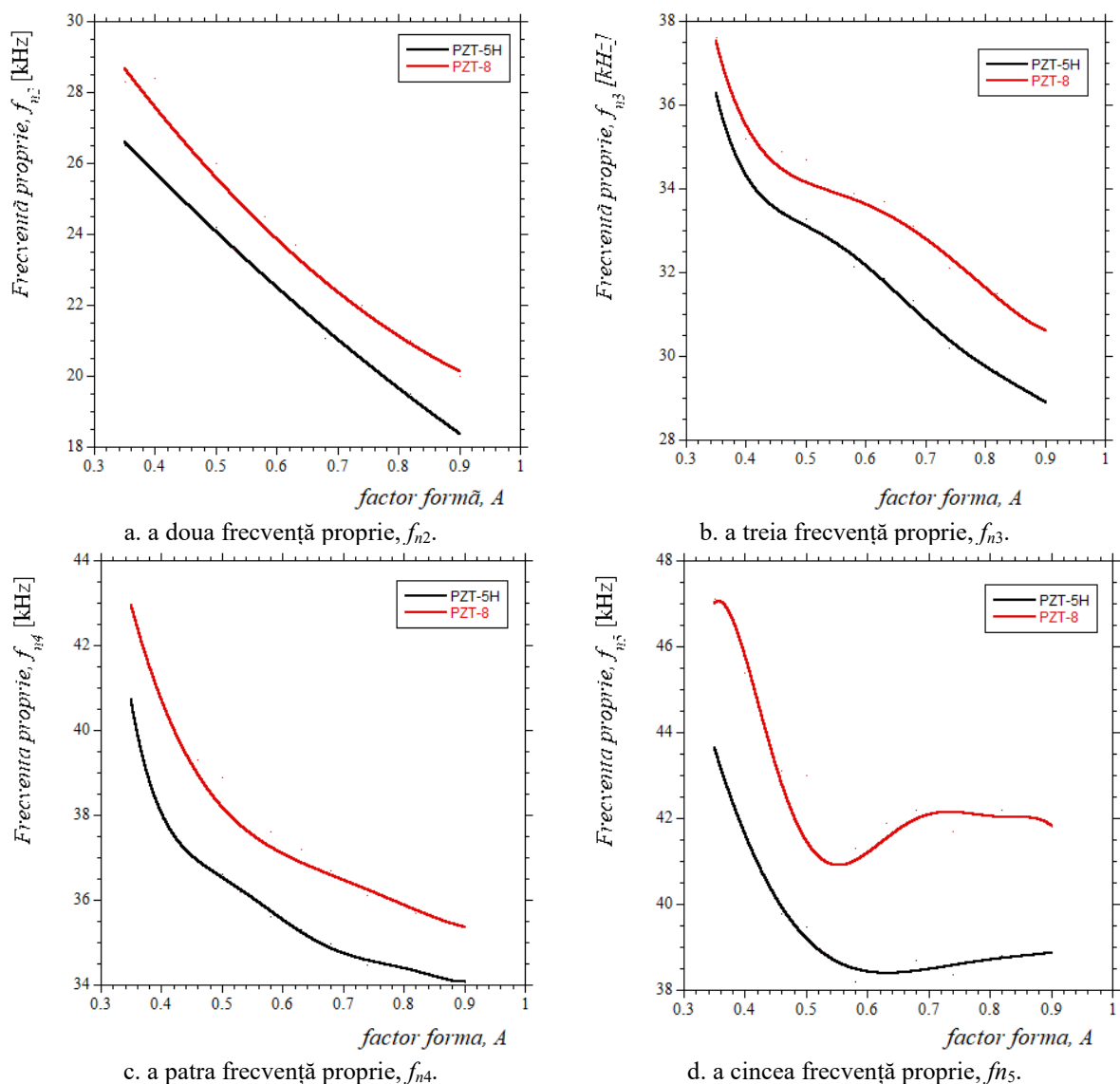


Fig. 2 – Frecvențele naturale ale motorului PZE-US, fără sarcină, în funcție de factorul de formă A , pentru cele două materiale PZE, moale, PZT-5H, respectiv, dur, PZT-8.

Gama de frecvențe proprii ale PZT-8 este mult limitată față de cea oferită de PZT-5H, situându-se peste limita de 20-40 kHz, pentru cei mai mulți factori de formă, iar acest fapt se datorează rigidității materialului dur și a valorii reduse a coeficientului de cuplaj electromecanic, k_{33} , asociat acestuia.

Frecvențele naturale determinate pentru PZT-8 au aceeași alură ca pentru cele determinate pentru PZT-5H. A cincea frecvență naturală, f_{n5} , pentru materialul PZE dur prezintă aproape aceeași variație ca materialul moale, însă valoarea minimă și platoul este mult accentuat iar rigiditatea materialului plasează frecvențele peste limita admisă de 40 kHz pentru extracția uleiului esențial, făcând aceste frecvențe proprii irelevante.

În Fig. 3 sunt reprezentate puterea, respectiv impedanța electrică a dispozitivului. Puterea electrică absorbită de transductor a fost determinată în regim armonic staționar ca partea activă a puterii aparente complexe, calculată pe baza tensiunii aplicate la borne și a curentului electric rezultat din variația sarcinii electrice la terminalul piezoelectric.

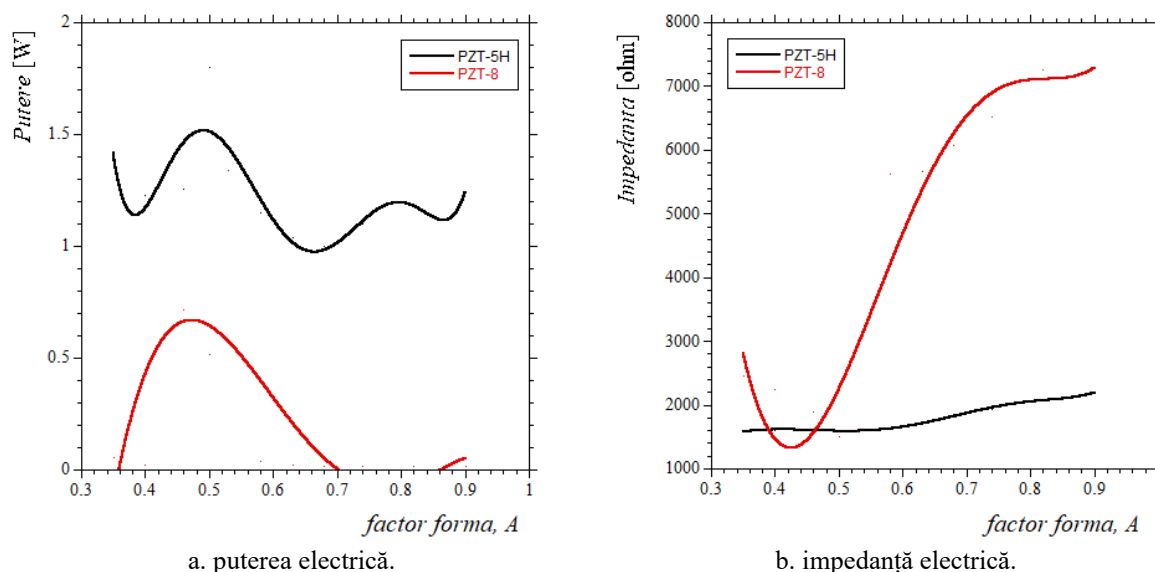


Fig. 3 – Puterea și impedanța electrică a dispozitivului fără sarcină (vas de lucru) pentru valori ale factorului de formă, A , și materiale PZE diferite (PZT-5H, respectiv PZT-8).

Atât putere, cât și impedanța electrică a dispozitivului, pentru cele două tipuri de materiale, au fost calculate pentru motorul liniar piezoelectric de ultrasunet fără a considera sarcina vasului de lucru și considerând a treia frecvență naturală, f_{n3} , ca frecvență de rezonanță. Alegerea lui f_{n3} este justificată de gama de frecvență (20-40 kHz) necesară aplicațiilor de extracție asistată US, fiind singura frecvență naturală care nu depășește intervalul necesar pentru toate configurațiile geometrice considerate pentru ambele materiale.

Graficul de variație a puterii electrice indică valori ușor mai ridicate pentru materialul piezoelectric moale datorită coeficientului de cuplaj electromecanic mai mare care determină o absorbție mai puternică de putere activă într-o plajă mai largă de frecvențe naturale și configurații geometrice.

Comparativ, materialul PZE dur, constrânge puternic dispozitivul astfel încât doar o plajă îngustă de configurații geometrice furnizează o putere electrică suficient de ridicată (aprox. 0,6 W), dincolo de acestea, puterea tinzând spre zero, indicând un comportament aproape pur reactiv.

Impedanța electrică este aproape constantă pentru materialul PZT-5H pentru o bandă largă de configurații geometrice. În schimb, pentru PZT-8, impedanța capătă valori ridicate explicată datorită puterii predominant reactive, deci a curentului electric redus. Mai mult, factorul mare de calitate mecanic, Q_m , și valori reduse ale coeficientului de cuplaj electromecanic, k_{33} , respectiv ale constantei piezoelectrice, d_{33} , contribuie la valorile ridicate ale impedanței electrice pentru materialul PZE dur.

4. CONCLUZII

Graficele frecvențelor naturale indică o dependență a modurilor proprii de factorul de formă A , pentru ambele materiale. În toate cazurile analizate (f_{n2} - f_{n5}), creșterea lui A conduce, în general, la scăderea frecvențelor proprii, ceea ce confirmă faptul că modificarea raportului geometric schimbă rigiditatea dispozitivului și condițiile de formare a modurilor proprii de deformare ale ansamblului.

Comparativ, PZT-8 prezintă frecvențe proprii constant mai ridicate decât PZT-5H, pe întreg intervalul A , datorită rigidității elastice mai mari a materialului dur. În același timp, variația frecvențelor cu A este îngustă la PZT-8 ceea ce sugerează o sensibilitate geometrică

relativ redusă, în timp ce PZT-5H, având rigiditate mai scăzută și cuplaj electromecanic mai puternic, manifestă o sensibilitate mai mare a frecvențelor proprii în raport cu factorul de formă.

Rezultatele arată că reglarea modurilor proprii de deformare prin factorul de formă A este posibil pentru ambele materiale, însă PZT-5H oferă o flexibilitate mai mare, în timp ce PZT-8 tinde să împingă modurile spre frecvențe mai înalte și să reducă intervalul de reglaj disponibil.

Analiza comparativă a puterii și impedenței electrice arată că PZT-5H absoarbe putere activă semnificativă pe o gamă largă a factorului de formă A , datorită unei impedențe relativ stabile și a unui cuplaj electromecanic ridicat. În contrast, PZT-8 prezintă un maxim de putere limitat pentru o fereastră geometrică foarte îngustă, corespunzătoare unui minim al impedenței electrice, iar în afara acesteia sistemul devine predominant reactiv, cu impedanță ridicată și putere absorbită neglijabilă.

Din rezultatele prezentate în această lucrare, dar și din informațiile furnizate de literatura de specialitate cu privire al cuplajul

CONFIRMARE

Modelele numerice au fost implementate și rezolvate în Laboratorul de Conversia Energiei și Surse și Laboratorul de Modelare Multifizică din cadrul Facultății de Inginerie Electrică a Universității Naționale de Științe și Tehnologie POLITEHNICA București. Primul autor mulțumește sprijinului oferit de grantul de cercetare din Programul Național de Cercetare al Asociației Naționale a Universităților Tehnice – GNAC ARUT 2023.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. C. Hou, Z. Li, C. Fei, T. Zhao, X. Sun, J. Zhang, D. Chen, Y. Yang, *Composite ultrasound transducer for multi-size of tweezer manipulation*, Applied Acoustics, **198**, pp. 599–604, 2022.
2. F.A.S. Lopez, M.A.M. Betancourt, E.C. Salazar, *Application of ultrasound in medicine Part II: the ultrasonic transducer and its associated electronics*, Tecciencia, **8**, 15, pp. 14–26, 2013.
3. V.T. Rathod, *A review of acoustic impedance matching techniques for piezoelectric sensors and transducers*, Sensors, **20**, 14, 4051, 2020.
4. L. Perrin, S. Desobry-Banon, G. Gillet, S. Desobry, *Review of high-frequency ultrasounds emulsification methods and oil/water interfacial organization in absence of any kind of stabilizer, ultrasound and high-pressure-assisted encapsulation*, Foods 2022, **11**, 15, 2194, 2022.
5. U. Roobab, R.M. Aadil, S.S. Kurup, and S. Maqsood, *Comparative evaluation of ultrasound-assisted extraction with other green extraction methods for sustainable recycling and processing of date palm bioresources and by-products: A review of recent research*, Ultrasonics Sonochemistry, **114**, 107252, 2025.
6. Y. Veli, F. Săftoiu, A. -M. Morega, *Piezoelectric ultrasonic transducer for permeabilization of organic materials*, 14th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp. 1–6, Bucharest, Romania 2025.