

# IDENTIFICAREA DELAMINĂRILOR ÎN STRUCTURI MULTISTRAT PRIN UTILIZAREA TEHNICILOR DE INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ

Ing. Carla-Silvana CONSTANTIN<sup>1</sup>, Ing. Sergiu-Laurențiu OPRUȚ<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Centrul Universitar al UBB, Reșița, România, <sup>2</sup>Centrul Universitar al UBB, Reșița, România

**REZUMAT.** Detectarea defectelor în materiale stratificate este crucială pentru siguranța structurilor construite. O metodă utilă și eficientă de detectare a delaminărilor în materiale multistrat este analiza frecvențelor naturale, care poate indica prezența unei delaminări prin scăderea frecvențelor sau apariția unor noi frecvențe. Această metodă poate fi îmbunătățită prin utilizarea inteligenței artificiale, care permite PC-urilor să învețe din date și să ia decizii în mod autonom. În această lucrare este prezentată o metodă de detectare și evaluare a delaminărilor prezente în grinzi stratificate prin utilizarea frecvențelor naturale și a inteligenței artificiale.

**Cuvinte cheie:** stratificat, delaminare, inteligență artificială, element finit.

**ABSTRACT.** Defect detection in composite and laminated materials is crucial for the safety and performance of structures built from these materials. A useful and effective method for detecting delaminations in multilayer materials is natural frequency analysis, which can indicate the presence of delamination by decreasing frequencies or the appearance of new frequencies. This method can be enhanced by the use of artificial intelligence, which allows computers to learn from data and make decisions autonomously. This paper presents a method for detecting and evaluating delaminations present in laminated beams using natural frequencies and artificial intelligence.

**Keywords:** layered, delamination, artificial intelligence, finite element

## 1. INTRODUCERE

Detectarea defectelor în materiale compozite și stratificate este o problemă importantă în domeniul ingineriei și tehnologiei materialelor. Aceste materiale sunt folosite într-o gamă largă de aplicații, inclusiv în aviație, construcții, industria navală, automotive și multe altele [1]. Defectele în aceste materiale pot fi cauzate de o varietate de factori, cum ar fi imperfecțiunile în timpul procesului de fabricație, expunerea la condiții de utilizare dure sau defecte apărute în urma exploatării [2]. Detectarea defectelor este crucială pentru a asigura siguranța și performanța structurilor construite din aceste materiale. Defectele pot slăbi materialul și pot duce la accidente catastrofale, cum ar fi prăbușirea unui avion sau a unui pod. Din acest motiv, este important să se detecteze defectele cât mai devreme posibil, pentru a permite intervenții rapide și pentru a preveni astfel colapsul echipamentului sau a structurii [1-3]. Există diferite metode de detectare a defectelor în materiale compozite și stratificate, cum ar fi ultrasonografia, termografia, inspecția vizuală și metode mai avansate care utilizează analiza modală [3-6]. Fiecare metodă are propriile sale avantaje și dezavantaje, iar alegerea metodei potrivite depinde de tipul și dimensiunea defectului, precum și de structura materialului în sine.

În această lucrare este descrisă o metodă de detectare și evaluare a delaminărilor în materiale

multistrat. Delaminarea este o defectare comună în materialele compozite, care poate fi cauzată de o varietate de factori, cum ar fi încărcarea repetată sau impactul [7]. Analiza frecvențelor naturale este o metodă utilă și eficientă de detectare a delaminărilor în acest tip de materiale [8]. Delaminarea poate duce la scăderea frecvențelor naturale ale structurii sau la apariția unor noi frecvențe care nu au fost prezente înainte, făcând posibilă astfel detectarea acestor modificări și indicarea prezenței unei delaminări precum și stabilirea severității acesteia [7,8].

Detectarea delaminărilor în materiale compozite prin analiza frecvențelor naturale poate fi îmbunătățită prin utilizarea inteligenței artificiale, care este o tehnologie ce implică utilizarea algoritmilor și a modelelor matematice pentru a permite computerelor să învețe din date și să ia decizii în mod autonom. În această lucrare este prezentată o rețea neuronală artificială, antrenată cu prin utilizarea unei funcții Bayesiene, capabilă să detecteze și evalueze delaminările apărute în grinzi multistrat [8-11].

## 2. GENERAREA DATELOR DE ANTRENARE

În studiul curent se consideră o bară, în consolă, confecționată din 3 straturi de material și anume oțel și PVC cu dimensiunile ilustrate în Figura 1. Datele de

antrenare necesare au fost generate prin intermediul programului SolidWorks Simulation, prin care s-au efectuat analize modale cu element finit, pentru structura considerată atât în stare intactă cât și prin generarea de diferite scenarii de delaminare la interfața dintre cele două materiale, oțel S355JR și PVC, pornind din capătul din dreapta, după cum este prezentat și în Figura 2.1. Metoda elementului finit permite simularea cu precizie a condițiilor de încărcare și a modului în care acestea influențează structura barei. Analiza frecvențelor naturale poate identifica modificările în modul de vibrație al barei cu delaminări și poate indica prezența acestora. Scopul analizei modale a fost acela de a înregistra primele cinci valori ale frecvențelor naturale ale vibrațiilor transversale ale consolei în stare intactă cât și în stare avariată. Scenariile de delaminare au fost considerate pornind din capătul din dreapta, cu dimensiunea inițială de  $x = 5$  mm, aceasta fiind mărită pentru fiecare scenariu cu un pas de 5 mm până ce ajunge la mijlocul barei ( $x = 500$  mm).



Fig. 2.1. Structura considerată.

Modelul 3D al barei confecționate din 3 straturi (OL-PVC-OL) a fost generat în SolidWorks, iar analiza modală a fost definită prin deschiderea unui nou studiu de tip Frequency. Pentru fiecare strat au fost selectate materialele Plain Carbon Steel și PVC rigid din librăria SolidWorks, cu proprietățile fizico-mecanice prezentate în Figurile 2.2 și 2.3.

După ce a fost definit contactul corespunzător între suprafețe, capătul din stânga al barei a fost fixat prin introducerea unei constrângeri de tip Fixed Geometry, Figura 2.5.

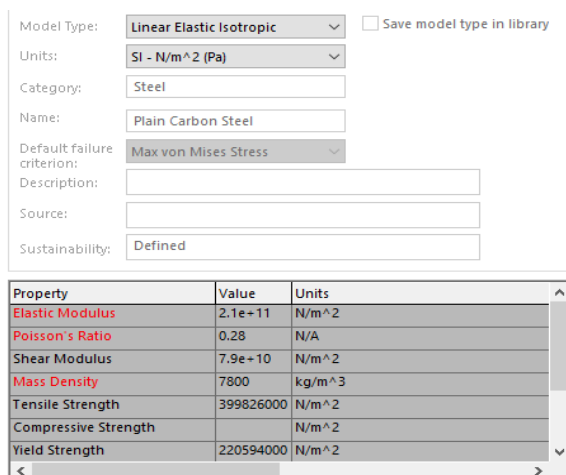


Fig. 2.2. Proprietățile oțelului.

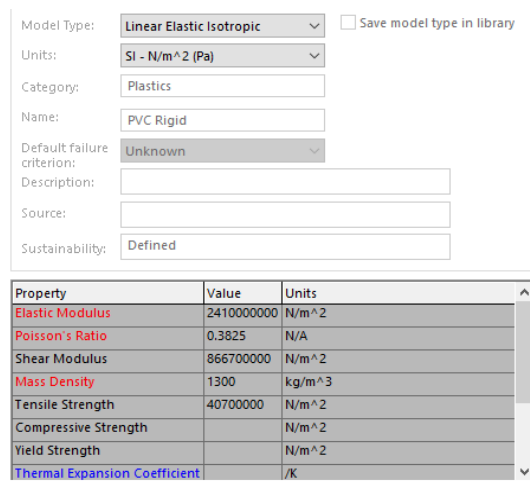


Fig. 2.3. Proprietățile PVC.

Pentru a defini lungimea porțiunii delaminate și pentru a permite modificarea ulterioară, cu ușurință, a acestei dimensiuni, a fost construită o schiță în care a fost setată lungimea de separare a materialului prin introducerea acesteia ca și coeficient global, iar prin stabilirea condițiilor de contact corespunzătoare, a fost stabilită interfața de delaminare, Figura 2.4 [12].

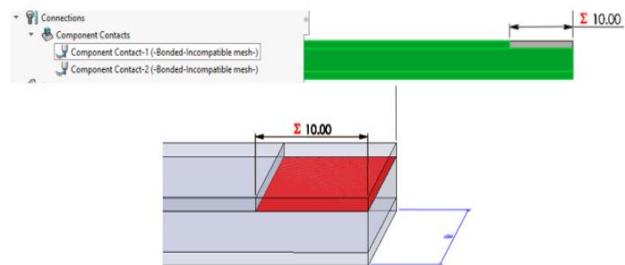


Fig. 2.4. Definirea interfeței de delaminare.

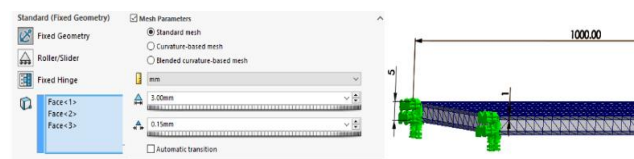


Fig. 2.5. Aplicarea constrângerilor și discretizarea modelului.

A fost setată ca mărime globală de discretizare, valoarea de 3 mm, iar după rulare au fost înregistrate valorile frecvențelor naturale pentru primele cinci moduri de vibrație transversală.

### 3. ANTRENAREA ȘI TESTAREA REȚELELOR NEURONALE ARTIFICIALE

Pentru a utiliza inteligența artificială pentru detectarea delaminărilor în materiale compozite,

## IDENTIFICAREA DELAMINĂRILOR ÎN STRUCTURI MULTISTRAT

datele obținute prin analiză modală cu element sunt introduse într-un sistem de învățare automată, acesta fiind învățat să recunoască tiparele care indică lungimea delaminării în structură. În lucrarea de față, ca date de intrare au fost utilizate cele cinci frecvențe obținute prin intermediul analizelor modale, iar ca ieșire a fost introdusă lungimea delaminării. Rețeaua neuronală artificială a fost generată prin intermediul programului MATLAB cu ajutorul modulului Neural Network, prin utilizarea a două straturi ascunse a câte 50 de neuroni și prin folosirea algoritmului de antrenare Bayesian Regularisation (funcția trainBR). Algoritmul trainBR utilizează o metodă numită backpropagation cu rată de învățare adaptivă, care ajustează rata de învățare a rețelei în timpul antrenamentului pentru a optimiza performanța acesteia. Arhitectura rețelei neuronale artificiale este prezentată în Figura 3.1.

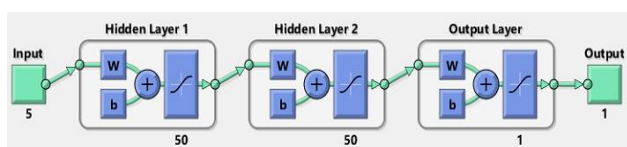


Fig. 3.1. Arhitectura rețelei neuronale artificiale.

Parametrii de antrenament au fost ajustați în funcție de performanța rețelei neuronale pentru a asigura o convergență adecvată. În MATLAB, performanța unei rețele neuronale poate fi verificată folosind funcția perform sau prin intermediul butoanelor "Performance" și "Regression" disponibile în interfața grafică de utilizator. Butonul "Performance" din MATLAB este folosit pentru a evalua performanța unei rețele neuronale antrenate, prin afișarea unor grafice care arată curbe de eroare, specifice problemei, Figura 3.2. Butonul "Regression" din MATLAB este utilizat pentru a compara ieșirile prezise ale rețelei cu valorile reale, Figura 3.3.

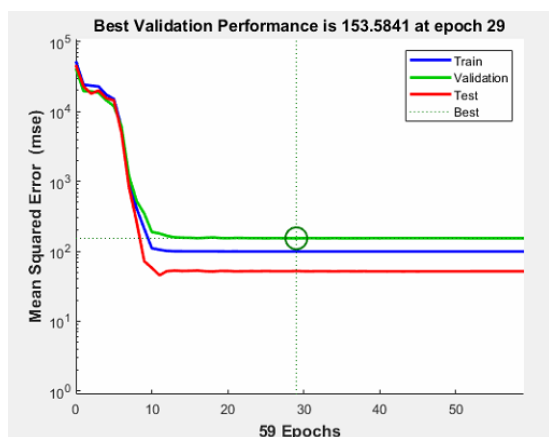


Fig. 3.2. Erorile obținute după antrenare, performanța rețelei.

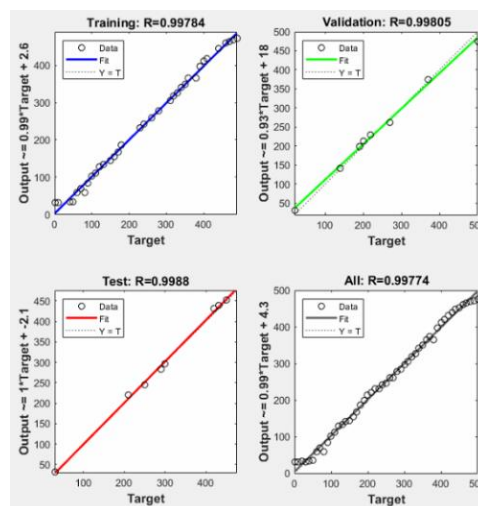


Fig. 3.3. Compararea ieșirilor prezise cu cele reale.

## 4. TESTAREA REȚELEI NEURONALE ARTIFICIALE

Odată ce modelul inteligent a fost antrenat, acesta poate fi utilizat pentru a determina lungimea delaminărilor în materiale multistrat într-un mod rapid și precis. Modelul poate fi integrat într-un sistem de monitorizare continuă a structurii, astfel încât să poată detecta delaminările în timp real și să permită intervenții rapide.

În lucrarea de față, pentru a testa rețeaua, s-au generat scenarii de defecte prin intermediul SolidWorks simulation, astfel încât lungimea delaminării pentru fiecare scenariu, să fie diferită față de valorile de antrenare. Datele de test, care au constat din primele 5 valori ale frecvențelor naturale, au fost introduse în rețea, iar rezultatele obținute împreună cu eroare de predicție sunt ilustrate în Tabelul 1.

Tabelul 1. Rezultatele obținute

Scenariu	Lungime delaminare [mm]		Eroare obținută [%]
	Reală	Prezisă	
1	6	4,243	0.176
2	9	8,265	0.073
3	18	15,301	0.270
4	27	26,298	0.070
5	42	41,518	0.048
6	83	82,354	0.065
7	106	104,445	0.156
8	233	232,667	0.033
9	328	328,419	-0.042
10	468	466,986	0.176

## 5. CONCLUZII

În general, detectarea defectelor este un proces esențial pentru a asigura siguranța și durabilitatea structurilor construite din materiale compozite și

stratificate. Prin utilizarea unor tehnologii și metode adecvate de detectare, se poate preveni cedarea sistemelor și se poate asigura o performanță optimă și o durată de viață îndelungată a structurii.

Utilizarea inteligenței artificiale pentru detectarea delaminărilor în materiale compozite are mai multe avantaje față de metodele tradiționale de analiză a frecvențelor naturale, în primul rând, poate detecta delaminările într-un mod mai precis și mai rapid decât analiza manuală a datelor, în al doilea rând, poate fi utilizată pentru a detecta delaminări în structuri mai complexe care unui om i-ar lua un timp mult mai îndelungat datorită numărului mare de date.

În acest studiu, eroarea maximă în mm este de 0,27 % în cazul scenariului 3, iar cea mai mică este 0,033 % în cazul scenariului 8. Din analiza efectuată se poate concluziona că erorile mari au fost obținute pentru cazurile în care lungimea delaminării a fost mai mică de 20 mm datorate diferenței mici între frecvențele naturale obținute, erori ce pot fi preîntâmpinate prin utilizarea schimbărilor relative de frecvență ca date de antrenare sau prin folosirea unei discretizări mai fine.

### BIBLIOGRAFIE

- [1] Soutis, C., Curtis, P.T., 2004. Advances in the detection of defects in composite materials. *Prog. Aerosp. Sci.* 40, 143–173.
- [2] Giurgutiu, V., 2003. Structural health monitoring of aerospace composites using fiber optic methods. *Compos. Sci. Technol.* 63, 1647–1656.
- [3] Callister W., *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New Kundu, T., Banerjee, S., 2012. Recent developments in ultrasonic nondestructive evaluation techniques of composite materials: A review. *Compos. Struct.* 94, 331–348.
- [4] Kim, D.H., Kim, Y.Y., Cho, Y.R., 2016. Non-destructive testing of composite structures using natural frequencies. *Compos. Struct.* 153, 546–555.
- [5] Chen, J., Wang, Y., Qiu, L., Wang, X., 2019. Experimental and numerical investigation of natural frequency-based damage detection in composite structures. *Compos. Struct.* 212, 420–429.
- [6] Shan, L., Yang, J., Lin, R., Hu, Z., 2021. Delamination detection in composite laminates based on the changes of natural frequency with a time-varying transfer function method. *Compos. Part B: Eng.* 225, 109346.
- [7] Yuan, S., Sun, X., Yan, J., 2016. Delamination detection in composite laminates based on natural frequency changes using piezoelectric transducers. *Smart Mater. Struct.* 25, 055020.
- [8] Li, J., Li, Z., Li, X., Li, J., 2019. Delamination detection in composite laminates using natural frequency and probabilistic neural network. *J. Compos. Mater.* 53, 3777–3793.
- [9] Zhang, X., Lv, Z., Xu, Y., Fan, W., Wang, Q., 2020. Structural damage identification of composite plates using frequency response functions and deep learning. *Compos. Part B: Eng.* 197, 108178.
- [10] Li, J., Li, X., Li, Z., Li, J., 2020. Damage detection of composite laminates using a hybrid method of natural frequency and artificial neural network. *Compos. Part B: Eng.* 198, 108188.
- [11] Hosseini, R., Soleimanimehr, H., Haddadpour, H., 2021. Damage detection in composite plates using machine learning approaches and vibration data. *Compos. Part B: Eng.* 215, 108836.
- [12] Tufisi, C., Gillich, G.R., Modeling of complex shaped cracks, *Analele Universitatii Eftimie Murgu, Resita*, 25(2), 2018, pp. 155-162.

---

### Despre autori

Ing. **Carla-Silvana CONSTANTIN**

Universitatea Babeș-Bolyai, Reșița, Romania

Este programator la Compania Restart Software Development din Reșița, având finalizate studiile de licență în cadrul Universității Babeș-Bolyai, Facultatea de Inginerie, specializarea Informatică Industrială. În prezent urmează programul de master, Product Design Engineering. A efectuat cercetări în domeniul monitorizării integrității structurale, în special legat de detectarea defectelor în structuri prin folosirea răspunsului sistemului în ceea ce privește parametrii mecanici (frecvențe naturale, stres, deformare etc.) și tehnici de învățare automată. Cercetările sale s-au concentrat pe dezvoltarea metodelor de detectare a fisurilor transversale, delaminării, coroziunii folosind o abordare bazată pe relații analitice și inteligență artificială. A publicat mai multe lucrări de cercetare în domeniul său, cu următoarele realizări științifice: experiență în simulare pe calculator FEM statică și dinamică; aplicarea unei metode pentru detectarea, localizarea și evaluarea fisurilor de formă complex; experiență în dezvoltarea de modele de învățare automată luând în considerare regresia liniară și metodele de învățare profundă pentru detectarea fisurilor transversale în structuri asemănătoare grinzilor.

Ing. **Sergiu-Laurențiu OPRUȚ**

Universitatea Babeș-Bolyai, Reșița, Romania

Este proiectant la Compania Leea's Room din Deva, având finalizate studiile de licență în cadrul Universității Babeș-Bolyai Facultatea de Inginerie, specializarea Informatică Industrială. În prezent urmează programul de master Metode

## IDENTIFICAREA DELAMINĂRILOR ÎN STRUCTURI MULTISTRAT

și tehnologii avansate în industria autovehiculelor la Facultatea de Inginerie , Universitatea politehnică Timișoara. A efectuat cercetări în domeniul monitorizării integrității structurale, în special legat de detectarea defectelor în structuri prin folosirea răspunsului sistemului în ceea ce privește parametrii mecanici (frecvențe naturale, stres, deformare etc.) și tehnici de învățare automată. Cercetările sale s-au concentrat pe dezvoltarea metodelor de detectare a fisurilor transversale, delaminării, coroziunii folosind o abordare bazată pe relații analitice și inteligență artificială. A publicat mai multe lucrări de cercetare în domeniul său, cu următoarele realizări științifice: experiență în simulare pe calculator FEM statică și dinamică; aplicarea unei metode pentru detectarea, localizarea și evaluarea fisurilor de formă complex; experiență în dezvoltarea de modele de învățare automată luând în considerare regresia liniară și metodele de învățare profundă pentru detectarea fisurilor transversale în structuri asemănătoare grinzilor.