

PAPER DETAILS

TITLE: POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KIRISIN SERBEST TİTRESİMİNİN
İNCELENMESİ

AUTHORS: Ersoy Fatih ERDURCAN, Yusuf CUNEDİOĞLU

PAGES: 1090-1099

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/882666>



POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

Ersoy Fatih ERDURCAN^{1,*} , Yusuf CUNEDİOĞLU²

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 51240, Niğde Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada çekirdek tabakası alüminyum ve yüzeyleri porosite ihtiva eden fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ile kaplı simetrik yapıda ankastre sandviç bir kirişin serbest titreşim analizi incelenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğu kirişin tabaka kalınlığı boyunca bir polinom fonksiyonla değiştiği kabul edilmiştir. FDM'yi gerçeğe yakın bir şekilde temsil etmek için kaplama kalınlığının 25 tabakadan oluştuğu ve her bir tabaka kendi içinde homojen izotrop olarak modellenmiştir. Bu yapılara ait efektif yoğunluk ve elastisite modülü tabakalı kompozit kiriş teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada birinci mertebe kayma deformasyonu içeren Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak problemin çözümü sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilmiştir. Kirişin doğal frekanslarının hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Çalışmada porosite hacim oranının (a), çekirdek tabaka kalınlığının FDM kalınlık oranına (h/H), kiriş açıklığının yüksekliğine oranının (L/H) ve FDM'nin mekanik özelliklerini belirleyen polinom parametresinin (n) doğal frekansların üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen parametrelerin kirişin doğal frekanslarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Serbest titreşim, Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, Porosite, Sonlu elemanlar metodu.

INVESTIGATION OF THE FREE VIBRATION OF AN ALUMINUM BEAM COATED WITH FGM CONTAINING POROSITIES

ABSTRACT

In this study, the free vibration analysis of an aluminum beam coated with functionally graded material (FGM) containing porosities was investigated. The modulus of elasticity and density of the functionally graded material is assumed to vary with a polynomial function along the layer thickness of the beam. In order to represent the FGM in a realistic way, the coating thickness consists of 25 layers and each layer is modeled as homogeneous isotropic in itself. The effective density and modulus of elasticity of the FGM is determined using classical lamination theory. In this study, the solution of the problem was realized by using the finite element method using Timoshenko beam theory which includes first order shear deformation. The FEM code is written in MATLAB and the natural frequencies of the beam are calculated. A parametric study is conducted to show the influences of porosity (a), core thickness to FGM thickness ratio (h/H), beam span to height ratio (L/H) and power law index (n) on the natural beam frequencies. It was observed that the studied parameters had a significant effect on the natural frequencies.

Keywords: Free vibration, Functionally graded material, Porosity, Finite element method.

1. GİRİŞ

Kompozit, farklı malzemelerin öne çıkan özelliklerini tek bir malzemede toplama çabasıyla ortaya çıkan yapılardır. Kompozit malzemeler homojen malzemelere göre hafiflik, rijitlik ve yüksek mukavemetleri ile üstün oldukları için tercih edilirler. Maliyetlerinden dolayı geçmişte sadece özel uygulamalarda kullanılmışlarsa da üretim teknolojisi gelişip malzeme ucuzladıkça kompozitlerin günlük kullanıma da taşındığı gözlemlenmektedir. Yeni nesil elektrikli araçlarda ve yolcu uçaklarında yapının en az %50'si kompozitten oluşması bariz örneklerdendir.

Farklı tabakalardan oluşan kompozitlerde, kullanım esnasında tabakalar arasında yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Örneğin yüksek sıcaklığa maruz kalan bir metal, seramik ile kaplandığında bu metal bu sıcaklığa karşı dayanabilmektedir ama tabakalar arasında yüksek gerilmelere, çatlaklara ve ayrışmalara (delaminasyon) neden olmaktadır. Metal ve seramik malzeme

*Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: fatih.erdurcan@gmail.com

Geliş / Recieved: 12.12.2019 Kabul / Accepted: 05.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.658473

özelliklerinin farklı olması ve tabakalarda ani özellik değişimi buna yol açmaktadır. Bu problemi bertaraf etmek için bir grup Japon bilim adamı 1984'te termal bariyer tasarımı sırasında FDM fikrini ortaya koymuştur. FDM bir yüzeyi metal, diğer yüzeyi seramik ve iki yüzey arası bu iki malzemenin karışımından oluşan tabakalardan oluşturulur. Tabakalar arası malzeme özelliklerinin değişimi matematiksel bir fonksiyonla tanımlandığı için tabakalar arası malzeme özelliklerin birbirine yakın olması nedeniyle tabakalar arası ayrışma sorunu önemli derecede azalmış olur. Bu şekilde tasarlanmış yeni bir malzeme olan FDM'nin dinamik davranışlarının tasarım yaparken önceden bilinmesi önem arz etmektedir. Örneğin dinamik (değişken) kuvvetlere maruz kalan bir yapıda en önemli unsurlardan biri sistemin doğal frekanslarıdır. Doğal frekanslar doğru belirlenmediği takdirde dinamik kuvvetlerin etkisinde sistem rezonansa yakalanırsa, yapının ani ve beklenmedik hasar görmesi kaçınılmaz bir durumdur.

Literatürde homojen ve izotrop malzemeli kirişlerin dinamik ve serbest titreşimleri etraflıca araştırılmıştır. FDM kirişlerinin dinamik ve serbest titreşimini araştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Demir [1] fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin dinamik karakteristiklerini incelemiştir. Bu deneysel çalışmada sinterleme teknikleri ile üç farklı kiriş üretilip, serbest titreşim deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarını ticari bir sonlu eleman analizi programıyla teyit etmiştir. Rajasekaran ve ark. [2] çift yöne fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin dinamik karakteristiklerini incelemişler. Bu çalışmada, malzeme özelliklerinin dağılımı uzunluk ve kalınlık boyunca üstel bir (n) kuvvet parametrelili fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Euler Bernoulli kiriş teorisi kabulüne dayanarak virtüel iş prensibiyle çalışmanın formülasyonu yapılmıştır. Benzeri bir çalışmayı Wang ve ark. [3] malzeme özelliklerinin dağılımı uzunluk ve kalınlık boyunca exponansiyel fonksiyonlarla tanımlanarak yapmışlardır. Al Rjoub ve ark. [4] yapısı gözenekli (porositeli) olan fonksiyonel derecelendirilmiş bir kirişin dinamik karakteristiklerini incelemişlerdir. Dört farklı sınır şartı kullanarak çözümleri Euler Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisi kabulüne dayanarak matris transfer metodu ile çözmüşlerdir. Mohcine ve ark. [5] porositeli bir FDM kirişe çatlak da ekleyerek simetrik olmayan bir kirişin dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bouakkaz ve ark. [6] sandviç yapıli FDM kirişlerin serbest titreşimi için analitik bir çözüm bulmuşlardır. Kirişin iç kısmı homojen ve izotropik malzemeden, dış tabakaları da FD malzemeden yapılmıştır. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca bir kuvvet parametrelili fonksiyonla tanımlanmıştır. Kayma gerilme dağılımı için hiperbolik deformasyon kiriş teorisini kullanıp, diferansiyel denklemleri Hamilton prensibiyle bulup Navier yöntemiyle çözmüşlerdir. Su ve ark. [7] elastik zemine oturan FDM kirişler için genel bir Fourier serisi çözümü üretmişlerdir. Bu çözümün her türlü sınır şartlarına uyması çözümün özelliklerindendir. Kirişin iç kısmı homojen ve izotropik, dış kısımları FDM ve bunun tam tersi olan kirişler incelenmiştir. Soltanpour ve ark. [8] elastik zemine oturan çatlaklı bir FDM nanokirişin serbest titreşimini incelemişlerdir. Timoshenko kiriş teorisini kullanarak diferansiyel denklemleri Hamilton prensibiyle türetmişlerdir. Akbaş [9] çatlaklı bir FDM mikro kirişin serbest titreşimini değiştirilmiş stres teorisi (modified couple stress theory) ve klasik kiriş teorisiyle incelemiştir. Malzeme dağılımı kalınlık boyunca exponansiyel bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Van Lien ve ark. [10] birden çok çatlak ihtiva eden ve simetrik olmayan FDM kirişin serbest titreşimini farklı sınır şartları için araştırmıştır. Çalışmada Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Shabani ve ark. [11] kesiti uzunluk boyunca değişken kesitli çatlaklı kirişlerin serbest titreşim analizini Timoshenko kiriş teorisile incelemişlerdir.

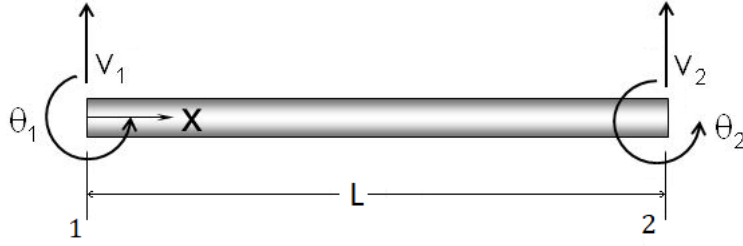
Bu çalışmada çekirdek tabakası izotrop alüminyum ve kaplama tabakası porositeli FDM'den yapılmış ankastre kirişin Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak serbest titreşim analizi incelenmiştir. Kaplama malzemesinin elastisite modülü ve yoğunluğu kalınlık boyunca bir polinom fonksiyon ile değiştiği kabul edilmiştir. Kirişin doğal frekanslarının hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Literatürde sandviç yapıda çekirdeği izotrop yüzey kaplaması FDM'den yapılmış kirişlerin serbest titreşimi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca klasik laminasyon teorisi yaklaşımıyla bir inceleme yapılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmayla literatürdeki bu boşluk doldurulmuş olacaktır. Bu çalışmada laminasyon teorisi yaklaşımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada porositenin, çekirdek tabaka kalınlığının FDM kalınlık oranına (h/H), kiriş açıklığının yüksekliğine oranının (L/H) ve FDM'nin mekanik özelliklerini belirleyen polinom parametresinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen parametrelerin kirişin doğal frekanslarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kirişin Sonlu Elemanlar Modellemesi

Kayma deformasyonunu etkisini dikkate alan Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Şekil 1'den görüleceği üzere kirişin her iki düğümü düşey yer değiştirme ve dönme serbestlik derecelerine sahiptir.

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ



Şekil 1. Kiriş serbestlik dereceleri

Rijitlik ve kütle matrisleri analitik olarak [14] verilmektedir.

$$[K_1] = \frac{EI_z}{2a^3(1+3\beta)} \begin{bmatrix} 3 & 3a & -3 & 3a \\ 3a & (4+3\beta)a^2 & -3a & (2-3\beta)a^2 \\ -3 & -3a & 3 & -3a \\ 3a & (2-3\beta)a^2 & -3a & (4+3\beta)a^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[M_1] = \frac{\rho A a}{210(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_2 & m_5 & -m_4 & m_6 \\ m_3 & -m_4 & m_1 & -m_2 \\ m_4 & m_6 & -m_2 & m_5 \end{bmatrix} + \frac{\rho I_z}{30a(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_7 & m_8 & -m_7 & m_8 \\ m_8 & m_9 & -m_8 & m_{10} \\ -m_7 & -m_8 & m_7 & -m_8 \\ m_8 & m_{10} & -m_8 & m_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada a kiriş uzunluğunun yarısını, E elastik modülünü, A kiriş kesit alanını ve I alan atalet momentini ifade etmektedir [14].

$$\beta = \frac{EI_z}{\kappa A G a^2} \quad (3)$$

Burada β kayma deformasyon faktörü, G kayma modülü ve (2) no'lu denklemdeki kütle matrisinin ifadeleri aşağıdaki gibidir [14];

$$\begin{aligned} m_1 &= 156 + 882\beta + 1260\beta^2 & m_2 &= (44 + 231\beta + 315\beta^2)a & m_3 &= 54 + 378\beta + 630\beta^2 \\ m_4 &= (-26 - 189\beta - 315\beta^2)a & m_5 &= (16 + 84\beta + 126\beta^2)a^2 & m_6 &= (-12 - 84\beta - 126\beta^2)a \\ m_7 &= 18 & m_8 &= (3 - 45\beta)a & m_9 &= (8 + 30\beta + 180\beta^2)a^2 & m_{10} &= (-2 - 30\beta + 90\beta^2)a \end{aligned} \quad (4)$$

Eksenel olarak yüklenen kiriş elemanların rijitlik ve kütle matrisleri ise aşağıdaki denklemlerle belirtilmiştir [14];

$$[K_2] = \frac{EA}{a} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad [M_2] = \rho A a \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Çözümün doğruluğunu artırmak için kiriş elemanın her düğümü üç serbestlik derecesine sahiptir. Bunun için serbestlik derecesine göre rijitlik ve kütle matrisleri birleştirilirse nihai ifadeler aşağıdaki gibi olur [11];

$$[K] = \begin{bmatrix} K_2[1,1] & & & K_2[1,2] & & \\ & K_1[1,1] & K_1[1,2] & & K_1[1,3] & K_1[1,4] \\ & K_1[2,1] & K_1[2,2] & & K_1[2,3] & K_1[2,4] \\ K_2[2,1] & & & K_2[2,2] & & \\ & K_1[3,1] & K_1[3,2] & & K_1[3,3] & K_1[3,4] \\ & K_1[4,1] & K_1[4,2] & & K_1[4,3] & K_1[4,4] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_2[1,1] & & & M_2[1,2] & & \\ & M_1[1,1] & M_1[1,2] & & M_1[1,3] & M_1[1,4] \\ & M_1[2,1] & M_1[2,2] & & M_1[2,3] & M_1[2,4] \\ M_2[2,1] & & & M_2[2,2] & & \\ & M_1[3,1] & M_1[3,2] & & M_1[3,3] & M_1[3,4] \\ & M_1[4,1] & M_1[4,2] & & M_1[4,3] & M_1[4,4] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Serbest titreşim yapan bir kirişe ait öz değer ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

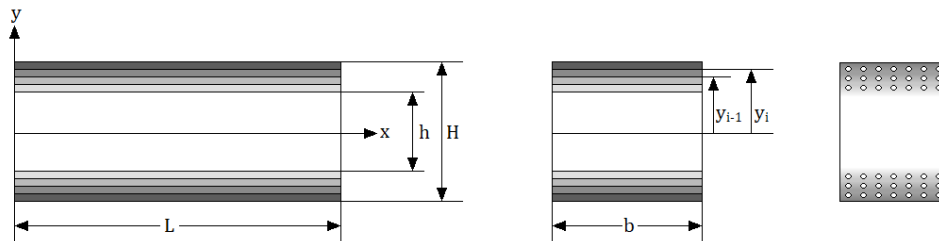
$$([K] - \omega^2 [M]) \{\bar{d}\} = 0 \quad (8)$$

Burada $[K]$, $[M]$, ω ve $\{\bar{d}\}$ sırasıyla global halde kirişin rijitlik matrisi, kütle matrisi, açısal hız ve mod şeklini ifade etmektedir. Açısal hız ifadesi boyutsuz olarak aşağıdaki gibi verilmektedir [15].

$$\bar{\omega} = \frac{\omega L^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}} \quad (9)$$

2.2. Kirişin FDM Olarak Modellemesi

Kiriş çekirdek tabakası alüminyum ve yüzeyleri porositeli FDM ile kaplı simetrik yapıdadır. Kaplama tabakası olan porositeli FDM'yi gerçeğe yakın bir şekilde temsil etmek için alt ve üst kaplama yüzeyleri 25'er tabaka olarak modellenmiş olup Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. FDM kirişin tabakalarla modellenmesi ve kesiti, gerçek FDM kirişin porositeli kesiti

Modellemede her tabaka kendi içinde homojen ve izotrop kabul edilmiştir. Kaplama tabakaları Alüminyum (Al) ve seramik (Al_2O_3) malzemelerin belirli oranlarda karışımlar kuralı gereğince oluşturulmaktadır. Bu tabakaların elastisite modülü ve yoğunlukları kalınlık boyunca değişmekte olup, değişim aşağıda verilen polinom fonksiyonlarla tanımlanmıştır [4].

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

$$\rho(y) = (\rho_c - \rho_m) \left(y + \frac{1}{2} \right)^n + \rho_m - \frac{a}{2} (\rho_c + \rho_m) \quad E(y) = (E_c - E_m) \left(y + \frac{1}{2} \right)^n + E_m - \frac{a}{2} (E_c + E_m) \quad (10)$$

Burada ρ_c seramiğin, ρ_m metalin yoğunluğunu, E_c seramiğin, E_m metalin elastisite modülünü, a porosite hacim oranını, y koordinat eksenini ve n polinom derecesini ifade etmektedir. y değişkeni aşağıda ifade edilen değerler ile verilmektedir;

$$y = -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} + \frac{1}{\eta}, -\frac{1}{2} + \frac{2}{\eta}, \dots, \frac{1}{2} \quad \text{ve} \quad \eta = \left(\frac{N}{2} \right) - 1 \quad (11)$$

Kiriş tarafsız eksene göre simetrik olup, kirişe ait boyutlar L kiriş uzunluğunu, H kiriş kalınlığını, h çekirdek tabaka kalınlığını, b genişliği ve N tabaka sayısını temsil etmektedir. Kirişin yoğunluğunu ve elastisite modülünü elde etmek için klasik laminasyon teorisi kullanılarak, efektif yoğunluk ve elastisite aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır [16].

$$\rho_{ef} = \frac{8}{(H-h)^3} \sum_{i=1}^{N/2} (\rho_y)_i (y_i^3 - y_{i-1}^3) \quad E_{ef} = \frac{8}{(H-h)^3} \sum_{i=1}^{N/2} (E_y)_i (y_i^3 - y_{i-1}^3) \quad (12)$$

2.3. Kiriş Modelin Doğrulanması

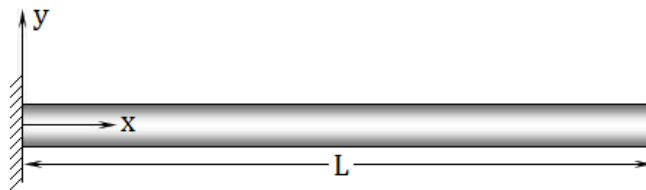
Modelin doğrulanması için literatürde var olan basit mesnetli tarafsız eksene göre simetrik bir FDM kiriş örneği ele alınmıştır [12]. Kiriş modele ait boyutlar $L = 200$ mm, $H = 5$ mm, $b = 20$ mm olarak verilmiştir. Kiriş modele ait doğal frekansların hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere MATLAB'ta yazılan sonlu elemanlar kodunun doğruluğu sağlanmış olmaktadır.

Tablo 1.FDM kirişin doğal frekansları (Hz).

Polinom derecesi		1.doğal frekans	2.doğal frekans	3.doğal frekans	4.doğal frekans
$n = 1$	Demir [12]	518.20	2065.88	4624.09	8162
	Bu çalışma	518.09	2065.70	4623.29	8159.59
$n = 5$	Demir [12]	443.06	1766.61	3954.27	6979.69
	Bu çalışma	443.04	1766.47	3953.58	6977.63
$n = 10$	Demir [12]	404.67	1613.63	3611.82	6375.24
	Bu çalışma	404.67	1613.49	3611.20	6373.37

2.4. Problemin Tanımlanması ve İrdelenmesi

Ele alınan ankastre kiriş Şekil 3'de verilmiş olup çekirdek tabakası alüminyum yüzey kaplama tabakaları da porositeli FDM'den yapılmıştır. Kiriş tarafsız eksene göre simetrik yapıdadır. Kaplama FDM'nin elastisite modülü ve yoğunluğu kalınlık boyunca değişim polinom bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Ankastre sandviç kirişe ait kesit Şekil 2'de verilmiştir.



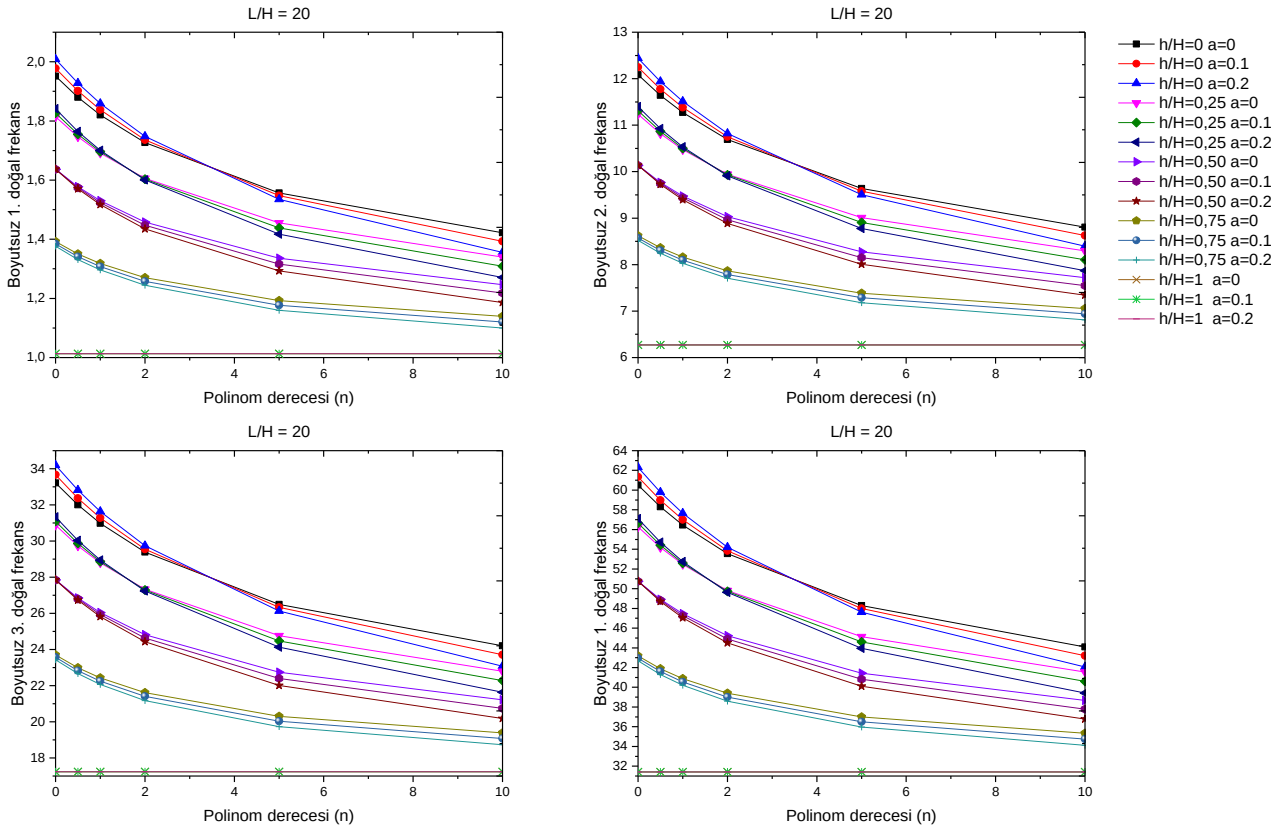
Şekil 3.Ankastre FDM kiriş

Kirişin geometrik boyutları, kiriş yüksekliği $H=0.005$ m ve kiriş genişliği $b = 0.02$. Alüminyum ve seramik malzemelerin özellikleri $E_c = 380$ Gpa, $\rho_c = 3950$ kg/m³, $E_m = 70$ Gpa, $\rho_m = 2700$ kg/m³ olarak alınmıştır. Analizlerde kiriş 100 elemana bölünmüştür ve sonuçların yakınsaması sağlanmıştır. Çalışmada FDM'nin porosite hacim oranının (a), kiriş narinlik (L/H)

oranın, çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının ve polinom derecesinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. FDM'deki porositenin etkisini görmek için $a = 0, 0.1, 0.2$ değerleri seçilmiştir. Kiriş narinlik (L/H) oranlarının doğal frekanslar üzerindeki etkilerini görmek için $L/H = 5, 10, 20, 40, 60$ değerleri seçilmiştir. Alüminyum çekirdek tabakasının ve kiriş yüksekliğine (h/H) oranlarının frekanslar üzerindeki etkilerini görmek için $0, 0.25, 0.50, 0.75, 1$ değerleri seçilmiştir. $h/H = 0$ durumu kirişin tamamen FDM, $h/H = 1$ durumu ise kirişin tamamen alüminyum olduğu anlamına gelmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

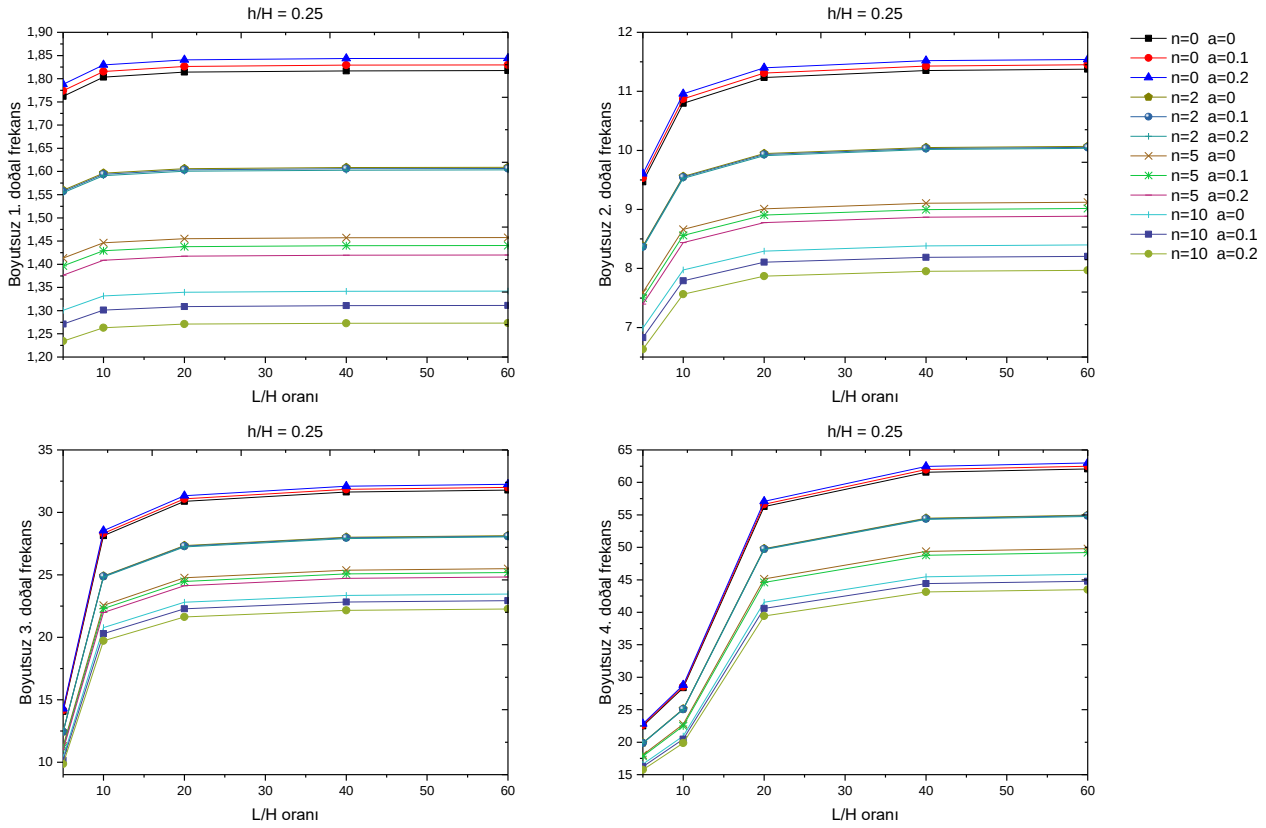
Polinom derecesinin $L/H = 20$ ve farklı h/H ve porosite hacim oranlarında boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek açısından ankastre kiriş için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'ten görüleceği gibi narinlik oranı $L/H = 20$ değerinde h/H oranları düştükçe boyutsuz doğal frekanslar yükselmektedir. Bir diğer ifadeyle kirişteki FDM'nin oranının artmasıyla birlikte boyutsuz doğal frekansların yükseldiği gözlemlenmektedir. Yine Şekil 4'ten görüleceği üzere porositenin etkisi polinom derecesine ve h/H oranına bağlıdır. $h/H=0$ oranında, yani kiriş tamamen FDM'den oluşunca, yaklaşık olarak $n=3.5$ değerinden önce porosite boyutsuz doğal frekanslarını arttırırken, $n=3.5$ değerinden sonra boyutsuz doğal frekanslarını düşürmektedir. Alüminyum çekirdek tabaka en az kirişin %50'sini teşkil edince, yani $h/H = 0.50$ değerinden itibaren, her polinom derecesi için porosite boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir. Şekil 4'ten görüleceği üzere $h/H = 1$ oranı haricinde polinom derecesi (n) artarken boyutsuz doğal frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. $h/H=1$ değerinde kiriş tamamen alüminyumdan oluşmaktadır ve polinom derecesinden ve FDM'nin porositesinden tamamen bağımsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Ankastre kirişte $L/H = 20$ narinlik oranı için farklı a değerlerinde ve h/H oranlarında ilk dört boyutsuz doğal frekansların polinom derecesi (n) ile değişimi

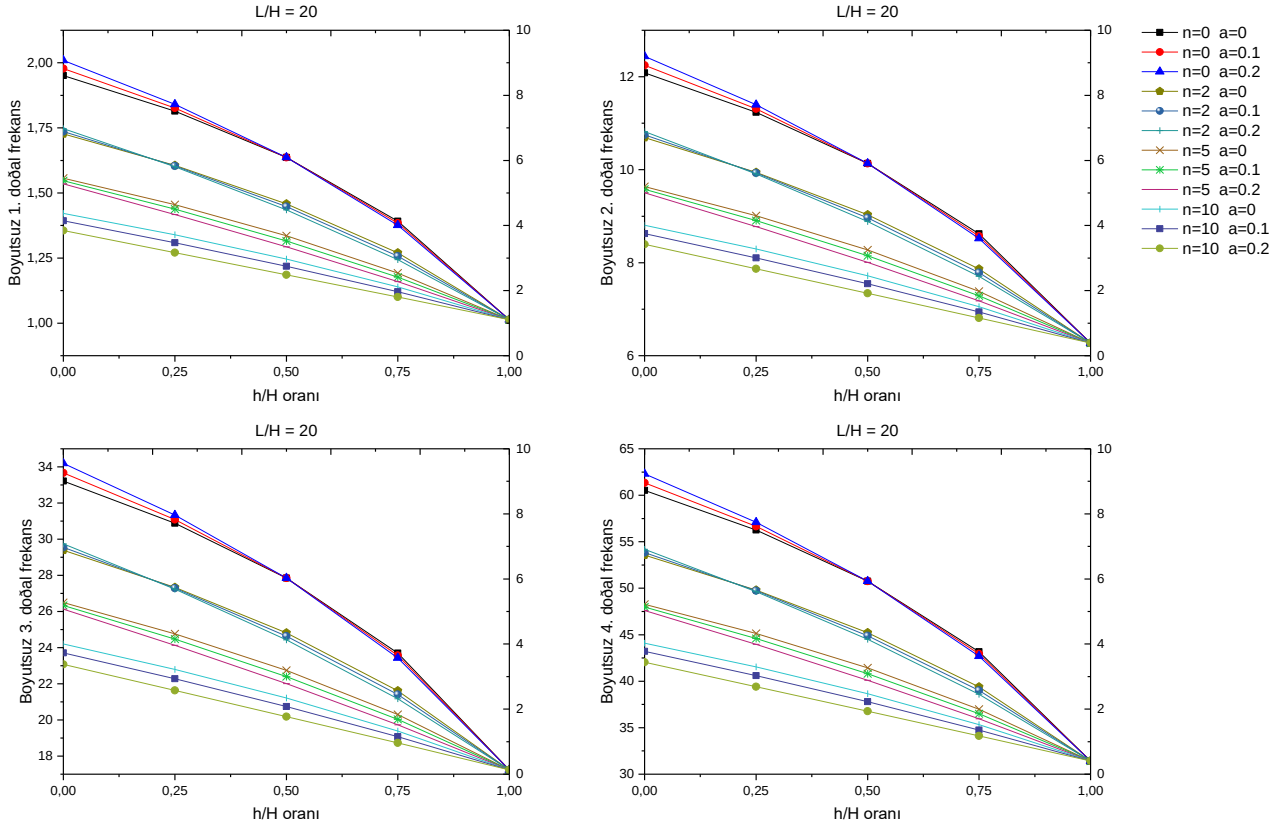
POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

L/H narinlik oranının $h/H = 0.25$ ve farklı polinom derecelerinde ve porosite hacim oranlarında boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini incelemek açısından analizler yapılmıştır. Şekil 5'ten görüleceği gibi $h/H = 0.25$ değerinde polinom derecesi n yükseldikçe boyutsuz doğal frekanslar düşmektedir. L/H narinlik oranları arttıkça boyutsuz doğal frekanslar da yükselmektedir. Ancak ilk üç boyutsuz doğal frekans değerleri $L/H = 20$ narinlik oranına kadar, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri $L/H = 40$ oranına kadar ciddi bir artış sergilerken bu oranlardan sonra boyutsuz doğal frekans değerleri neredeyse yatay seyretmektedir. Şekil 5'ten yine görüleceği gibi porosite, polinom derecesi yaklaşık olarak $n=2$ 'den küçük değerlerde boyutsuz doğal frekans değerlerini yükseltirken, $n=2$ 'den itibaren boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir.



Şekil 5. Ankastre kirişte $h/H = 0.25$ oranı için farklı a değerlerinde ve polinom derecelerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin L/H narinlik oranları ile değişimi

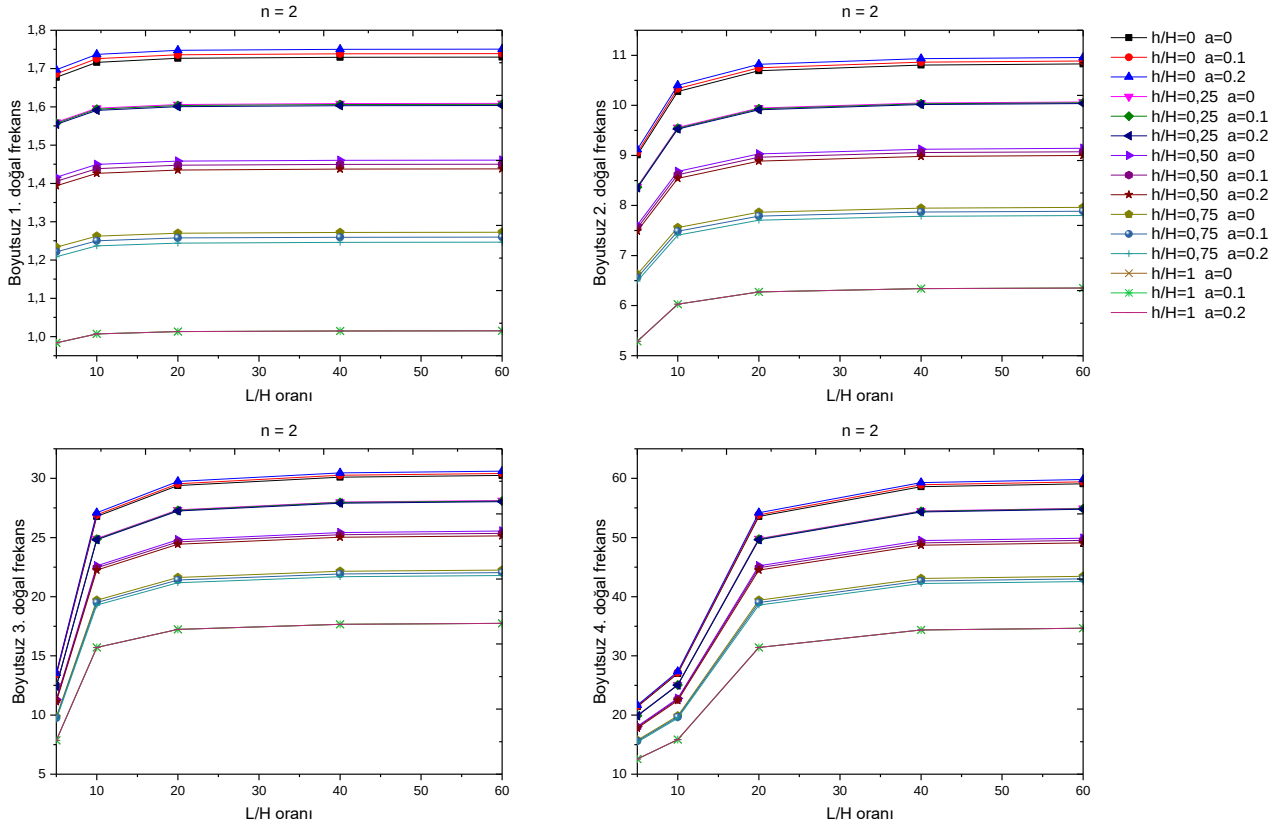
Çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının $L/H = 20$ ve farklı porosite hacim oranlarında ve polinom derecelerinde boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'dan görüleceği gibi narinlik oranı $L/H = 20$ değerinde polinom derecesi düştükçe doğal frekanslar yükselmektedir. Bu tüm h/H oranları için geçerlidir. Şekil 6'dan yine görüleceği üzere h/H oranı yükseldikçe doğal frekans değerleri düşmektedir. $h/H = 1$ oranında kiriş tamamen homojen izotrop çekirdek tabakasından ibaret olup (n) polinom derecesinden bağımsız olmaktadır. Porositenin etkisi polinom derecesine ve h/H oranına bağlıdır. Düşük polinom derecelerinde $h/H = 0.50$ oranına kadar porosite boyutsuz doğal frekansları yükseltirken, $h/H = 0.50$ oranından büyük değerlerde porosite boyutsuz doğal frekansları düşürmektedir. Polinom derecesi 3.5 değerinden yüksek olunca porosite her h/H oranında boyutsuz doğal frekanslarını düşürmektedir.



Şekil 6. Ankastre kirişte $L/H = 20$ oranı için farklı a değerlerinde ve polinom derecelerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin h/H oranları ile değişimi

L/H narinlik oranının $n = 2$ ve farklı çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının ve porositenin boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek açısından analizler yapılmıştır. Şekil 7'den görüleceği gibi boyutsuz doğal frekans değerleri narinlik oranı L/H arttıkça yükselmektedir. Ancak ilk üç boyutsuz doğal frekans değerleri $L/H = 20$ oranına, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri $L/H=40$ kadar ciddi bir artış sergilerken bu oranlardan sonra boyutsuz doğal frekans değerleri neredeyse yatay seyretmektedir. Şekil 7'den yine görüleceği üzere h/H oranı yükseldikçe boyutsuz doğal frekans değerleri düşmektedir. Porosite $h/H = 0.25$ değerine kadar boyutsuz doğal frekans değerlerini yükseltirken, $h/H = 0.50$ değerinden itibaren boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir.

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ



Şekil 7. Ankastre kirişten = 2 polinom derecesi için farklı h/H oranlarında ve a değerlerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin narinlik oranı L/H ile değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Timoshenko kiriş teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yüzeyleri porositeli FDM ile kaplı bir kirişin serbest titreşim durumu incelenmiştir. Doğal frekanslar rijitliğin ve kütle'nin bir fonksiyonu olduğundan ve alüminyumdan rijit ve ağır olan FDM'nin kirişe eklenmesi ile doğal frekans değerleri etkilenmektedir. Çalışmada kiriş narinlik (L/H) oranının, çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının porosite hacim oranının (a) ve polinom derecesinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlenebilir:

- Polinom derecesi n 'nin artmasıyla boyutsuz doğal frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Kirişte FDM tabaka kalınlığının artması, yani h/H oranının düşmesi, boyutsuz doğal frekans değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır.
- Kirişte L/H narinlik oranları arttıkça boyutsuz doğal frekans değerlerinin yükseldiği görülmüştür.
- İlk üç boyutsuz doğal frekans değerleri $L/H=20$, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri $L/H=40$ oranından sonra kiriş narinlik oranının pek bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Porositenin etkisi h/H oranına ve polinom derecesine bağlıdır. Düşük h/H oranlarında porosite boyutsuz doğal frekans değerlerini belirli bir polinom derecesine kadar artırıp sonra azaltırken, yüksek h/H oranlarında porositenin her polinom derecesinde boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

İncelenen parametrelerde değişiklikler yapılarak arzu edilen tasarımlar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] E. Demir, "Vibration and damping behaviors of symmetric layered functional graded sandwich beams," *Struct Eng Mech*, vol. 62(6), pp. 771-780, 2017.
- [2] S. Rajasekaran and H. B. Khaniki, "Free vibration analysis of bi-directional functionally graded single/multi-cracked beams," *Int Journal of Mech Sci*, vol. 144, pp. 341–356, 2018.
- [3] Z. Wang, X. Wang, G. Xu, S. Cheng and T. Zeng "Free vibration of two-directional functionally graded beams," *Composite Structures*, vol. 135, pp. 191–198, 2016.
- [4] Y. S. Al Rjoub and A. G. Hamad, "Free Vibration of Functionally Euler-Bernoulli and Timoshenko Graded Porous Beams using the Transfer Matrix Method," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol 21(3), pp. 792-806, 2017.
- [5] C. Mohcine, M. El Bekkaye and K. El Bikri, "Geometrically Non-Linear Free and Forced Vibration of Clamped-Clamped Functionally Graded Beam with Discontinuities," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 1870–1875, 2017.
- [6] K. Bouakkaz, L. Hadji, N. Zouatnia and E. A. Adda Bedia, "An analytical method for free vibration analysis of functionally graded sandwich beams," *Wind and Structures*, vol. 23(1), pp. 59-73, 2016.
- [7] Z. Su, G. Jin, Y. Wang and X. Ye, "A general Fourier formulation for vibration analysis of functionally graded sandwich beams with arbitrary boundary condition and resting on elastic foundations," *Acta Mech*, vol. 227, pp. 1493–1514, 2016.
- [8] M. Soltanpour, M. Ghadiri, A. Yazdi and M. Safi, "Free transverse vibration analysis of size dependent Timoshenko FG cracked nanobeams resting on elastic medium," *Microsyst Technol*, vol. 23, pp. 1813–1830, 2017.
- [9] S. D. Akbaş, "Free vibration of edge cracked functionally graded microscale beams based on the modified couple stress theory," *Int Journal of Str Stab and Dynamics*, vol. 16(10), 1750033, 2016.
- [10] T. Van Lien, N. T. Duc, and N.T. Khiem, "Free vibration analysis of multiple cracked functionally graded timoshenko beams," *Lat Am Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 1752-1766, 2017.
- [11] S. Shabani, Y. Cunedioğlu, "Free vibration analysis of cracked functionally graded non-uniform beams," *Materials Research Express*, Vol. 17(1), pp 1-15, 2020.
- [12] H. Çallıoğlu, E. Demir, Y. Yılmaz and M. Sayer, "Vibration analysis of functionally graded sandwich beam with variable cross-section," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 18(3), pp. 351-360, 2013.
- [13] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Boston: Cengage Learning, 2015.
- [14] M. Petyt, *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, New York: Cambridge, 2010.
- [15] E.F.Erdurcan, Y.Cunedioğlu, "Free Vibration Analysis of a Functionally Graded Material Coated Aluminum Beam," *AIAA Journal*, vol. 58(2), 2020.
- [16] R.F. Gibson, *Principles of Composite Materials*, Boca Raton: CRC Press, 2016.

