



Farklı Fiber Yönlenme Açılarının Tabakalı Kompozit Kirişlerin Doğal Frekansına Etkisinin Yanıt Yüzey Metodu ile İncelenmesi

Sinan Maras^{1*}, Abdullah Tahir Şensoy²

^{1*} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-2651-374X), sinan.maras@omu.edu.tr

² Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9371-8307), tahir.sensoy@samsun.edu.tr

(4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, November 10 - 13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1201793)

ATIF/REFERENCE: Maras, S. & Şensoy, A. T. (2022). Farklı Fiber Yönlenme Açılarının Tabakalı Kompozit Kirişlerin Doğal Frekansına Etkisinin Yanıt Yüzey Metodu ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (43), 48-54.

Öz

Bu çalışma, farklı fiber yönlenme açılarının karbon elyaf takviyeli epoksi tabakalı kompozitlerin doğal frekans değerlerine ne şekilde etki ettiğinin yanıt yüzey metodu (YYM) ile belirlenmesini amaçlamaktadır. Box-Behnken tasarımına (BBT) göre belirlenen 15 adet tasarım konfigürasyonu ile deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. ANSYS sonlu elamanlar analizi paket programında deney tasarım noktalarındaki girdi parametrelerine uygun olarak oluşturulan modellerin modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Temel frekans değerleri yanıt vektörü olarak elde edilmiştir. Kuadratik regresyon (KR) modelinin kurulması için girdi parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen yanıt verileri kullanılmıştır. Modelin tahmin kabiliyetinin artırılması ve daha basit bir model kurulması amacıyla, istatistiksel olarak anlamsız olan terimler modelden çıkarılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, literatürle uyumlu bir şekilde, dış tabakalardaki fiber yönlenme açılarının yapının doğal frekansına olan etkisinin, tarafsız eksende bulunan merkez tabakaya kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Rastgele tasarım parametrelerinde modellenen 112 adet sonlu elemanlar modeli modal analize tabi tutulmuştur. Titreşim analizi sonuçları kullanılarak makine öğrenmesi tabanlı "Gauss Process Regression" yöntemi ile yeni bir regresyon modeli kurulmuştur. Önerilen bu matematiksel modelin BBT örneklem parametreleri için KR modeline kıyasla yaklaşık 34 kat daha az hata ile tahmin sağlayabildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı Kompozitler, Titreşim Analizi, Sonlu Elemanlar Metodu, Box-Behnken Yöntemi, Yanıt Yüzey Metodu

Investigating the Effect of Different Fiber Orientation Angles on the Natural Frequency of Laminated Composite Beams by Response Surface Method

Abstract

This study aims to determine how different fiber orientation angles affect the natural frequency values of carbon fiber reinforced epoxy layered composites by response surface method (RSM). Experimental design was carried out with 15 design configurations determined according to the Box-Behnken Design (BBD). Modal analyzes of the models created in accordance with the input parameters at the experimental design points were carried out in the ANSYS finite element analysis package program. The fundamental frequency values were obtained as the response vector. Input parameters and corresponding response data were used to construct the quadratic regression (QR) model. Statistically insignificant terms were removed from the model in order to increase the predictive ability of the model and to establish a simpler model. According to the analysis of variance (ANOVA) results, in accordance with the literature, the effect of fiber orientation angles in the outer layers on the natural frequency of the structure was calculated to be approximately 2 times higher than in the central layer located in the neutral axis. 112 finite element models modeled in random design parameters were subjected to modal analysis. A new regression model was established with the machine learning-based "Gaussian Process Regression" method using the vibration analysis results. It has been determined that this proposed mathematical model can provide an estimate with approximately 34 times less error for BBD sampling parameters compared to the QR model.

Keywords: Laminated Composites, Vibration Analysis, Finite Element Method, Box-Behnken Method, Response Surface Method

* Sorumlu Yazar: sinan.maras@omu.edu.tr

1. Giriş

Kompozit malzemeler rijitliği, enerji yutma kapasitesi, yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci vb. gibi özellikler açısından diğer birçok malzemeye göre daha üstün olmaları sebebiyle günümüzde mühendislik malzemesi olarak pek çok yapıda kullanılmaktadır. Tabakalı kompozitler ise temel malzeme doğrultusuna göre farklı veya aynı açısall yönelmeye sahip, birçok katmanın üst üste istiflenmesi ile oluşturulan kompozit yapılarıdır. Tabakalı kompozit malzemelerin farklı yüklemeye şartlarında çalışabilmesi için gerekli olan mekanik özellikleri, tabakaların yönelme açıları ve diziliş sırası değiştirilerek elde edilebilmektedir. Günümüzde otomobil, uçak ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bu malzemelerin tasarım aşamasında titreşim davranışlarının incelenmesi oldukça büyük bir önem arz etmektedir (Şahin, 2006). Kompozit yapıların dinamik davranışlarının incelenmesi hususunda birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda malzeme ve geometrik parametrelerin, yapının enerji yutma kapasitesi, doğal frekans ve mod şekilleri gibi dinamik davranışı üzerindeki etkileri nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir (Ganapathi, Kalyani, Mondal, & Prakash, 2009; Srinivasa, Suresh, & Prema Kumar, 2014; Thai & Kim, 2010; Zhen & Wanji, 2006). Bu yöntemlerin her biri yüksek hesaplayıcı kapasitesi, uzun hesaplama zamanı ve yüksek üretim maliyeti gibi oldukça zahmetli bir süreç gerektirmektedir. Birçok problemde ise gerçek değere yakın hassas sonuçlar fiziksel anlamda birkaç özel durumda gerekebilmektedir. Mühendislik problemlerinde hesaplama süresini kısaltıp daha hızlı ve daha kolay hesaplama imkânı ile kabul edilebilir hassasiyette sonuçlar veren istatistiksel regresyon analizi kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır (Dagli, Ergut, & Turan, 2020). Tabakalı kompozit malzemelerin istatistiksel yöntemlerle titreşim analizinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmalardan, Pashmforoush (2019) fonksiyonel olarak derecelendirilmiş grafen takviyeli kompozit plakaların serbest titreşim özellikleri üzerinde istatistiksel bir analiz yapmıştır. Kalınlık oranı, hacim oranı, plaka sınır şartı gibi çeşitli girdi parametrelerinin bir fonksiyonu olarak plakaların boyutsuz doğal frekanslarını ifade etmek için bir regresyon modeli geliştirmiştir. Altabay (2018), bazalt elyaf takviyeli polimer tabakalı kompozitlerin değişken kalınlık ve elastik kısıtlama katsayılı sınır şartlarındaki doğal frekanslarının tahmini için sonlu şerit geçiş matrisine dayalı olarak yanıt yüzey metodunu (YYM) kullanmışlardır. de Assis and Gomes (2021), tabakalı kompozit plakalardaki bir çatlağın konumunu, boyutunu ve yönünü tahmin etmek için YYM, metasezgisel ayçiçeği optimizasyonu ve yapay sinir ağları yöntemlerini kullanmışlardır. Reddy, Reddy, and Reddy (2013) dört kenarı ankastre sınır koşuluna sahip, tabakalı kompozit plakanın fiber yönelme açısına bağlı olarak doğal frekanslarını tahmin etmek için D-optimal tasarım ve YYM kullanmışlardır. Doğal frekanslar, sonlu elemanlar metodu (SEM) paket programı ile bulunmuştur. Geliştirilen modeli, model geliştirmek için hiç kullanılmayan test verileriyle test etmişler, belirleme katsayısı ve kalıntı analizini kullanarak modeli doğrulamışlardır. Optimal istifleme dizilimi için yan-kalınlık oranlarının, en-boy oranlarının ve modül oranlarının doğal frekans üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Pashmforoush (2022), grafen takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş plakanın serbest titreşim davranışını, SEM ve makine öğrenmesi yaklaşımlarını kullanarak incelemiştir ve regresyon analizini

gerçekleştirmiştir. Doğal frekansı etkileyen en önemli parametrelerin sırasıyla sınır şartı tipi, grafenin hacim oranı ve ardından kalınlık oranı ve dağılım modeli olduğu sonucuna varmıştır. Jeawon, Drosopoulos, Foutsitzi, Stavroulakis, and Adali (2021), üç fazlı grafen/elyaf takviyeli tabakalı nanokompozit plakaların temel frekansını maksimize etmek için optimum tasarımı ve analizi üzerine çalışmışlardır. Grafen ve fiberin homojen olmayan dağılımlarının yanı sıra fiber yönelmelerinin tasarım verimliliğini artırmada oldukça etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Adali and Verijenko (2001), çeşitli açısall dizilişlere sahip hibrit kompozitlerin serbest titreşimlerinde, temel frekansı maksimize etmek için optimal istifleme dizilimlerini araştırmışlardır. Karakaya and Soykasap (2011), temel doğal frekans ve burkulma yükünün maksimizasyonu için hibrit kompozit plakaların istifleme dizilimi tasarımını genetik ve benzetimli tavlama algoritmalarını kullanarak araştırmışlardır. Todoroki and Ishikawa (2004), çeşitli istifleme dizilişlerine sahip silindirik bir kabuğun burkulma yükünün maksimizasyonunda yanıt yüzeyinin oluşturulması için yeni bir deneysel tasarım yöntemi önermişlerdir. Cherniaev and Komarov (2015) mukavemet, burkulma, titreşim ve imalat kısıtlamalarına bağlı bir kompozit tahrik mili tasarımında, elyaf yönelme açılarının ve tabaka istifleme sırasının belirlenmesinde YYM kullanmışlardır. Jafari, Yousefi, and Hosseini-Hashemi (2015) çarpık tabakalı kompozit plakaların titreşim analizinde istifleme sırasını optimize etmek için genetik algoritma (GA) ve yapay sinir ağlarını kullanmışlar ve tasarım değişkenleri olarak fiber yönelme açılarını ele almışlardır. Çarpık açıların, sınır koşullarının, en-boy oranlarının ve simetrik ve anti-simetrik yerleşimin optimal sonuçlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Fallahi (2021) lineer fiber yönelme açılarının tanımını kullanarak ilk kritik burkulma yükünü ve ilk doğal frekansı maksimize etmek için GA optimizasyon yöntemini uygulamıştır. GA yaklaşımının yakınsamasını göstermek için tepki yüzeyi (RS) yöntemini kullanan bir model geliştirmiştir.

Literatür taraması sonucunda, tabakalı kompozit kirişlerin titreşim analizi ile ilgili, çeşitli tabaka diziliş durumlarında elde edilen doğal frekansları minimize veya maksimize etmeyi amaçlayan optimizasyon çalışmalarının bulunduğu görülmektedir. Ancak, fiber yönelme açısındaki değişikliğe bağlı olarak kompozit kirişin doğal frekansların tahmini hususunda oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada literatüre katkı sağlaması açısından, üç tabakalı karbon fiber takviyeli kompozit kirişlerdeki fiber yönelme açılarının yapının doğal frekansına olan etkilerinin YYM ile incelenmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Yöntem iki ana adımdan oluşmaktadır: Nümerik analiz ve YYM. İlk adım, 3 tabakaya sahip fiber takviyeli kompozit kirişin sonlu elemanlar modelinin elde edilerek doğrulanmasını, ikinci adım ise bağımsız değişken olarak tanımlanan tabakalardaki yönelme açılarının farklı kombinasyonlarını içeren deney tasarımını ve bu kombinasyonların yapının doğal frekansına olan etkilerinin farklı yanıt yüzey metodları ile irdelenmesini içermektedir.

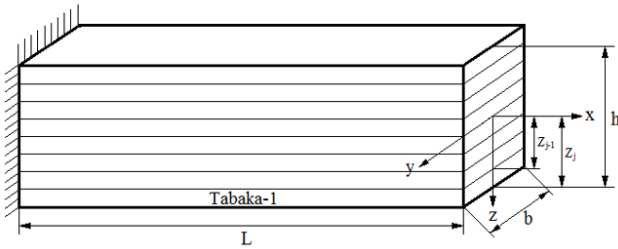
2.1. Nümerik Analiz

Tabakalı kompozit kirişin titreşim parametreleri, sonlu eleman yöntemi ile modellenip çözümü gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Kiriş ANSYS paket programı ile modellenmiştir. Model, SHELL 281 elemanı kullanılarak oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. SHELL 281 elemanının 8 düğümü bulunmaktadır. Her düğüm, x, y, z yönlerinde öteleme ve dönme dahil olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bu eleman, ince kabuk yapılarının analizi için uygun bir geometriye sahiptir (Ozdemir et al., 2018).

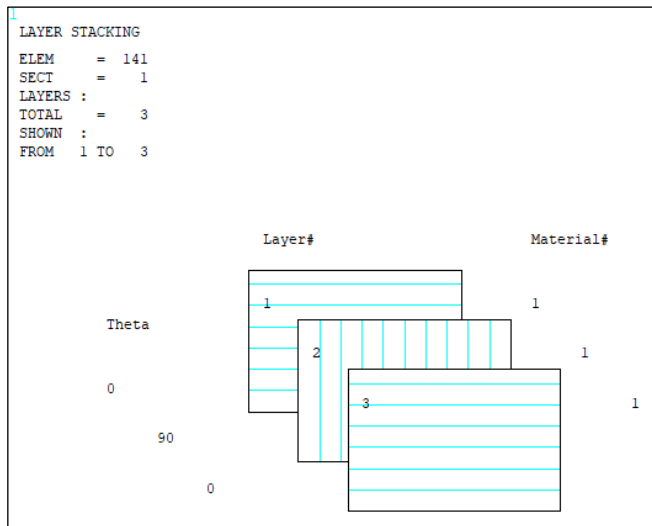
Modellenen tabakalı kompozit kiriş 320 eleman ve 1050 düğümden oluşmaktadır. Geometrik olarak kirişin uzunluğu ve genişliği sırasıyla $L=200$ mm, $b=25$ mm'dir. Her katmanın kalınlığı $t=0.269$ mm'dir (Şekil 1). Kirişler ankastre-serbest şartına sahiptir ve karbon fiber/epoksi katmanlardan oluşan 3 tabakalı yapı olarak modellenmiştir (Şekil 2). Çalışma kapsamında ele alınan kompozit malzemenin özellikleri (Ghasemi, Paknejad, & Fard, 2013) aşağıda verildiği gibidir.

$$E_{11}=120 \text{ GPa}, E_{22}=7.9 \text{ GPa}, G_{12}=G_{13}=5.5 \text{ GPa},$$

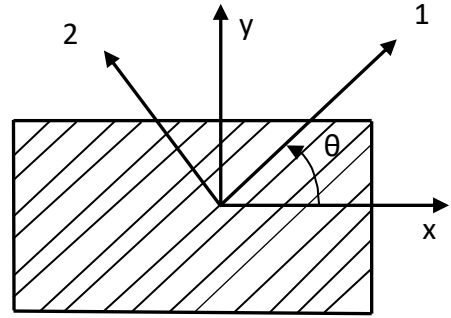
$$\nu_{12}=\nu_{23}=0.33 \text{ (poison oranı)}, (\text{yoğunluk}) =1580 \text{ kg/m}^3.$$



Şekil 1. Ankastre-serbest sınır şartındaki tabakalı kompozit kiriş



Şekil 2. Tabakalı elemanların istifleme açısı, sırası ve her bir tabakanın malzeme tipi



Şekil 3. Tabakalı kompozit kirişin yön doğrultuları

Çeşitli fiber yönelme açılarının (Şekil 3) yapının doğal frekansına olan etkisinin incelenmesinden önce oluşturulan ANSYS modelinin doğruluğunun kanıtlanması için elde edilen doğal frekanslar literatürde verilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Örnek 1: Yapılan çözüm yönteminin geçerliliğini sağlamak amacı ile Hu N. vd. (2002)' in çalışmasında verilen sonuçlar ile bu çalışmada ANSYS SEM paket programı ile elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır.

Tabakalı kompozit kiriş için kullanılan malzeme ve geometrik parametre değerleri: $E_{11}=134$ GPa, $E_{22}=10.3$ GPa, $G_{12}=G_{13}=5$ GPa, $\nu_{12}=0.33$ (poison oranı), $L=127$ mm (kirişin boyu), $b=12.7$ mm (kirişin eni), $h=1.2$ mm (kirişin kalınlığı), $\rho=1.48$ kg/m³ şeklindedir. Tablo 1'de ankastre-ankastre sınır şartında $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ fiber yönelmesine sahip tabakalı kompozit kiriş için elde edilen doğal frekans değerleri görülmektedir. Tablo 1' den de görüleceği gibi Hu N. vd. (2002)' nin çalışmasında verilen sonuçlar ile bu çalışmada bulunan değerler birbirine çok yakın değerlerdir.

Tablo 1. Sekiz tabakalı kompozit düz kirişin $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ ankastre-serbest sınır şartında çeşitli metodlardan elde edilen doğal frekans değerlerinin kıyaslanması

Metod	Modlar (Hz)		
	1. mod	2. mod	3. mod
(Hu vd. 2002) SEM	81.87	-	-
(Hu 1999) Midlin SEM	82.00	-	-
(Luo ve Hanagud 2000) Analitik Çözüm (Shen ve Grady 1992)	81.86	-	-
Deneysel	80.08	-	-
(Gökmen Atlıhan 2010) Analitik Çözüm	81.99	-	-
ANSYS (Bu çalışma)	82.31	515.00	1438.10

Örnek 2: İkinci örnek olarak Çalım F., (2009)' nin çalışmasında verilen tabakalı kompozit düz kirişin doğal frekans değerleri, bu çalışma kapsamında oluşturulan modelden elde edilen doğal frekans değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan malzeme ve geometrik özelliklerin değerleri: $E_1=144.8$ Gpa, $E_2=E_3=9.65$ Gpa, $G_{12}=G_{13}=4.14$ Gpa, $G_{23}=3.45$ Gpa, $\nu_{12}=0.3$ (poison oranı), $L=762$ mm

(kirişin boyu), $b=6.35$ mm (kirişin eni), $h=6.35$ mm (tabaka kalınlığı), yoğunluk $=1389.23$ kg/m³ şeklindedir. Tablo 2'de basit mesnetli, tek tabakalı (0°), grafit/epoksi düz kirişin düzlem dışı doğal frekans değerleri verilmiştir. Tablo 2' den de görüleceği gibi mevcut sonuçların Çalım F., (2009)' nin çalışmasının sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Basit mesnetli tek tabakalı (0°) grafit/epoksi düz kirişin düzlem dışı doğal frekans değerleri (kHz)

Metod	Modlar (kHz)		
	1. mod	2. mod	3. mod
(Chandrashekhara et al. 1990) Analitik	0.051	0.203	0.454
(Nabi and Ganesan 1994) SEM	0.054	0.213	0.472
(Yıldırım et al. 1999) Transfer matris metodu	0.051	0.202	0.451
(Rao S. and Ganesan N. 1995) SEM	0.051	0.202	0.454
(Çalım F. (2009) Nümerik	0.051	0.202	0.451
ANSYS (Bu çalışma)	0.050	0.202	0.452

2.2. Yanıt Yüzey Metodu

3 sürekli değişken için toplam 15 adet tasarım kombinasyonu Box-Behnken deney tasarımı ile belirlenmiştir. Belirlenen kombinasyonlarda tasarlanan fiber tabakalı kompozit modeller ANSYS programında modal analize tabi tutulmuştur. Elde edilen doğal frekans değerleri ile girdi parametreleri arasında 2. dereceden bir regresyon modeli kurulmuştur:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \epsilon \quad (1)$$

Denklemden, β_0 sabit katsayısı, β_i regresyon modelinin lineer terimlerinin katsayılarını, β_{ii} kuadratik terimlerin katsayılarını, β_{ij} etkileşimli terimlerin katsayılarını, X_i belirlenen bağımsız değişkenleri (deney tasarımının faktörleri), ϵ ise hata miktarını ifade etmektedir. (1) no'lu denkleme göre MATLAB programı kullanılarak kurulan regresyon modeli Denklem 2'de verilmiştir.

$$y = 29.279 - 0.28971x_1 - 0.06851x_2 - 0.28971x_3 + 0.000288x_1x_2 + 0.00121x_1x_3 + 0.00288x_2x_3 + 0.00140x_1^2 - 0.000125x_2^2 + 0.00140x_3^2 \quad (2)$$

Ana terim olan x_2 hariç ($p>0.05$) anlamlılık seviyesine sahip terimler istatistik olarak anlamsız olduğundan modelden çıkarılarak regresyon modeli tekrar kurulmuştur:

$$y = 27.976 - 0.27588x_1 - 0.03130x_2 - 0.27588x_3 + 0.00121x_1x_3 + 0.00139x_1^2 + 0.00139x_3^2 \quad (3)$$

Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre (3) nolu modelin R^2 , Adj- R^2 ve RMSE (ortalama hata kareleri toplamı karekökü) değerleri sırasıyla 0.969, 0.945 ve 1.26 olarak hesaplanmıştır. İstatistiksel indikatörler modelin tahmin yeteneğinin geliştirildiğini göstermektedir.

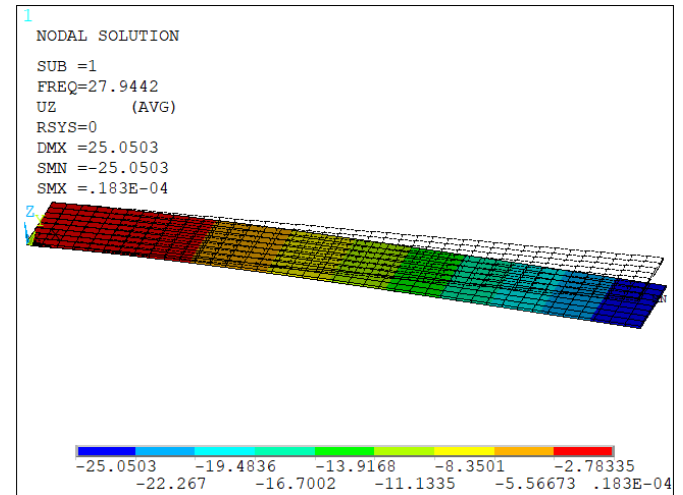
Diğer bir regresyon modeli ise makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım ile kurulmuştur. Gerekli verilerin elde edilmesi e-ISSN: 2148-2683

için ANSYS Workbench ACP modülünde 112 adet rastgele parametrelerde kompozit model oluşturularak Modal Analiz modülünde analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veri seti MATLAB programında bulunan "Regression Learner" araç kutusu ile 5-katlamalı çapraz doğrulama kullanılarak 19 farklı yöntem için analiz edilmiştir. RMSE değeri diğer yöntemlere kıyasla daha düşük olan "Gaussian Process Regression Matern 5/2(GPRM)" modeli tahminleyici fonksiyon olarak kullanılmıştır.

3. Bulgular

SEM paket programında oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar, literatürdeki farklı çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanıp modelin doğruluğu test edildikten sonra YYM ile tasarım parametreleri incelenmiştir. Örneğin, $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ dizilişine sahip kompozit kirişin birinci mod şekli ve doğal frekans değeri Şekil 4'de görülmektedir.

Analiz sonuçları kullanılarak elde edilen (2) nolu regresyon modelinin varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre R^2 , Adj- R^2 ve RMSE (ortalama hata kareleri toplamı karekökü) değerleri sırasıyla 0.976, 0.932 ve 1.39 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Ankastre-serbest sınır şartındaki $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ dizilişine sahip kompozit kirişin temel doğal frekansı ve 1. mod şekli

Analizlerde kullanılan x_2 , x_1x_2 , x_2x_3 ve x_2^2 terimlerinin p-değerleri sırasıyla 0.15, 0.44, 0.44 0.74 olarak bulunmuştur. İstatistik olarak anlamsız olan bu terimler (x_2 hariç) çıkarılarak elde edilen (3) nolu indirgenmiş kuadratik regresyon modeline ait ANOVA sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

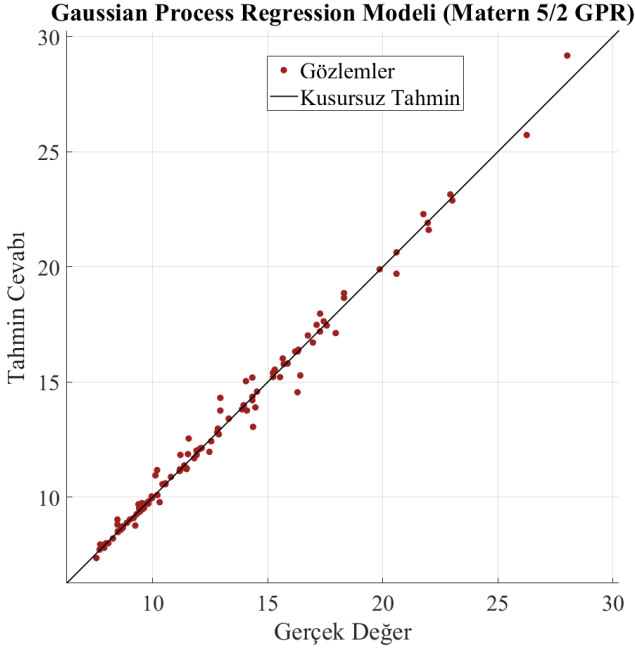
Tablo 3. İndirgenmiş Kuadratik Modele Ait Varyans Analizi Tablosu (ANOVA)

Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Notlar
x_1	1	147.490	147.490	92.982	1.1×10^{-5}	Anlamlı
x_2^*	1	15.870	15.870	10.005	0.0133	Anlamsız
x_3	1	147.490	147.490	92.982	1.1×10^{-5}	Anlamlı

$x_1 : x_3$	1	24.275	24.275	15.303	0.0044	Anlamlı
x_1^2	1	29.720	29.720	18.736	0.0025	Anlamlı
x_3^2	1	29.720	29.720	18.736	0.0025	Anlamlı
Hata	8	12.689	1.58			

*Ana terim olduğundan modelden çıkarılmamıştır

Varyans analizi sonuçlarına göre (3) nolu modelin R^2 , Adj- R^2 ve RMSE (ortalama hata kareleri toplamı karekökü) değerleri sırasıyla 0.969, 0.945 ve 1.26 olarak hesaplanmıştır. GPRM yönteminde R^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0.99 ve 0.43 olarak elde edilmiştir.



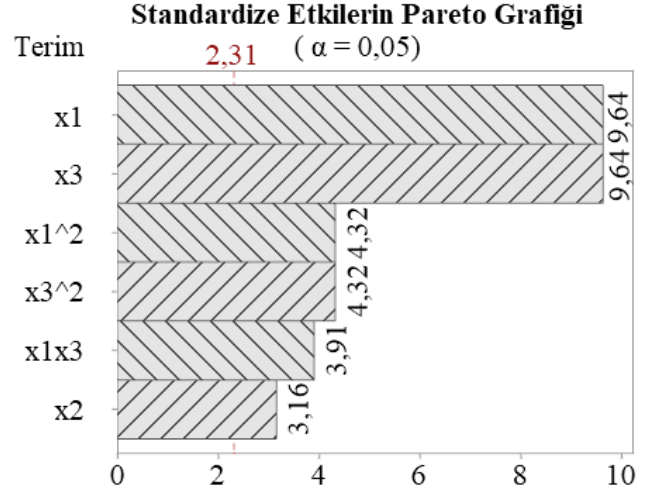
Şekil 5. Gerçek değerler ve GPRM modeli tahmin cevapları

Tablo 4. Box-Behnken Deney Tasarımına Göre Oluşturulan Regresyon Modeli Ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Regresyon Modelinin Karşılaştırılması

Deneş No	Girdi Parametreleri			Doğal Frekans Değerleri (ANSYS)	Doğal Frekans Değerleri (Kuatratik Model)	%Hata $\frac{ y_{KM}-y }{y} \times 100$	Doğal Frekans Değerleri (GPRM)	%Hata $\frac{ y_{GPRM}-y }{y} \times 100$
	x_1	x_2	x_3	y	y_{KM}	ϵ_{KM}	y_{GPRM}	ϵ_{GPRM}
1	0	90	45	14.327	15.489	8.114	14.341	0.1021
2	90	45	90	7.716	9.661	25.21	7.718	0.0371
3	45	45	45	9.703	9.827	1.285	9.714	0.1151
4	90	45	0	12.936	13.029	0.723	12.953	0.1344
5	45	45	45	9.703	9.827	1.285	9.714	0.1151
6	0	0	45	18.311	18.337	0.146	18.349	0.2111
7	45	90	0	14.327	15.489	8.114	14.316	0.0757
8	45	45	45	9.703	9.827	1.285	9.714	0.1151
9	45	90	90	8.466	7.053	16.68	8.474	0.1006
10	0	45	90	12.936	13.029	0.723	12.949	0.1038
11	45	0	0	18.311	18.337	0.146	18.335	0.1333
12	45	0	90	10.116	9.901	2.118	10.106	0.0979
13	90	90	45	8.466	7.053	16.68	8.469	0.0463
14	0	45	0	28.010	26.533	5.271	28.095	0.3063
15	90	0	45	10.116	9.901	2.118	10.215	0.9801

Şekil 5'te görüldüğü üzere gerçek ve tahmin değerlerine göre elde edilen veri noktaları 1:1 çizgisi (kusursuz tahmin) etrafında yoğunlaşmaktadır.

Şekil 6'da standardize etkilerin pareto grafiğı verilmiştir.



Şekil 6. Standardize Etkilerin Pareto Grafiğı

Sonuçlar incelendiğinde regresyon modelindeki terimlerin yapının doğal frekansına olan etkileri bakımından en etkili terimlerin dış tabakalar olduğu, bu terimlerin kuadratik etkilerinin ise yanıt üzerinde ikinci derecede etkili olduğu görülmektedir. Merkez tabakadaki yönelme açısının yanıt üzerine etkisinin en az olduğu ve bu terimi içeren kuadratik ve etkileşimli terimlerin ise yanıt üzerinde anlamlı bir değışim yaratmadığı görülmektedir.

4. Tartışma

(2) ve (3) nolu denklemlerde verilen regresyon modellerinin istatistiksel indikatörleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde indirgenmiş modelin tahmin yeteneğinin geliştirildiği görülmektedir. Her ne kadar modellerin R^2 ve $Adj-R^2$ değerleri oldukça yeterli gözükse de birçok çalışmada göz ardı edilen husus yalnızca bu değerlerin baz alınarak modelin spesifik bir tasarım noktası için nasıl cevap ürettiğinin araştırılmamasıdır. Bu bağlamda (3) nolu denklemde oluşturulan regresyon modelinin her bir tasarım noktası için ürettiği tahmin tatmin edici görülmemiştir. Tablo 4'de verilen 15 konfigürasyonun yüzde hata değerlerinin ortalaması Y_{KM} ve Y_{GPRM} için sırasıyla 5.99 ve 0.17 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da verilen hassasiyet analizi sonuçları incelendiğinde yapının doğal frekans değerlerinin dış tabakalardaki fiber yönlenme açısı değişimine merkez tabakaya kıyasla daha duyarlı olduğu görülmektedir. Elde edilen bu çıkarımı destekler nitelikte literatürdeki ilgili çalışmalar incelendiğinde, (Pingulkar & Suresha, 2016) yaptıkları çalışmada, tabakaların en dış katmanların yönlenme açılarındaki değişimin doğal frekanslar üzerinde oldukça duyarlı olduğu sonucuna varmışlardır. En dıştaki tabakanın hibridizasyonunun ve fiber yönlenme açısındaki değişimin, fiber hacim oranına ve matris malzemesindeki değişime kıyasla kompozit plakaların doğal frekansları üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Narita (2003) ise tabakalı kompozit plakaların doğal frekansını maksimize etmeyi amaçlayan yeni bir katmansal optimizasyon yaklaşımını önermiştir. En dıştaki tabakadaki fiber yönlenme açısındaki değişimin yapının doğal frekansına olan etkisinin, en içteki tabakadakine kıyasla çok daha fazla olduğunu belirlemiştir. Bu durumun sebebi, tabakaların bükülmesinde dış tabakanın iç tabakaya göre daha fazla rijitlik etkisine sahip olması ve doğal frekansın belirlenmesinde daha etkili olmasıdır. Diğer bir deyişle, ankastre-serbest sınır şartlarında eğilmeye zorlanan bir kirişte tarafsız eksenden uzaklaştıkça bası ve/veya çeki gerilmeleri artmakta olduğundan tabakaların rijitliğinin de artması gerekmektedir. Dolayısıyla, tarafsız eksene olan uzaklığa göre malzeme hacim oranı değişen ve buna bağlı olarak gerilmelerin yanı sıra rijitliğin de değiştiği fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin tasarımı, dinamik davranışlarının incelenmesiyle ilgili araştırmalar günümüzde son derece hız kazanmış durumdadır (Garg, Chalak, Zenkour, Belarbi, & Sahoo, 2022). Gelecek çalışmalarda ise fonksiyonel kademelendirilmiş farklı geometrilerdeki kompozit kirişlerde tasarım parametrelerinin optimizasyonunun yapılması amaçlanmaktadır.

5. Sonuçlar

BBT yöntemi ile oluşturulan kuadratik regresyon modelinin R^2 değeri 0.97 olarak, GPRM yöntemi ile elde edilen modelin R^2 değeri ise 0.99 olarak hesaplanmıştır. Her iki modelin R^2 değerleri yakın olsa da BBT deney tasarımına göre belirlenen noktalardaki ortalama hata oranlarında GPRM modelinde KM modeline kıyasla ~34 kat daha az hata elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre ise dış tabakalardaki fiber yönlenme açılarının yapının doğal frekansına olan etkisi merkez tabakaya kıyasla ~2 kat daha fazladır. Önerilen bu regresyon modelinin kullanımı ile oldukça zahmetli süreçler barındıran tabakalı kompozit

malzemelerin tasarımında ihtiyaç duyulan nümerik analiz ve deneysel çalışmaların yerine, kabul edilebilir bir hassasiyette sonuçlar üretilmesi mümkündür. Böylelikle, daha düşük hesaplayıcı kapasitesi ve daha kolay hesaplama imkânı sağlanarak üretim süreci çok daha efektif bir şekilde planlanabilir.

Kaynakça

- Adali, S., & Verijenko, V. (2001). Optimum stacking sequence design of symmetric hybrid laminates undergoing free vibrations. *Composite structures*, 54(2-3), 131-138.
- Altabay, W. A. (2018). High performance estimations of natural frequency of basalt FRP laminated plates with intermediate elastic support using response surfaces method. *Journal of Vibroengineering*, 20(2), 1099-1107.
- Cherniaev, A., & Komarov, V. (2015). Multistep optimization of composite drive shaft subject to strength, buckling, vibration and manufacturing constraints. *Applied Composite Materials*, 22(5), 475-487.
- Dagli, B. Y., Ergut, A., & Turan, M. E. (2020). İçinden Akışkan Geçen Boru Doğal Frekansının Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Tahmini. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 863-874.
- de Assis, F. M., & Gomes, G. F. (2021). Crack identification in laminated composites based on modal responses using metaheuristics, artificial neural networks and response surface method: a comparative study. *Archive of Applied Mechanics*, 91(10), 4389-4408.
- Fallahi, N. (2021). GA optimization of variable angle tow composites in buckling and free vibration analysis through layerwise theory. *Aerospace*, 8(12), 376.
- Ganapathi, M., Kalyani, A., Mondal, B., & Prakash, T. (2009). Free vibration analysis of simply supported composite laminated panels. *Composite Structures*, 90(1), 100-103.
- Garg, A., Chalak, H., Zenkour, A., Belarbi, M.-O., & Sahoo, R. (2022). Bending and free vibration analysis of symmetric and unsymmetric functionally graded CNT reinforced sandwich beams containing softcore. *Thin-Walled Structures*, 170, 108626.
- Ghasemi, F. A., Paknejad, R., & Fard, K. M. (2013). Effects of geometrical and material parameters on free vibration analysis of fiber metal laminated plates. *Mechanics & Industry*, 14(4), 229-238.
- Jafari, R., Yousefi, P., & Hosseini-Hashemi, S. (2015). *Stacking sequence optimization of laminated composite plates for free vibration using genetic algorithm and neural networks*. Paper presented at the International conference on advances in mechanical engineering, ICAME.
- Jeawon, Y., Drosopoulos, G., Foutsitzi, G., Stavroulakis, G., & Adali, S. (2021). Optimization and analysis of frequencies of multi-scale graphene/fibre reinforced nanocomposite laminates with non-uniform distributions of reinforcements. *Engineering Structures*, 228, 111525.
- Karakaya, Ş., & Soykasap, Ö. (2011). Natural frequency and buckling optimization of laminated hybrid composite plates using genetic algorithm and simulated annealing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(1), 61-72.
- Narita, Y. (2003). Layerwise optimization for the maximum fundamental frequency of laminated composite plates. *Journal of Sound and Vibration*, 263(5), 1005-1016.

- Ozdemir, M., Sadamoto, S., Tanaka, S., Okazawa, S., Yu, T., & Bui, T. (2018). Application of 6-DOFs meshfree modeling to linear buckling analysis of stiffened plates with curvilinear surfaces. *Acta Mechanica*, 229(12), 4995-5012.
- Pashmforoush, F. (2019). Statistical analysis on free vibration behavior of functionally graded nanocomposite plates reinforced by graphene platelets. *Composite Structures*, 213, 14-24.
- Pashmforoush, F. (2022). Natural frequency prediction of functionally graded graphene-reinforced nanocomposite plates using ensemble learning and support vector machine models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 09544062221126641.
- Pingulkar, P., & Suresha, B. (2016). Free vibration analysis of laminated composite plates using finite element method. *Polymers and Polymer Composites*, 24(7), 529-538.
- Reddy, B. S., Reddy, M., & Reddy, V. N. (2013). Vibration analysis of laminated composite plates using design of experiments approach. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2(1), 40-49.
- Srinivasa, C. V., Suresh, Y. J., & Prema Kumar, W. P. (2014). Experimental and finite element studies on free vibration of skew plates. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 6(1), 1-11.
- Şahin, Y. (2006). Kompozit malzemelere giriş (2. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Thai, H.-T., & Kim, S.-E. (2010). Free vibration of laminated composite plates using two variable refined plate theory. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(4), 626-633.
- Todoroki, A., & Ishikawa, T. (2004). Design of experiments for stacking sequence optimizations with genetic algorithm using response surface approximation. *Composite structures*, 64(3-4), 349-357.
- Zhen, W., & Wanji, C. (2006). Free vibration of laminated composite and sandwich plates using global-local higher-order theory. *Journal of Sound and Vibration*, 298(1-2), 333-349.