



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Dynamic Behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy Nanocomposites (GRP)

Yazar(lar) (Author(s)): İlyas ERDOĞAN¹, Murat KISA², Mustafa ÖZEN³, Gökhan DEMİRCAN⁴, Ali İhsan KAYA⁵

¹ ORCID ID: 0000-0003-0754-9939

² ORCID ID: 0000-0001-7015-2198

³ ORCID ID: 0000-0002-0282-9387

⁴ ORCID ID: 0000-0002-9579-6878

⁵ ORCID ID: 0000-0002-3040-5389

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erdoğan İ., Kısa M., Özen, M., Demircan G., Kaya, A.İ., “Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 8(2): 78-90 (2023).

DOI: 10.46578/humder.1161116



Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi

İlyas ERDOĞAN^{1*}, Murat KISA², Mustafa ÖZEN², Gökhan DEMİRCAN², Ali İhsan KAYA³

¹VİMSA Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş. / Spiral Kaynaklı Çelik Boru Fab., Genel Müdür, 63200, Eyyübiye/Şanlıurfa

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 63000, Haliliye/Şanlıurfa

³Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 02040, Altınşehir/Adıyaman

Öz

Günümüzde teknolojinin hızlı şekilde ilerlemesiyle yenilenebilir enerji, havacılık, denizcilik, uzay, otomotiv, savunma sanayi alanlarında ve diğer alanlarda kullanılmak üzere hafif ve aynı zamanda üstün mekanik ve dinamik davranış özelliklerine sahip yeni malzemelere ihtiyaç hızla artmaktadır. Bu alanlarda kullanılan malzemeler, korozyon, yorulma, titreşim, yüksek sıcaklık, sürtünme ve yüksek gerilmelere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla araştırmacılar ve bilim adamları bu ihtiyaçlara cevap veren ekonomik, daha yüksek mukavemetli, dinamik davranış özellikleri daha iyi olan ve daha hafif malzemelerin elde edilmesi için yapılan çalışmalara yoğunlaşmışlardır. Nanokompozit malzemelerin dinamik davranışlarının incelenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada nanopartikül katkısız (saf), nanokil ve nanosilika katkılı olmak üzere üç farklı cam elyaf takviyeli kompozit/nanokompozit malzeme vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiş ve bu malzemelerin dinamik davranış özellikleri (Serbest titreşim doğal frekansları) deneysel olarak incelenmiştir. %3 nanokil ve %1 nanosilika katkılı kompozit malzemenin dinamik davranış özelliklerinin saf kompozit malzemeye göre söz konusu katkının malzemenin dinamik davranış özelliklerini ne oranda iyileştirdiği deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre %3 oranında nanokil katkısının birinci ve ikinci doğal frekanslar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı, daha sonraki doğal frekanslarda hatırı sayılır oranda bir azalmaya sebebiyet verdiği gözlenmiştir. %1 nanosilika katkısının ilk üç doğal frekans üzerinde minör de olsa bir artışa etkisi görülmüştür ancak, daha sonraki doğal frekanslar üzerinde ise azalışa neden olduğu görülmüştür.

Investigation of Dynamic Behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy Nanocomposites (GRP)

Abstract

Today, with the rapid progress of technology, the need for new materials with light weight as well as superior mechanical and dynamic behavior properties for use in renewable energy, aviation, maritime, space, automotive, defense industry fields and other fields is increasing rapidly. The materials used in these areas are exposed to corrosion, fatigue, vibration, high temperature, friction and high stresses. Therefore, researchers and scientists focused on studies to obtain economical, high strength, better dynamic behavior and lighter materials that meet these needs. Examining the dynamic behavior of nanocomposite materials is of great importance. In this study, three different glass fiber reinforced composite/nanocomposite materials, undoped with nanoparticles (pure), nanoclay and nano-silica added, were produced by vacuum assisted resin infusion method and the dynamic behavior properties (free vibration natural frequencies) of these materials were experimentally investigated. It was experimentally investigated to what extent the dynamic behavior properties of 3% nanoclay and 1% nanosilica added composite material improved the dynamic behavior properties of the material compared to the pure composite material. According to the results of the study, it was observed that the 3% nanoclay additive did not have a significant effect on the first and second natural frequencies, causing a considerable decrease in the later natural frequencies. It was observed that 1% nanosilica additive had a slight increase in the first three natural frequencies, but it caused a decrease in the later natural frequencies.

Makale Bilgisi

Başvuru: 12/08/2022

Yayın: 31/08/2023

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzeme
Nanokompozit malzeme
Dinamik davranış
özellikleri
Doğal frekans
Sonlu elemanlar analizi

Keywords

Composite material
Nanocomposite material
Dynamic behavior
properties
Natural frequency
Finite element analysis

*İletişim yazarı, e-mail: İlyas.erdogan@outlook.com.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal frekans bir cismin sadece rijitliğine ve kütesine bağlı olan ve cismin o frekansta uyarılırsa yüksek genlikle ve sürekli olarak titreşeceği frekansa denir. Doğal frekans, her cismin kendine özgü bir karakteristiği olup, cisim kendi doğal frekanslarında bir kere uyarılmasından sonra uyarı kesilse dahi titreşmeye devam etmektedir. Ayrıca cisim doğal frekansında uyarıldığında uyarının şiddetine değil, sadece sistemde mevcut sönümlenmeye bağlı olarak çok yüksek genliklerde titreşir. Bir cismin doğal frekansıyla çakışan bir frekansla uyarılması sonucunda ortaya çıkan fiziksel olaya rezonans denmektedir. Rezonansa girmiş bir cisim, çok yüksek genliklerde titreşim yapar. Çünkü bu frekansta o cisim üzerine etki eden atalet kuvvetiyle cismin rijitliğinden kaynaklanan yay kuvveti birbirine eşit; fakat ters işaretli olduğundan birbirini götürür. Geriye sadece sönümleme kuvveti kalır. Bu kuvvet de sönümleme katsayısına bağlı olarak cismin hangi genlikle titreşeceğini belirler [1].

Malzemenin doğal titreşim frekansı, serbest titreşim deneylerinde elde edilen ivme-zaman grafikleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Bunun için ivme-zaman grafiğinin Fourier dönüşümlerinden yararlanılır. Bu yöntem ile doğal titreşim frekansının belirlenmesi için ilk olarak yapı sistemine ön deplasman verilir ve sistemin serbest titreşim yapması sağlanır. Serbest titreşim deneyinden elde edilen zamana bağlı ivme değişimi Fourier dönüşümü ile frekansa bağlı fonksiyona dönüştürülerek oluşturulan grafikteki maksimum değerlerden sistemin doğal titreşim frekansları belirlenir. Fourier dönüşümü için literatürde çok farklı programlar bulunmaktadır [2].

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan matris malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için nano parçacıkların dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılması günümüz araştırmacılarının ilgisini çekmektedir. Nanometre (10^{-9} m) boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ 'a kadar çıkmaktadır. Bu büyük yüzey alanları dolayısı ile yükün matristen nano parçacığa transferi kolaylaşarak, matrisin mekanik özelliklerini artırmaktadırlar [3]. Ayrıca nano partiküller, genel olarak ana kompozit malzemenin elektrik ve ısı iletkenliğini kayda değer oranda artırmaktadır. Nano malzeme katkı oranı ağırlıkça %0.5-%5 oranlarında kullanılır, bunun sebebi bu malzeme parçacıklarının oldukça yüksek yüzey alanı/birim hacim oranına sahip olmalarıdır [4].

Kompozit malzemelere nanopartikül malzeme ilave edilerek elde edilen nanokompozit malzemenin dinamik davranış özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalarda ancak belirli bir kısım nanopartikül malzemenin, kompozit malzemenin dinamik davranışını iyileştirdiği, katkı oranının da belirli oranlarda olması halinde bu iyileşmenin maksimum oranda olduğu, ancak bu orandan daha az ya da daha çok katkı olması halinde ise bu iyileşmenin düştüğü deneysel olarak görülmüştür [5-7].

Literatürde cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeye sırasıyla saf, %0.5, % 1 ve % 1.5 oranında ağırlıkça nano-silika malzeme katıldığında, bu nano malzemenin cam elyaf takviyeli CTP/Epoksi kompozit malzemenin dinamik davranışlarını değiştirdiği bilinmektedir [8]. Yapılan bu çalışmada CTP malzeme, sürekli sarım yöntemi ile boru olarak üretilmiş ve numuneler bu borulardan kesilmiştir. Malzemenin dinamik davranışının iyileştiği, titreşim doğal frekansının kayda değer oranlarda arttığı görülmüştür [8].

Cam elyaf örgü kumaş ve tek yönlü cam elyaf kumaş malzeme takviyeli epoksi kompozit malzemelerin, modal analiz yöntemi kullanılarak doğal frekansları, genlikleri ve titreşim sönümleme oranları teorik ve deneysel olarak incelenmiştir [9]. Yapılan çalışmada tek yönlü cam elyaf malzeme takviyeli epoksi kompozit malzemelere ait doğal frekansların, örgü kumaş cam elyaf malzemedan oluşan kompozit malzemeye göre kayda değer oranda yüksek olduğu deneysel olarak görülmüştür.

Hindistan cevizi kabuğu elyaflı polyester matrisli kompozit malzemeye nanokil ilave edilerek elde edilen nanokompozit malzemenin dinamik davranış özellikleri incelenmiştir. Nanokil katkılı nanokompozit malzemenin doğal frekansı deneysel olarak ölçülmüş, malzemenin birinci doğal frekansının %3 katkı ile %33'lük bir artış ile maksimum değere ulaştığı, daha az ve daha üstü oranlardaki katkının ise bu malzemenin doğal frekansını kayda değer şekilde değiştirmedeği deneysel olarak gözlemlenmiştir [10].

Bir diğer çalışmada CTP kompozit malzemeden lama şeklinde üretilen test numunesi, 25 mm üst üste binme payı ve sırasıyla araya 0.1 mm saf epoksi, %1, %2, %3 ve %5 oranında nanokil parçacık katkılı epoksi kullanılarak yapıştırılmış ve bu yapışmanın kesme mukavemeti incelenmiştir [11]. Bu çalışmada ayrıca CTP kompozit malzemenin yapışma yöntemi ile birleştirilmesinin havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi birçok endüstri sektöründe istenen; hafiflik, ekonomik olma, sızdırmazlık, eşit yük dağılımı ve aşınma direnci gibi özelliklerde kayda değer iyileşmeler sağladığı deneysel olarak görülmüştür. Çalışmada nanokil katkısının yapışma mukavemetini %2 katkıya kadar önemli ölçüde arttırdığı, bu katkı oranı aşıldığında ise tekrar düşmeye başladığı ve en çok artışın da %2 katkı durumunda saf epoksi malzemeye göre %91 daha fazla olduğu görülmüştür.

Epoksi matris reçine malzemeye sırasıyla saf, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında ağırlıkça MMT/nanokil malzeme katılmış ve bu nano malzemenin cam elyaf örgü takviyeli epoksi kompozit malzemenin dinamik davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir [12]. CTP malzeme 3, 5 ve 8 kat cam elyaf malzeme kullanılarak plaka olarak üretilmiş ve numuneler bu plakalardan kesilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda malzemenin dinamik davranışının iyileştiği, titreşim doğal frekansının arttığı görülmüştür. Nanokil katılmış CTP kompozit malzemenin, sade/katkısız olana göre doğal frekansının yüksek olması dolayısı ile aynı titreşim ve darbe yüküne maruz kalmasına karşın, delaminasyon hasarlı alanının yaklaşık 4 kat daha az olduğu görülmüştür.

Epoksi matris reçine malzemeye sırasıyla saf, %3, %5, %7 oranında ağırlıkça nano kil katılmış ve CTP malzeme yaklaşık 0.4, 1 ve 4 mm et kalınlıkta olarak üretilmiştir [13]. Bu nano malzeme katkısının kompozit malzemenin dinamik davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada malzemenin sadece titreşim doğal frekansları ölçümü testleri yapılmış ve testler sonucunda malzemenin dinamik davranışının iyileştiği, titreşim doğal frekansının kayda değer oranda arttığı görülmüştür.

Dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli Epoksi matris malzemeden üretilen kompozit kırımların seçilen doğal çevresel koşullarda (suda, güneşte ve toprakta) 1 yıl süre ile yaşlandırılarak dinamik davranış özelliklerindeki değişimler incelenmiştir [14]. Yapılan çalışmada 12 ay süre ile yaşlandırılan dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin doğal frekansında yaklaşık %3-4 oranında azalmaya, buna karşın titreşim sönümlenme oranında ise %2-3 civarında yükselmeye sebebiyet verdiği deneysel olarak görülmüştür.

Kompozit malzemelere nanopartikül ilave edilmesi ile elde edilen nanokompozit malzemelerin daha iyi mekanik ve dinamik davranış özelliklere sahip olduğu konusunda araştırmalar mevcuttur [15,16]. Kompozit malzemelerin doğal frekanslarındaki değişimleri incelemek oldukça önemli bir konudur. Literatürde nanopartikül katkılı kompozitlerin doğal frekansları üzerine çalışma olmasına rağmen, bu kompozitlerin yaşlandırmaya maruz kaldıklarında doğal frekanslarının nasıl değiştiğiyle ilgilenen çalışma sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekans değişimleri, farklı nanomateryal katkılı malzemelerin farklı oranlardaki içeriğine göre incelenmiştir. Kompozit numuneler, Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği (VDRİT) ile plakalar şeklinde üretilerek ASTM D3039 standardına uygun ölçülerde olacak şekilde sulu testere yardımıyla elde edildikten sonra öncelikle titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise aynı numuneler, çekme testine tabi tutulmuştur. Titreşim test sonuçlarının nümerik karşılaştırılması ANSYS programında yapılmış ve test ile nümerik sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre %3 oranında nanokil katılmasının doğal frekans üzerinde belirgin değişime sebep olmadığı görülürken %1 oranında nanosilika katılmasının ise doğal frekansını yaklaşık olarak %3.35 oranında artırdığı görülmüştür.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Numunelerin Üretilmesi

Üretim sırasında öncelikle, nanomateryal içermeyen cam elyaf takviyeli kompozitler, daha sonra da nanomateryal katkılı kompozit plakalar üretilmiştir. Bu plakaların ebatları 625 mm x 600 mm x 3 mm

olacak şekilde hazırlanmıştır. Plaka üretiminde; Cam elyaf örgü kumaş (E-Camı, woven roving/bidirectional/biaxial woven fabric), 200 gr. m⁻², LR 160 epoksi reçine, MGS LH 160 sertleştirici, %3 epoksi ağırlığınca nanokil (nanoclay) ve %1 epoksi ağırlığınca nano-SiO₂ (Silicon Dioxide) ham maddeler kullanılmıştır.

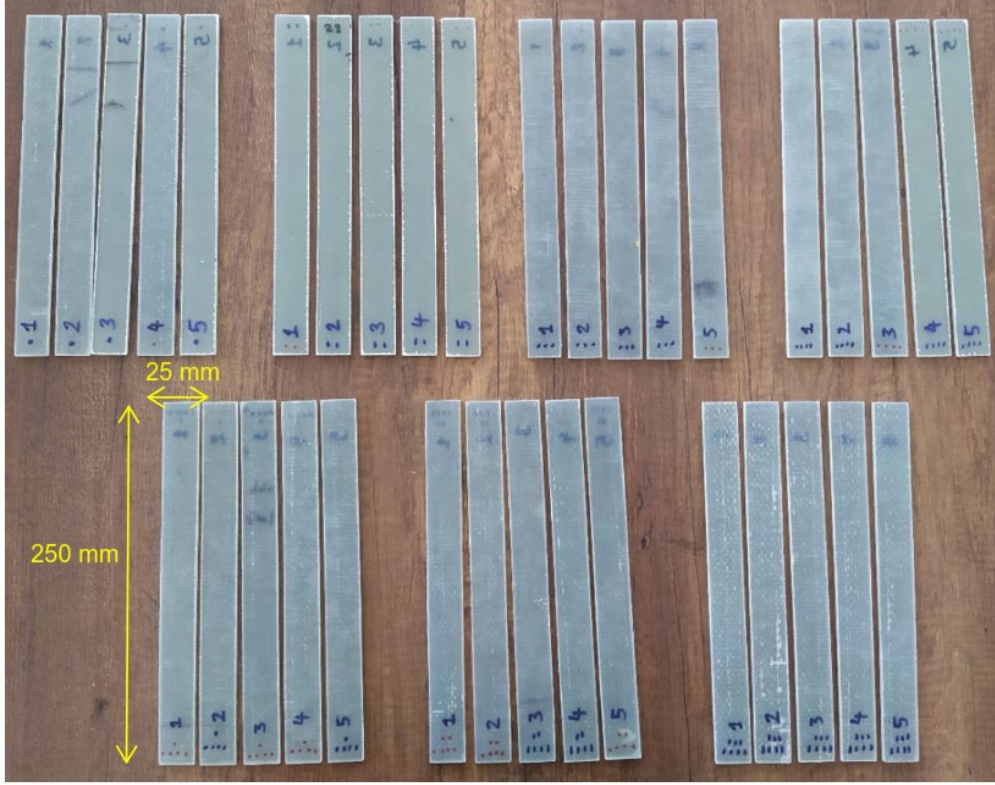
Kompozit ve nanokompozit test plakası üretimi Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Laboratuvarında bulunan Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği ile yapılmıştır (Şekil 1). Üretim sırasında öncelikle tezgâh temizliği gerçekleştirilmiş ve hava vakum sızdırmazlığı sağlayacak şekilde tezgâha kalıp ayırıcı film kumaş serilmiştir. Daha sonra 22 kat 625 mm x 600 mm ebatlı cam elyaf örgü kumaşlar kalıp ayırıcı üzerine yerleştirilmiştir. Bu kumaşların üzerine de ebatları kumaşlardan daha büyük soyma kumaşı yerleştirilmiştir. Üretim için diğer teknik adımlar da tamamlandıktan sonra elyaf kumaş sisteminin vakum altında sızdırmaz olduğu anlaşılıncaya kadar denemeler gerçekleştirilmiştir. Öte yandan epoksi reçineye nano partikül ilave edilerek bu karışım, el ile tahta karıştırıcı kullanılarak homojen bir yapı elde edilinceye kadar yaklaşık 10 dakika süre ile karıştırılmıştır. Nano partikül katkılı bu karışım, manyetik/ultrasonik karıştırıcıda 200 devirde (rpm), %70 genlikte, 2 s (saniye) açık ve 3 s kapalı modda, buz banyosu ile soğutma şartlarında nano partikül malzemenin epoksi reçine içinde topaklaşmasının önlenmesi ve homojen bir şekilde nano seviyede dağılmasını sağlama amacıyla karışım sıcaklığının yaklaşık 45 °C geçmeyecek şekilde yaklaşık 2 saat karıştırılmıştır. Bu nano katkılı epoksi karışım, vakum torbası içinde yer alan ve sızdırmaz durumdaki cam elyaf sistemine vakum altında emdirilmiştir. Emdirme işlemi tamamlandıktan sonra vakum torbası içindeki tabakalı yapı 24 saat boyunca 80 °C'de bekletilmiştir. Daha sonra sıcaklık devre dışı bırakılarak vakum altındaki tabakalı yapı üstünde kürleşmeye bırakılmıştır.



Şekil 1. Nanokompozit katkılı CTP kompozit plakanın VDRİT yöntemi ile üretilmesi.

VDRİT ile üretilen her biri 625 mm x 600 mm x 3 mm ebatlı kompozit ve nanokompozit malzeme içerikli kompozit plakalar tezgâhtan çıkartıldıktan sonra ilgili standartlara göre kesimi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Laboratuvarında mevcut olan RUBI marka DX-350 tablalı tepsilerde kesim makinası kullanılarak elde edilmiştir. Her bir plakadan 35 adet 250 mm x 25 mm x 3 mm ebatlı numuneler ASTM D3039 standardına göre çekme testleri ve dinamik testler için kesilmiş ve kenarları zımparalanarak temizlenmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 2'de

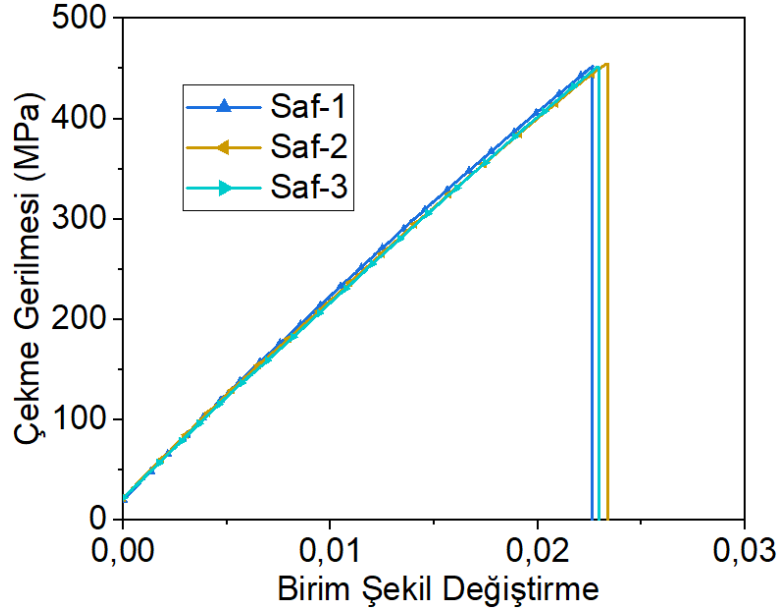
verilmiştir. Bu numunelerin yoğunluğu, karışım kuralından hesaplanmış ve 1.912 kg.m^{-3} olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Ankastre kiriş serbest titreşim test numuneleri.

2.2. Çekme Testleri

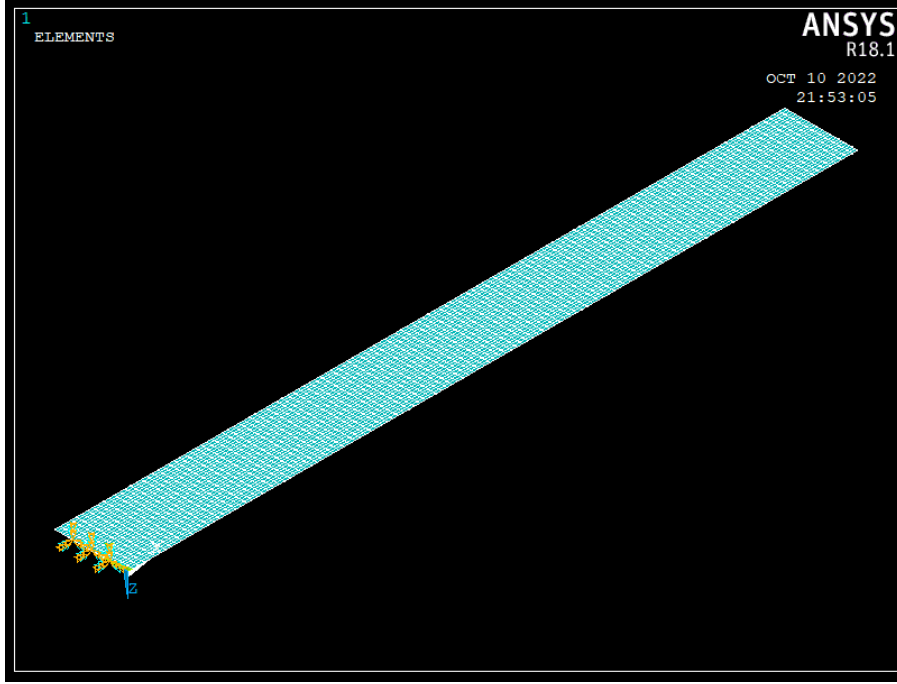
Kompozit test numunesinin doğal frekansının teorik olarak hesaplanması için ASTM 3039 standardına göre çekme testi yapılmıştır. Testler oda sıcaklığında ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), %30 nem oranında, 2 mm/dk çekme hızında, 100 kN kapasiteli Shimadzu AGS-X Plus Universal çekme cihazında yapılmıştır. Yapılan çekme testi sonucunda saf kompozit test numunesinin Elastisite modülünün(E) ortalamasının 20.1635 GPa olduğu deneysel olarak belirlenmiştir. Ortalama çekme gerilmesi 452.12 MPa , birim şekil değiştirme ise 0.0224 olarak tespit edilmiş ve grafik Şekil 3'te gösterilmiştir.



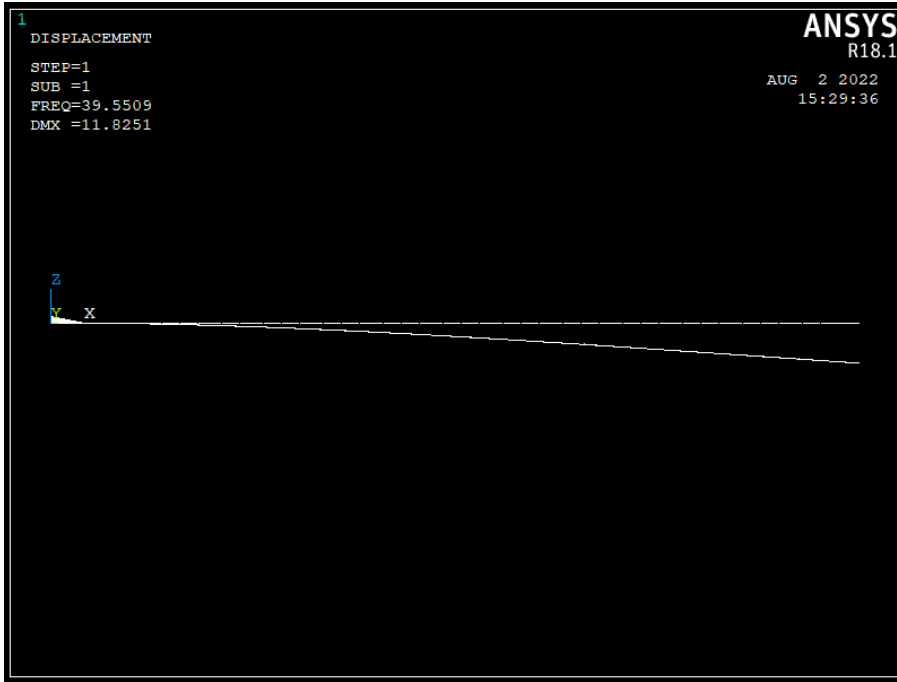
Şekil 3. Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği

2.3. ANSYS Modelleme

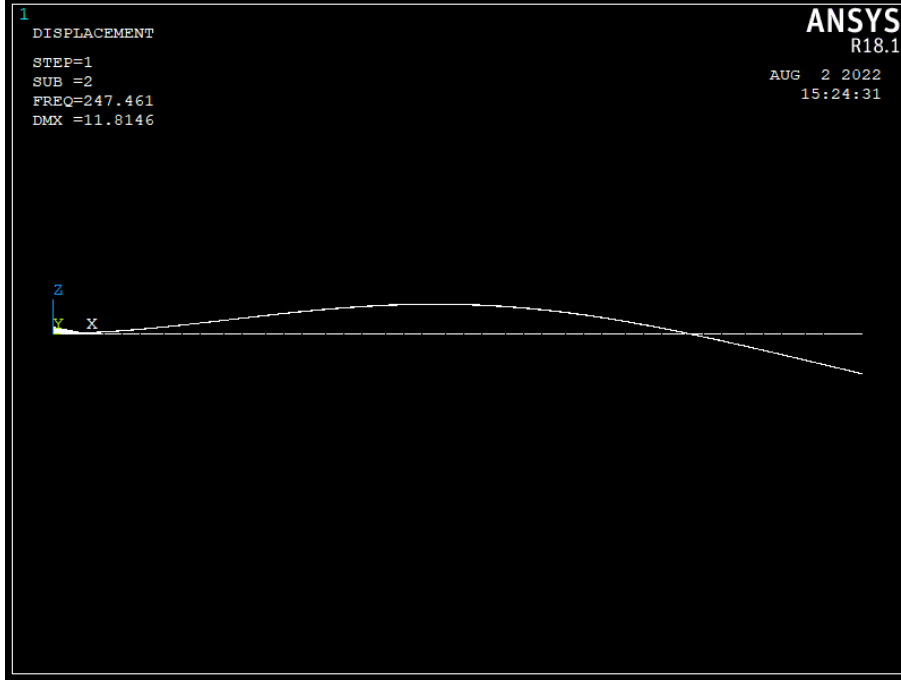
Kompozit kirişlerin ANSYS çözümü, öncelikle geometrinin oluşturulması, malzeme özelliklerinin girilmesi, mesh elemanının seçilmesi ve meshleme işlemi, sınır koşullarının tanımlanması, yüklerin girilmesi ve Block Lancsoz algoritma seçimi adımları takip edilerek gerçekleştirilmiştir [17]. Mesh elemanı, kabuklu yapıların çözümünü kolaylıkla gerçekleştirebilen ve her bir düğümde altı serbestlik dereceli dört düğümünden oluşan Shell 181 elemanı seçilmiştir. Her bir tabakada 1441 element ve 1587 düğüm olacak şekilde modelleme gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar çözümünde kullanılan modelin mesh yapısı, sınır koşulları ve yüklemeleri Şekil 4'ten görülebilir. Burada, deneysel çalışmada olduğu gibi sonlu elemanlar modeli de bir tarafı ankastre diğer tarafı ise serbest olacak bir kiriş şeklinde modellenmiştir. Yoğunluk değeri bahsedildiği gibi karışım kuralından hesaplanmış ve Elastisite modülü ise çekme testi sonucundan elde edilerek nümerik modele girilmiştir. Elde edilen ilk üç doğal frekans sonuçları ve modları Şekil 5'te verilmiştir.



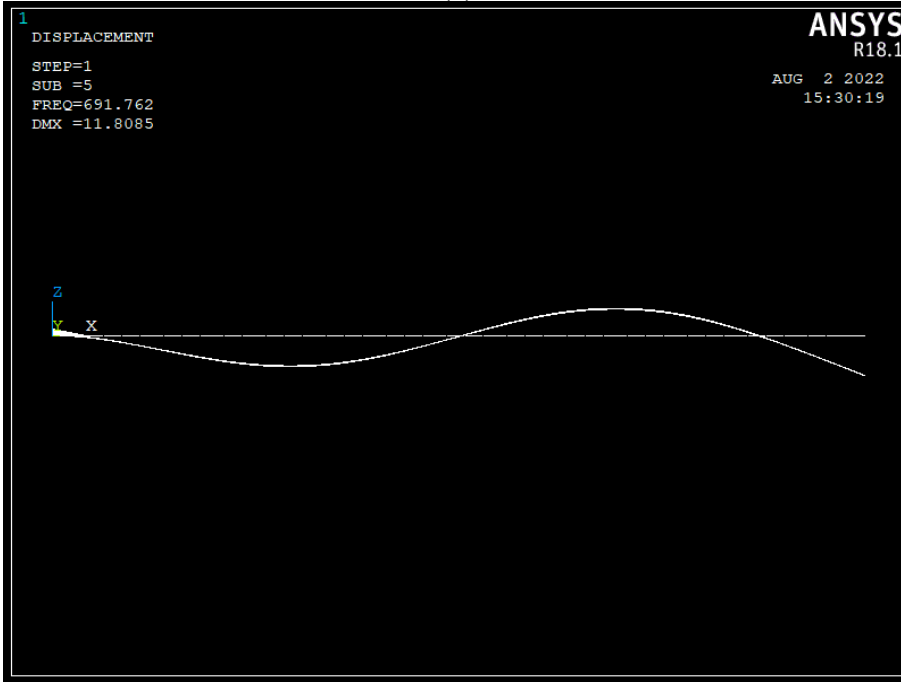
Şekil 4. Sonlu elemanlar çözümünde kullanılan modelin mesh yapısı, sınır koşulları ve yüklemeleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. Ansys'te modellenen kompozitin a) ilk, b) ikinci ve c) üçüncü doğal frekans ve modları

2.3. Analitik Hesaplama

Saf kompozit malzemeden elde edilmiş 3x25x250 mm ebatlı ankastre kirişin serbest titreşimli doğal frekansı (Analitik hesabı) Denklem 1'de verilen Euler –Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak bulunmuştur [18]. Bu hesaplamada kiriş serbest titreşim boyu 200 mm, kiriş atalet momenti hesabında ise kiriş eni 25 mm, yüksekliği 3 mm olarak alınmıştır. $(\beta_n L)$ katsayı değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (1)$$

ω_n : Doğal Frekans [Hz]

L: Kiriş (Numune) serbest titreşim boyu [m]

E: Malzeme (Numune) Elastisite (Young) Modülü [Pa, N.m⁻²]

I: Kirişin (Numune) Atalet Momenti [m⁴]

m: Kirişin(Numune) birim kütlesi [kg/m]

Tablo 1. Titreşim modları için ($\beta_n L$) katsayı değeri tablosu [19]

n(Titreşim modu)	$\beta_n L$
1	1.8751
2	4.69409
3	7.8539
4	10.99557
5	14.1372
6	17.279

Saf kompozit numune malzemenin Elastisite modülü değeri, ASTM 3039 standardına uygun olarak çekme testi yapılarak 175-260 N.mm⁻² gerilme aralığında deneysel olarak 20.1635 GPa olarak bulunmuştur.

2.4. Titreşim Testleri

Nanopartikül katkısız saf cam elyaf katkılı epoksi kompozit ile nanopartikül katkılı nanokompozit numunelerin titreşim testleri, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Test düzeneğinde, numune için 50 mm mengine kavrama/sıkma boyu ve 200 mm serbest titreşim boyu alınmıştır [20]. Testler, mengine 10 N.m torkla sıkılmış vaziyette, Lines:800 ve Span:3,2 kHz şartlarında yapılmıştır (Şekil 6). Test sonucu olarak lazer sensörle birinci ila beşinci Mod doğal frekansları ölçülmüştür.



Şekil 6. Test düzeneği setinin genel görünüşü.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

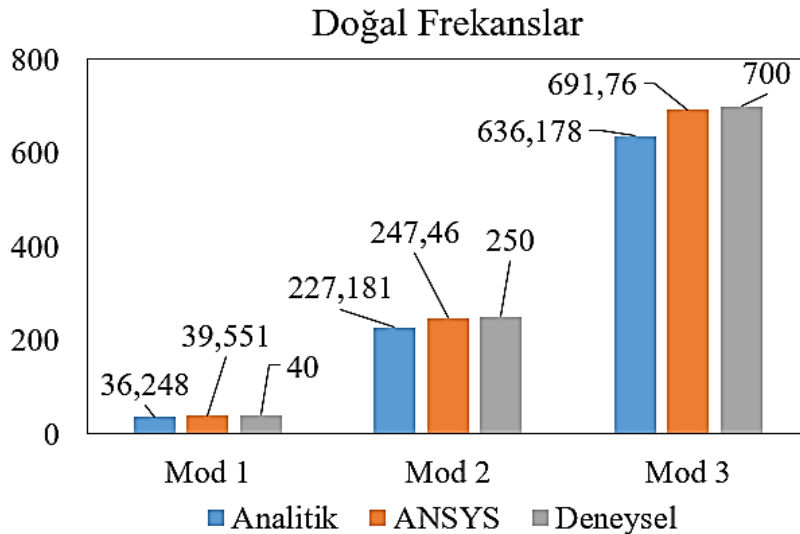
Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanım alanlarının titreşim yükü ağırlıklı olan ortamlar olması nedeniyle, kompozit malzemenin dinamik davranış özelliklerinin iyileştirilmesi hususu araştırılmıştır. Titreşim yükü altında çalışan malzemenin doğal frekansının yüksek olması tercih edilir. Bu nedenle nanokompozit malzeme ile katkılanmış kompozitlerin saf hallerine göre daha yüksek doğal frekans değerine sahip olması istenir. Bu çalışma kapsamında cam takviyeli cam kompozitlere nanokil ve nanosilika eklenerek doğal frekansın değişimi gözlenmiştir. Literatürde cam elyaf takviyeli kompozitlere %3 oranında nanokil ve yine aynı kompozitlere %1 oranında nanosilika katılmasının mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığı bildirilmiştir [8, 10, 12]. Dolayısıyla bu çalışma ile ilgili çalışmalar göz önünde bulundurularak sadece %3 nanokil ile %1 nanosilika katkısının cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin dinamik davranış özelliklerine etkisi test edilmiştir. Daha sonrasında elde edilen veriler analitik ve nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle belirli oranda nanokil ve nanosilika katkısının doğal frekanslar üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Literatürde yapılan mevcut ve ulaşılan çalışmalar incelenmiş, bu çalışmalarda ağırlıklı olarak cam elyaf kompozit malzemeye %1 nanosilika ya da %3 oranında nanokil malzeme katılarak nanokompozit malzemenin doğal frekansının iyileşmesinin en optimum şekilde gerçekleştiği deneysel olarak görülmüş olduğundan, numuneler bu katkı oranları ile hazırlanmış ve test edilmişlerdir.

3.1. Sonuçların Karşılaştırılması

Nanomateriyal katkısız kompozit numunelerin deneysel titreşim sonuçları, analitik ve nümerik olarak elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2). Tablo 2’de görüldüğü üzere analitik olarak hesaplanan doğal frekans değerleri ile nümerik olarak (ANSYS) elde edilen doğal frekans değerleri ve deneysel ölçüm sonucu elde edilen doğal frekans değerleri ilk üç mod için uyumlu olduğu görülmüştür. Analitik frekansların hem nümerik hem de deneysel doğal frekans değerlerinden yaklaşık olarak yüzde 8-10 daha düşük olduğu görülebilir. Sonuçların birbiri ile uyumlu olması sebebiyle, titreşim deney düzeneğinde seçtiğimiz ayarların uygun olduğu görülmüş ve nanomateriyal katkılı kompozitlerin doğal frekans ölçümleri aynı parametreler seçilerek gerçekleştirilmiştir. Doğal frekanslar ayrıca çubuk grafiği olarak Şekil 7’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Katkısız Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin deneysel, nümerik ve analitik doğal frekans karşılaştırılması

Mod	Doğal Frekans (Hz)		
	Analitik	ANSYS	Deneysel
1	36.248	39.551	40.000
2	227.181	247.46	250.000
3	636.178	691.76	700.000



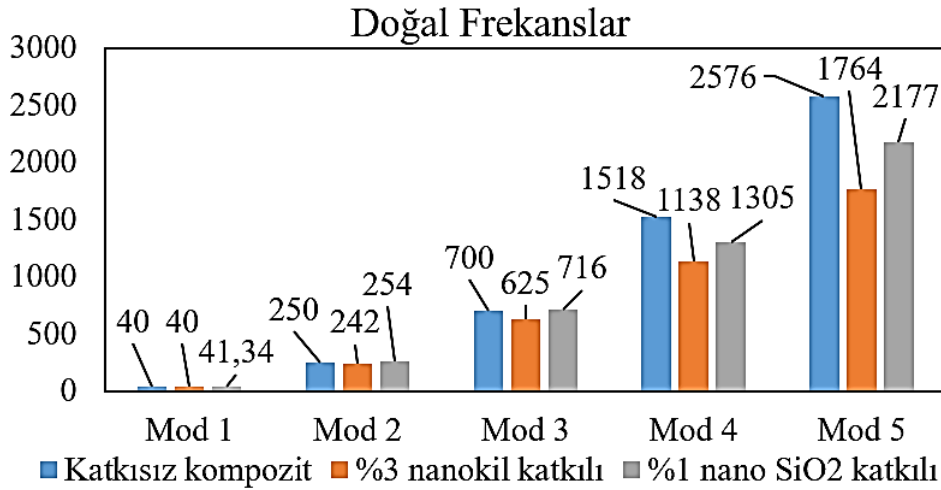
Şekil 7. Saf kompozitin deneysel, nümerik ve analitik doğal frekansları

3.2. Nanomateryal Katkılı Deneysel Bulgular

Test numunelerinin ankastre giriş serbest titreşim testi sonucu elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 3 de verilmiştir. Burada 250 mm x25 mm x 3 mm ebatlı, saf/nanomateryal katkısız ve farklı nanomateryal katkıli test numunelerinin serbest titreşim testi ilk 5 mod doğal frekansları ilgili test düzeneği ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları incelendiğinde cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere %3 oranında nanokil katkısının birinci ve ikinci doğal frekanslar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak, nanokil katkısının üçüncü, dördüncü ve beşinci doğal frekanslarda yaklaşık olarak sırasıyla %11, %25 ve %31 gibi hatırı sayılır oranda bir azalmaya sebebiyet verdiği gözlenmiştir. Öte yandan %1 oranında nanosilika katkısının temel doğal frekans üzerinde yaklaşık olarak %3.35 oranında bir iyileştirmeye sebebiyet verdiği gözlenmiştir. Dahası, nanosilika katkısının ikinci ve üçüncü doğal frekans üzerinde minör de olsa bir artışa etkisi görülmüştür. Buna karşılık, daha sonraki doğal frekanslar üzerinde ise azalışa neden olduğu görülmüştür. Bu azalış dördüncü ve beşinci doğal frekans için sırasıyla %14 ve %15 civarında olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu sonuçlara göre nanosilika katkısının nanokil katkısına göre üçüncü ve daha sonraki doğal frekanslar üzerinde daha az bir düşüşe sebebiyet vereceği şeklinde genel bir yorum yapılabilir. Titreşim test sonuçları ayrıca çubuk grafiği olarak Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Katkısız ve nanomateryal katkıli kompozit numunelerin titreşim testi sonuçları

Mod	Doğal Frekans (Hz)		
	Katkısız kompozit	%3 nanokil katkıli	%1 nano SiO ₂ katkıli
1	40	40	41.34
2	250	242	254
3	700	625	716
4	1518	1138	1305
5	2576	1764	2177



Şekil 8. Nanokompozitlerin titreşim test sonuçları

Literatürde, incelenen çalışmalarda nanokil katkıli nanokompozit malzemeler ile nanosilika katkıli nanokompozit malzemelerin dinamik davranışlarının, yapının/malzemenin doğal frekans değeri açısından nanosilika katkıli nanokompozit malzemede daha yüksek olmak kaydı ile kayda değer ölçüde iyileştiği görülmüştür [7, 11, 12]. Bu durum bu çalışmada nanosilika katkıli nanokompozit malzeme için doğrulanmıştır (ortalama %2-3 arası artış). Nanokil durumunda ise birinci ve ikinci doğal frekanslarda herhangi bir etkisinin olmadığı görülürken daha sonraki doğal frekanslar ise düşüşe sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu durum, epoksi ile nanokil malzemesinin ultrasonik karıştırıcıda nanosilika/epoksi karışımına göre daha az homojen yapı elde edilmesine bağlanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada kompozit ve nanokompozit malzemelerin dinamik davranış özellikleri, deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçları hem analitik hem de nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Saf kompozit için doğal frekans değerleri analitik olarak hesaplanmış ve nümerik olarak (ANSYS) elde edilen doğal frekans değerleri ile deneysel ölçüm sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin ilk üç mod için uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Analitik frekansların hem nümerik hem de deneysel doğal frekans değerlerinden yaklaşık olarak yüzde 8-10 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Nano takviyeli sonuçlarda ise deneysel testler sonucunda %1 nanosilika katkı ilk 3 mod için doğal frekansları yaklaşık %2-3 oranında artırmıştır. Aynı artış trendi nanokil katkısı için görülmemiş aksine doğal frekanslarda ikinci doğal frekanstan sonra hatırı sayılır derecede düşüşe sebebiyet vermiştir. Bu durumda %1 oranında nanosilika katkısı ile elde edilen nanokompozit malzemenin dinamik davranış özelliklerinin, ilk üç doğal frekans açısından nanomateryal içermeyen kompozit malzemeye göre daha iyi olduğu deneysel olarak görülmüştür. Bu çalışma, değişik nanopartikül katkısının ve çeşitli çevresel şartların nanokompozit malzemelerin dinamik özelliklerine etkisini kapsayacak şekilde geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 21063 numaralı proje ile desteklenmiştir. HÜBAP biriminin 21063 numaralı proje kapsamındaki desteği için çok teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İ. H. Çağlayan, Rezonans: Makinaların ve yapıların gizli düşmanı. Mühendis ve Makina, 50(598) (2009) 55-60.
- [2] S. Karaahmetli, C. Dünder, Yapı sönüm oranının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, 2017.
- [3] B. Dindar, Elyaf takviyeli kompozitlerde nanopartikül katkısının yorulma, burkulma, ve darbe davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Doktora tezi, Pamukale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2019.
- [4] G. Raghavendra, Mechanical and tribological behavior of nanofiller reinforced polymer nanocomposites, Ph.D. Dissertation, National Institute of Technology Warangal, Warangal, Telengana, India, 2014.
- [5] G. Demircan, M. Kısa, M. Özen, B. Aktaş, Surface-modified alumina nanoparticles-filled aramid fiber-reinforced epoxy nanocomposites: preparation and mechanical properties. Iranian Polymer Journal, 29(3) (2020) 253-264.
- [6] G. Demircan, M. Kısa, M. Özen, A. Açıköz, Quasi-Static Penetration Behavior of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Nanocomposites. Mechanics of Composite Materials, 57(4) (2021) 503-516.
- [7] M. Özen, G. Demircan, M. Kısa, M. Açıköz, G. Ceyhan, Y. Işiker, Thermal properties of surface-modified nano-Al₂O₃/kevlar fiber/epoxy composites. Materials Chemistry and Physics, 278, 125689, 2022.

- [8] S. Ilangoan, S. S. Kumaran, K. Naresh, Effect of nanoparticles loading on free vibration response of epoxy and filament winding basalt/epoxy and E-glass/epoxy composite tubes: experimental, analytical and numerical investigations. *Materials Research Express*, Mater. Res. Express 7 (2020) 025007.
- [9] J. Alexander, B. S. M. Augustine, Free Vibration and Damping Characteristics of GFRP and BFRP Laminated Composites at Various Boundary Conditions. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 8(12), DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i12/54208, June 2015 ISSN (Print) : 0974-6846 ISSN (Online) : 0974-5645.
- [10] N. Rajini, JT. Winowlin Jappes, S. Rajakarunakaran, P. Jeyara, Dynamic mechanical analysis and free vibration behavior in chemical modifications of coconut sheath/nano-clay reinforced hybrid polyester composite. *Journal of Composite Material*, 2012.
- [11] A. Erkliğ, M. V. Çakır, Ö. Y. Bozkurt, B. F. Ahmed, Nano Clay Additive Effect on Shear Strength of GFRP Joints. *Sakarya University Journal of Science*, 23(6) (2019) 1115-1122, DOI: 10.16984/saufenbilder, 523889.
- [12] R. Velmurugan, G. Balaganesan, Modal Analysis of pre and post impacted nano composite laminates. *Latin American Journal of Solids and Structures* 8 (2011) 9- 26.
- [13] M. K. Khorramabadi, Free Vibration of Functionally Graded Epoxy/Clay Nanocomposite Beams based on the First Order Shear Deformation Theory. *Int J Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 12/ No. 2/ June – 2019.
- [14] A.İ. Kaya, Doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik davranışına etkisi, Doktora tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2019.
- [15] H. Adin, M.Ş. Adin, Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites. *Materials Testing*, 64(3) (2022) 401-411.
- [16] M. Ş. Adin, M. Okumuş, Investigation of microstructural and mechanical properties of dissimilar metal weld between AISI 420 and AISI 1018 STEELS. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7) (2022) 8341-8350.
- [17] H. Adin, Z. Sağlam, M.Ş. Adin, Numerical investigation of fatigue behavior of non-patched and patched aluminum/composite plates. *European Mechanical Science*, 5(4) (2021) 168-176.
- [18] A. Demirtaş, M. Bayraktar, Free vibration analysis of an aircraft wing by considering as a cantilever beam. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7(1) (2019) 12-21.
- [19] S. S. Rao, *Mechanical vibrations*, 5th edition, Pearson, 2011.
- [20] A. İ. Kaya, M. Kısa, M. Özen, Influence of natural weathering conditions on the natural frequency change of woven carbonfibre reinforced composites. *Advanced Composites Letters*, 27(2) (2018) 096369351802700201.