

Takviyeli Hibrit Kompozit Levhaların Termomekanik Davranışının Sayısal Olarak Araştırılması

Munise Didem Demirbaş^{*1}, Mehmet Demir¹,

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, 38039, Kayseri, Türkiye
*Sorumlu Yazar: Munise Didem Demirbaş

(Alınış / Received: 23.12.2024, Kabul / Accepted: 30.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Anahtar Kelimeler

Hibrit Kompozit,
Termomekanik Analiz,
Karbon Fiber, Bazalt Fiber,
Aramid Fiber, Sonlu
Elemanlar Analizi

Öz: Bu çalışmada Karbon, Bazalt ve Aramid takviye elemanları kullanılarak iki farklı hibrit kompozit yapının oluşturulduğu, her biri 16 katmandan oluşan bu yapıların termomekanik davranışları Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Analizlerde hibrit yapının termomekanik davranışı üst yüzeyden sıcaklık sınır şartı olmak üzere, alt kenardan ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer kenarlar yalıtılmış ve dört kenarı ankastre yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda hibrit yapıda oluşan termal yer değiştirmeler, deformasyonlar ve gerilme dağılımları incelenmiştir.

Numerical Investigation of Thermomechanical Behavior of Reinforced Hybrid Composite Sheets

Keywords

Hybrid Composite,
Thermomechanical Analysis,
Carbon Fiber, Basalt Fiber,
Aramid Fiber, Finite Element
Analysis

Abstract: In this study, two different hybrid composite structures were formed using Carbon, Basalt and Aramid reinforcement elements, each consisting of 16 layers, and their thermomechanical behaviors were numerically investigated and compared using the Finite Element Method (FEM). In the analyses, the thermomechanical behavior of the hybrid structure was applied as the temperature boundary condition from the upper surface and the heat flux boundary condition from the lower edge. The other edges were insulated and four edges were fixed. As a result of this study, the thermal displacements, deformations and stress distributions occurring in the hybrid structure were investigated.

1. Giriş

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapay materyallerdir ve her bir bileşen makro seviyede özelliklerini korur. Bu özellikleri sayesinde kompozit malzemeler, geniş bir kullanım alanına sahiptir çünkü yüksek mukavemet ve hafiflik gibi avantajlar sunarlar. Kompozit yapılar genellikle düşük dayanıma sahip bir ana matris ve bu matrisi güçlendiren takviye elemanlarından oluşur. Ana matris, kompoziti dış etkilere karşı koruyarak, takviye elemanları malzemeye dayanıklılık, tokluk ve süneklik kazandırır [1-3].

Hibrit kompozitler, birden fazla takviye elemanı içeren yapılardır ve bu özellikleri sayesinde dayanıklılık ve işlevsellik açısından daha üstün özellikler sunarlar. Karbon, bazalt ve aramid gibi farklı liflerle güçlendirilmiş hibrit kompozitler, mekanik performansı iyileştirirken, termal dayanıklılık ve gerilme dağılımı gibi özelliklerin optimize edilmesine olanak tanır. Bu nedenle hibrit kompozitler, karmaşık yükleme koşulları altında yüksek performans sergileyen uygulamalar için oldukça uygundur [4].

Bu çalışmada, karbon, bazalt ve aramid takviyeli 16 katmanlı iki farklı hibrit kompozit yapının termomekanik davranışı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal analizlerde, hibrit kompozitin termal yer değiştirme, deformasyon ve gerilme dağılımları, üst yüzeyden sıcaklık sınır şartı olmak üzere, alt kenardan ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer kenarlar yalıtılmış ve dört kenarı ankastre yapılmıştır.

Bu çalışma, hibrit kompozitlerin termal ve mekanik yükler altında gösterdiği performans hakkında önemli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1 Literatür taraması

Hibrit kompozit yapıları termomekanik davranışı üzerine yapılan bazı çalışmalara aşağıda değinilmiştir. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının kullanımıyla optimize edilen üstün mekanik ve termal özellikler sunar. Zhang ve arkadaşları karbon ve bazalt gibi farklı fiberlerin kombinasyonu ile hibrit kompozitlerin çekme mukavemetinin ve termal direncinin arttığını ifade ettiler [5]. Özellikle bazalt lifleri termal dayanıklılık sağlarken, karbon lifleri çekme mukavemetini yükseltmiştir. Singh ve arkadaşları, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile hibrit kompozitlerin mekanik ve termal yükler altındaki davranışını incelemiş, sıcaklık artışıyla malzemede oluşan deformasyonların önemini vurgulamıştır [6]. Bu çalışmada, farklı sıcaklık ve yük koşullarında hibrit kompozitlerde gerilme birikiminin farklılık gösterdiği ortaya konmuştur.

Liang ve arkadaşları, karbon ve bazalt takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetini incelemiş, bu tür malzemelerin geleneksel kompozitlere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirlemiştir [7]. Sıcaklık değişimlerinin, mikroyapısal deformasyonlara neden olarak malzemenin performansını nasıl etkilediği de ele alınmıştır. Wang ve arkadaşları, dört taraflı sıkıştırma altında hibrit kompozitlerin termal ve mekanik yükler altındaki davranışını incelemiş, yüksek sıcaklık koşullarının malzemede homojen olmayan gerilme dağılımlarına yol açtığını göstermiştir [8]. Hibrit kompozitlerin termal genleşme özellikleri üzerine yapılan bir diğer çalışma, farklı takviye elemanlarının malzeme içerisindeki termal yükler altında nasıl davrandığını analiz etmiştir. Özellikle, karbon ve bazalt lifleri arasındaki farklılıkların malzemenin genleşme katsayısına etkisi vurgulanmıştır. Kim ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin kırılma dayanımını araştırarak, bu tür malzemelerin çok katmanlı yapılarının kırılma mekanizmalarını nasıl etkilediğini açıklamıştır [10]. Karbon ve bazalt fiberlerinin birlikte kullanımı, malzemenin kırılma dayanımını artırmıştır. Chen ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin sıcaklık ve mekanik yükler altındaki davranışını termomekanik analizler yoluyla incelemiş, yüksek sıcaklıkta oluşan deformasyon ve gerilme birikimlerinin malzemenin performansına olan etkilerini değerlendirmiştir [11]. Liu ve arkadaşları, karbon, aramid ve bazalt fiberlerinin kombinasyonlarının hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerine nasıl etki ettiğini incelemiştir [12]. Araştırmalar, fiberlerin farklı oranlarda kullanımıyla malzemelerin mekanik ve termal dayanıklılığının optimize edilebileceğini göstermiştir.

Polimer matrisli hibrit kompozitler, çeşitli liflerle güçlendirildiğinde daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlar. Smith ve arkadaşları, polimer bazlı matrislerde karbon ve bazalt fiberlerinin kullanımıyla mekanik performansın iyileştirildiğini ortaya koymuştur [13]. Xiang ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin termal yük altındaki davranışlarını analiz etmiş ve farklı takviye fiberlerinin sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini incelemiştir [14]. Bu çalışma, yüksek sıcaklık koşullarında malzemelerin deformasyon davranışlarını anlamaya yönelik önemli sonuçlar sunmuştur. Hibrit kompozitlerin farklı sıcaklık koşulları altında nasıl davrandığı üzerine yapılan çalışmalarda, sıcaklık değişimlerinin malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu analizler, malzemelerin ısı dayanıklılık açısından optimize edilmesine olanak tanımıştır. Çevresel koşulların hibrit kompozitlerin dayanıklılığı üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma, nem ve sıcaklık gibi faktörlerin malzemenin uzun vadeli performansını nasıl etkilediğini vurgulamıştır. Farklı takviye elemanlarının hibritizasyonu üzerine yapılan bu çalışma, fiberlerin mekanik yükler altında nasıl sinerjik etkiler sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalar, karbon ve bazalt fiberlerinin birlikte kullanımının malzeme dayanıklılığını artırdığını göstermektedir. Düşük sıcaklık koşullarında hibrit kompozitlerin davranışlarını inceleyen bu çalışma, malzemelerin termal dayanıklılıklarını ve gerilme dağılımlarını değerlendirmiştir. Son olarak, farklı yüklemeye koşulları altında hibrit kompozitlerin deformasyon ve gerilme dağılımlarını inceleyen bu çalışma, malzeme tasarımında yük dağılımının önemini vurgulamıştır.

Bu literatür taraması, hibrit kompozitlerin geniş uygulama alanlarında nasıl kullanıldığını ve bu malzemelerin termomekanik davranışlarını inceleyen güncel araştırmaları kapsamakta olup Karbon/Bazalt/Aramid takviyeli hibrit kompozitlerin mevcut dizilimle üretildiği ve sayısal olarak termomekanik davranışının araştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bağlamda, çalışmamız karbon, bazalt ve aramid takviyeli hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarını sayısal olarak inceleyerek literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

1.2. Problem durumu

Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışının araştırılması, bu malzemelerin sıcaklık değişimlerine tepkilerini anlamak için kritik bir alan öneme sahiptir. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılar olup, hafiflik, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gibi avantajlar sunarak geniş bir uygulama alanı bulurlar. Bu tür malzemelerin termomekanik davranışlarının anlaşılması, tasarım süreçlerinde güvenlik ve performans açısından büyük önem taşır. Hibrit kompozitlerin sıcaklık altında mukavemet kaybı, gerilme yığılması ve deformasyon gibi özellikleri, kullanılan liflerin türüne ve malzeme yapısına bağlı olarak, hibrit

kompozitlerin sıcaklık altında mukavemet kaybı, gerilme yığılması ve deformasyon gibi özellikleri, kullanılan lif türüne ve malzeme yapısına bağlı olarak değişir. Karbon, bazalt ve aramid gibi farklı liflerin kombinasyonları, malzemenin mekanik özelliklerini optimize ederken, termal davranışlarının da dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal analiz teknikleri, hibrit kompozitlerin performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [5-6]. Sonuç olarak, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi, malzemenin tasarımında ve mühendislik uygulamalarındaki verimliliğin artırılması açısından hayati bir öneme sahiptir. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanları ile güçlendirilmiş yapılar oluşturarak hem mekanik dayanıklılığı hem de termal stabiliteyi artırma potansiyeline sahiptir.

1.3. Araştırmanın amacı

Yapılan analizler, bu levhaların termomekanik davranışlarının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlar. Özellikle, sıcaklık değişimlerinin malzeme üzerindeki etkilerini anlamak, bu kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmanın sonuçları, hibrit kompozit levhaların termomekanik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda daha verimli bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunacaktır. Bunun yanı sıra, hibrit kompozitlerin tasarımında ve mühendislik uygulamalarında sürdürülebilir ve etkili çözümler sunma potansiyelini artıracaktır [8,15].

1.4. Araştırmanın önemi

Bu araştırmanın önemi, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulduğundan, bu malzemelerin mekanik ve termal özellikleri, kullanılan liflerin türüne ve oranına bağlı olarak değişir. Bu tür araştırmalar, şu alanlarda önemli katkılar sağlar:

- **Mekanik ve Termal Performansın Optimize Edilmesi:** Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının anlaşılması, mühendislik tasarımlarında malzeme seçiminde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlar. Özellikle yüksek sıcaklık ve mekanik yük koşullarında performansın artırılması, çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenliği ve verimliliği artırır [5-6].
- **Endüstriyel Uygulamalar İçin Uygunluk:** Polimer kompozit levhaların kullanımı, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sunarak otomotiv, havacılık ve inşaat gibi birçok sektörde önem kazanmaktadır. Bu araştırmalar, hibrit kompozitlerin bu alanlardaki uygunluğunu değerlendirmek ve malzemelerin belirli uygulamalar için optimize edilmesini sağlamak amacıyla gereklidir [8,15].
- **Yeni Malzeme Geliştirme:** Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının incelenmesi, yeni malzeme türlerinin geliştirilmesine ve mevcut malzemelerin performanslarının iyileştirilmesine katkı sağlar. Bu hem araştırma hem de endüstri açısından yenilikçi çözümler sunar [7,12].
- **Sürdürülebilirlik ve Ekonomik Verimlilik:** Hibrit kompozitler, malzeme tasarrufu sağlayarak daha sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunabilir. Malzemelerin daha verimli kullanılması, üretim maliyetlerini azaltırken çevresel etkileri de minimize eder [16,17].

Sonuç olarak, bu araştırmanın önemi, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi ile ilgili olup, mühendislik uygulamalarında bu malzemelerin verimli ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır.

2. Malzeme ve Metot

2.1 Bu araştırmada kullanılacak olan polimer kompozitler için takviye malzeme türleri

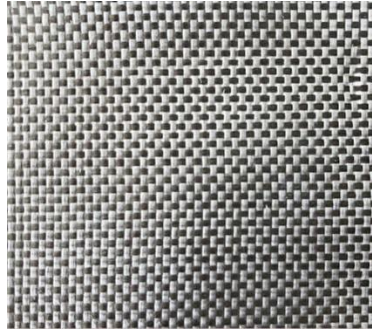
Karbon Fiber: Karbon fiber, karbon atomlarının uzun parçalar halinde düzenli olarak dizilmesiyle oluşan (Şekil 1) üçlü ve hafif bir malzemedir. Genellikle polimer matrisle birleştirilerek kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır. Karbon fiberin ana özellikleri arasında yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal dayanıklılık ve iyi termal iletkenlik bulunur.

Karbon fiberin çeşitli endüstriyel uygulamaları; otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde, rüzgâr enerjisi türbinlerinde, spor ekipmanlarında ve yapısal güç gerektiren diğer alanlardır [2,4]. Bu malzemenin yüksek mukavemeti ve hafifliği, performansın artırılması ve enerji verimliliğinin sağlanması gibi çeşitli avantajlar sunar.



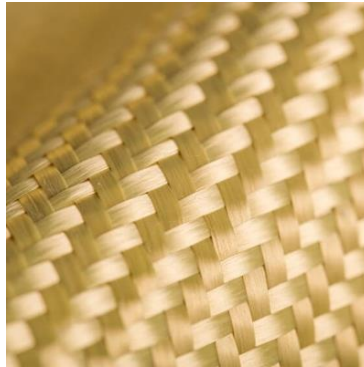
Şekil 1. Karbon Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Bazalt Fiber: Bazalt fiber, doğal bazalt kayalarından elde edilen ince liflerdir (Şekil 2). Bu lifler, erimiş bazalt kütlelerinin özel yöntemlerle işlenmesiyle üretilir. Bazalt fiberin öne çıkan özellikleri arasında yüksek mukavemet, termal dayanıklılık, kimyasal direnç ve düşük yoğunluk bulunur. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, yapı malzemeleri, spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde kullanımı yaygındır [2,4].



Şekil 2. Bazalt Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Aramid Fiber: Aramid fiber, sentetik bir lif türüdür ve poliamid (aramid) polimerlerden üretilir (Şekil 3). Bu fiberler, genellikle yüksek mukavemet, yüksek modül ve iyi termal direnç gibi özelliklerle karakterizedir [2,4]. Aramid fiberlerin en yaygın kullanılan türlerinden biri, Dupont tarafından geliştirilen ve Ticel adı altında ticari olarak satılan Kevlar'dır.



Şekil 3. Aramid Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Hibrit kompozit malzemeler, günümüzde birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, polimer matris içinde birden fazla takviye edici malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulur. Genellikle cam elyafı, karbon elyafı veya seramik parçacıklar gibi takviye edici malzemeler kullanılır. Hibrit kompozitlerin yüksek mukavemet-takviye oranı, bu malzemelere hem yüksek dayanıklılık hem de hafiflik kazandırır [5-6]

Hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışını analiz etmek, tasarım ve mühendislik süreçlerinde kritik bir adımdır. Bu analizler, malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik performansın tahmin edilmesi açısından önemlidir. Sonuç olarak, daha güvenilir ve optimize edilmiş ürünlerin elde edilmesi sağlanır [6,15].

Bu çalışmada, hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS paket programı kullanılarak incelenmiştir. Ansys, mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır ve termomekanik analizler için çeşitli özellikler sunar. Bu program, malzeme modellerini kullanarak gerçek yaşam koşullarını simüle etme yeteneği ile dikkat çeker [8].

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, hibrit kompozit malzemelerin termal genişleme davranışı, malzeme modellemesi, gerilme analizi ve termal gerilme analizi gibi konular ele alınacaktır. Bu analizlerin yapıldığı örnekler ve elde edilen sonuçlar paylaşılacak ve hibrit kompozitlerin termomekanik davranışının incelenme süreci detaylandırılacaktır.

Bu çalışma ile hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışları detaylı bir şekilde analiz edilerek, daha güvenilir ve optimize edilmiş ürünlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ansys gibi simülasyon araçlarının kullanılması, bu analizlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

2.2 Malzemelerin mekanik özellikleri

Bu çalışma süresince yapılan analizlerde kullanılan malzeme parametreleri “<https://www.matweb.com/>” ağ sayfasından alınarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Aramid Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Yoğunluk (Density)	1,44e-006 kg/mm ³
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	6,0e-005 W/mm°C

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	67000	4700	4700
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,34	YZ: 5,0e-002	XZ: 0,34
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 2000	YZ: 1586	XZ: 2000

Özellik	Değer
Sıcaklık (Temperature)	21°C

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C ⁻¹)	Y Yönü (°C ⁻¹)	Z Yönü (°C ⁻¹)
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	-2,0e-006	6,0e-005	6,0e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	2700	70	70
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -1200	Y: -150	Z: -150
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 150	YZ: 75	XZ: 150

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	3,0e-002	1,0e-002	1,0e-002
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-1,0e-002	-1,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

Tablo 2. Bazalt Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Yoğunluk (Density)	2,7e-006 kg/mm ³
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	4,0e-005 W/mm ² C

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	89000	9000	9000
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,25	YZ: 0,2	XZ: 0,25
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 3500	YZ: 1200	XZ: 3500

Özellik	Değer
Sıcaklık (Temperature)	21°C

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C ⁻¹)	Y Yönü (°C ⁻¹)	Z Yönü (°C ⁻¹)
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	8,1e-006	1,21e-005	1,21e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	1100	50	50
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -600	Y: -150	Z: -150
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 60	YZ: 60	XZ: 60

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	3,0e-002	5,0e-003	5,0e-003
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-2,0e-002	-2,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

Tablo 3. Karbon Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	9,0e-003 W/mm ² C
Yoğunluk (Density)	1,8e-006 kg/mm ³

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	2,3e+005	10000	10000
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,27	YZ: 0,4	XZ: 0,27
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 5000	YZ: 2000	XZ: 5000

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C ⁻¹)	Y Yönü (°C ⁻¹)	Z Yönü (°C ⁻¹)
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	-1,0e-007	2,2e-005	2,2e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	2000	50	50
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -1200	Y: -200	Z: -200
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 80	YZ: 50	XZ: 80

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	1,5e-002	5,0e-003	5,0e-003
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-2,0e-002	-2,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

2.3 Metot

Yapılan bu araştırma, ANSYS paket programı üzerinden modellenerek ve gerekli sınır şartları tariflenerek gerçekleştirilecek ve elde edilen veriler, polimer kompozit levhanın termomekanik davranışını tanımlayan modellerle ilişkilendirilecektir. Bu modeller, malzemenin karmaşık davranışlarını daha iyi anlamak ve gelecekteki tasarımlar için rehberlik sağlamak amacıyla kullanılabilir.

İlk adım, polimer kompozit levhanın başlangıç mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesidir. Bu, malzemenin bileşenlerinin belirlenmesi, mikro yapısal analizlerin yapılması ve başlangıç modül, mukavemet, termal iletkenlik gibi temel özelliklerin ölçülmesini içerebilir.

2.4 Ansys'in polimer kompozit malzemeler için kullanımı

Ansys, polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışının analizi için güçlü bir mühendislik simülasyon yazılımıdır. Bu yazılım, polimer kompozit malzemelerin tasarım aşamasında yüksek performanslı analizler yapılmasına olanak sağlar.

Ansys, polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını çeşitli analiz yöntemleriyle inceleyebilir. Bunlardan biri, malzemenin gerilme ve şekil değiştirme tepkilerini belirlemek için sahip olduğu Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanmaktır. SEM malzemenin geometrisini ayrı parçalara (elemanlara) bölerek kompleks analizler yapmayı sağlar.

Ansys, polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çeşitli simülasyon araçları sunar. Gerilme analizi, malzemenin üzerine etki eden dış kuvvetlere ve sıcaklığa bağlı gerilme dağılımını hesaplamak için kullanılır. Şekil değiştirme analizi ise malzemenin deformasyon davranışını ve yapısal bütünlüğünü belirlemek için kullanılır.

Ayrıca Ansys, polimer kompozit malzemelerin termal davranışını da analiz edebilir. Termal analiz, malzemenin sıcaklık kazanımına veya kaybına bağlı olarak nasıl tepki verdiğini değerlendirir. Bu analiz, malzemenin termal genleşme, ısı dağılımı ve termal gerilmeler gibi termal davranışlarına ışık tutar.

Ansys, polimer kompozit malzemelerin tasarım aşamasında kullanılacak en iyi malzeme seçiminde ve yapısal olarak optimize edilmesi konusunda çeşitli modelleme ve simülasyon araçları sunarak mühendislerin karar verme sürecini kolaylaştırır. Ayrıca, mevcut tasarımların gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini tahmin etmek için yapısal analiz yapmak suretiyle test etme imkanı sağlar.

Sonuç olarak, Ansys kullanımı, mühendislerin daha etkin tasarımlar yapmalarını, malzemelerin performansını optimize etmelerini ve ürünlerin mukavemet ve dayanıklılığını artırmalarını sağlar. Mühendisler, bu yazılımı kullanarak daha iyi tasarımlar yapabilir, malzemelerin performansını optimize edebilir ve ürünlerin mukavemet ve dayanıklılığını artırabilir. Polimer kompozit malzemelerin gelecekteki kullanım alanlarında büyük bir potansiyele sahip olmasıyla birlikte, Ansys'in analiz yetenekleri daha da önem kazanmaktadır.

3. Modelleme ve Analiz

3.1 Malzeme modellemesi ve geometri oluşturma

Polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını analiz etmek için doğru malzeme modellemesi ve geometri oluşturma önemlidir. Bu adımlar, sonuçların doğruluğunu ve analizin güvenilirliğini sağlamak için dikkatlice yapılmalıdır.

Malzeme modellemesi, malzemenin fiziksel özelliklerini ve davranışını doğru bir şekilde temsil etmeyi amaçlar. Bu nedenle, uygun malzeme modeli seçimi son derece önemlidir.

Geometri oluşturma aşamasında, polimer kompozit malzemenin gerçek dünya geometrisini doğru bir şekilde temsil etmek önemlidir. Bu adım, genellikle CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilir. Malzeme geometrisinin hassasiyetle modellenmesi, analiz doğruluğunu ve sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir.

3.2 Sınır koşullarının belirlenmesi

Polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını anlamak için, doğru sınır koşullarını belirlemek önemlidir. Sınır koşulları, malzemenin simülasyon sırasında maruz kaldığı dış etkileri temsil eder.

Sınır koşulları, birçok farklı faktörü içerebilir. Öncelikle, malzemenin üzerine uygulanan kuvvetler veya gerilmeler dikkate alınmalıdır. Bu, malzemenin gerilme dağılımının nasıl oluştuğunu ve malzemenin nasıl deforme olduğunu belirleyecektir.

Ayrıca, sıcaklık koşulları da polimer kompozit malzemelerin davranışını etkileyen önemli bir faktördür. Malzemede ısı birikimi veya sıcaklık değişimleri, yapının genleşmesine veya büzülmesine neden olabilir. Bu nedenle, simülasyon sırasında malzeme üzerindeki sıcaklık etkilerinin dikkate alınması önemlidir.

Sınır koşullarını belirlemek için deneysel veriler veya fiziksel modeller kullanılabilir. Deneysel veriler, malzemenin gerçek davranışıyla ilgili bilgiler sağlar. Fiziksel modeller ise, malzemenin matematiksel olarak tanımlanmasını ve simülasyonların gerçekçi sonuçlar üretmesini sağlar.

3.3 Termomekanik analiz adımları

Termomekanik analiz, polimer kompozit malzemelerin termal ve mekanik davranışını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, malzemenin sıcaklık değişimleri, termal genleşme, mekanik gerilmeler ve deformasyonlar gibi termal ve mekanik etkiler altında nasıl davrandığını belirlemeyi amaçlar. Ansys yazılımı, bu tür analizler için yaygın olarak kullanılan bir simülasyon aracıdır ve termomekanik analiz adımları genellikle aşağıdaki şekilde sıralanır:

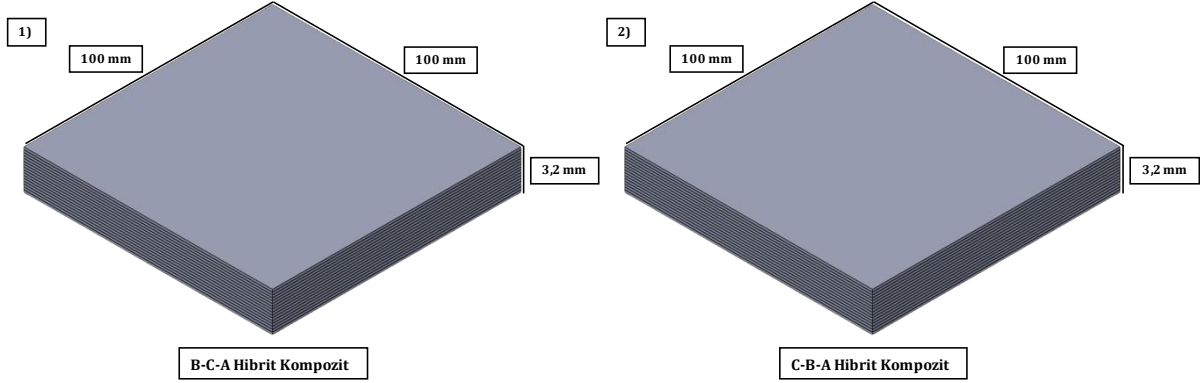
3.3.1. Geometri Tanımlama: İlk adım, analiz yapılacak olan polimer kompozit malzemenin geometrisinin tanımlanmasıdır (Şekil 4). Bu adımda, malzemenin boyutları, şekli ve bölümleri belirlenir. Geometri, CAD yazılımları veya önceden oluşturulmuş modeller kullanılarak tanımlanabilir.

Tablo 4. Model Ölçüleri Tablosu.

Sınır Kutusu (Bounding Box)	Değerler
Uzunluk X	100 mm
Uzunluk Y	100 mm
Uzunluk Z	3.2 mm

3.3.2. Belirlenen katmanlar:

1. Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt
2. Karbon-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt-Aramid-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Aramid-Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Karbon (Şekil 4).



Şekil 4. Hibrit Kompozitlerin Katman ve Geometri Görseli.

3.3.3. Katmanların ve dizilimin seçim kriterleri

Mekanik Performans:

Basalt ve Karbon: Yüksek mukavemet ve sertlik özellikleriyle öne çıkan bu malzemeler, kompozitin taşıma kapasitesini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için stratejik olarak yerleştirilmiştir. Basalt lifleri, darbe dayanımı ve ısıya karşı direnç sağlarken karbon lifleri, hafiflik ve yüksek elastik modül sunar.

Aramid: Darbe dayanımını artırmak ve çatlama riskini azaltmak için aramid lifleri kullanılmıştır. Özellikle ara katmanlarda kullanılarak enerji yutma kapasitesi artırılmıştır.

Katman Dizilimi:

Katmanlar, simetrik bir şekilde yerleştirilerek malzeme içinde termal ve mekanik gerilmelerin homojen bir şekilde dağıtılması hedeflenmiştir. Simetrik dizilim, eğilme ve burulma gibi yükler altında deformasyon riskini azaltır. Dizilimde, farklı malzemelerin özellikleri bir araya getirilerek her bir katmanın zayıf yönleri diğer katmanlar tarafından desteklenmiştir. Örneğin, karbon liflerinin kırılganlığı aramid ve bazalt lifleriyle dengelenmiştir.

Üretilebilirlik:

Katman dizilimi, üretim sürecinde kolaylık sağlamak amacıyla basit ve tekrarlanabilir bir şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan malzemelerin ticari olarak erişilebilir ve maliyet etkin olması göz önünde bulundurulmuştur. Özellikle bazalt ve aramid lifleri, hem maliyet avantajı hem de yüksek performans özellikleri sunduğu için tercih edilmiştir. Katman kalınlıkları ve geometri, üretim sırasında laminasyon ve presleme süreçlerinin sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesine uygun olarak belirlenmiştir.

3.3.4. Sınır koşulları

Analizin doğru sonuçlar verebilmesi için, malzeme üzerindeki sınır koşullarının belirlenmesi gereklidir. Bu adımda, malzemenin etkileneceği sıcaklık, basınç veya kuvvet gibi dış etkilerin tanımlanması önemlidir.

Tablo 5. Termal Sınır Şartları Tablosu.

Kapsam			
Seçim Yöntemi	Geometri Seçimi		
Geometri	1 Yüzey	5 Yüzey	1 Yüzey
Tanım			
Tür	Sıcaklık	Mükemmel İzolasyon	Isı Akışı
Büyükölçü	25 °C (kademeli)	0 W	70 W (kademeli)

Tablo 6. Statik Sınır Şartları Tablosu.

Nesne Adı	Sabit Destek
Durum	Tam Tanımlı
Kapsam	
Seçim Yöntemi	Geometri Seçimi
Geometri	4 Yüzey
Tanım	
Tür	Sabit Destek
Bastırılmış	Hayır

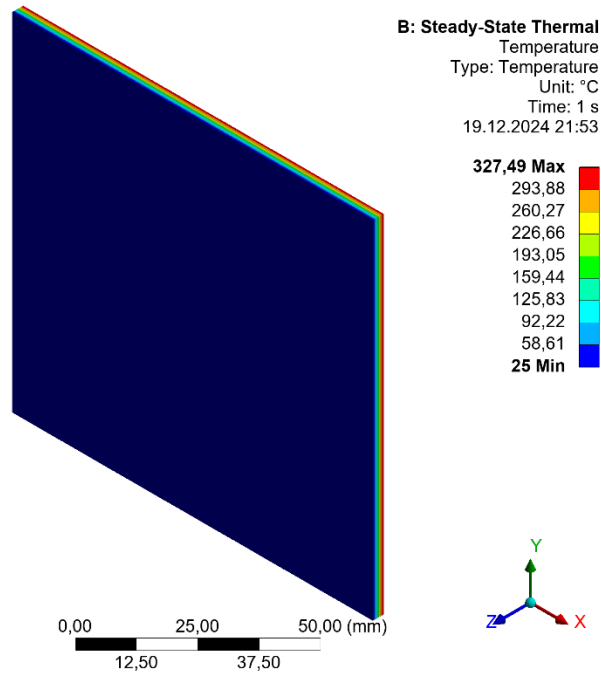
3.4. Analiz

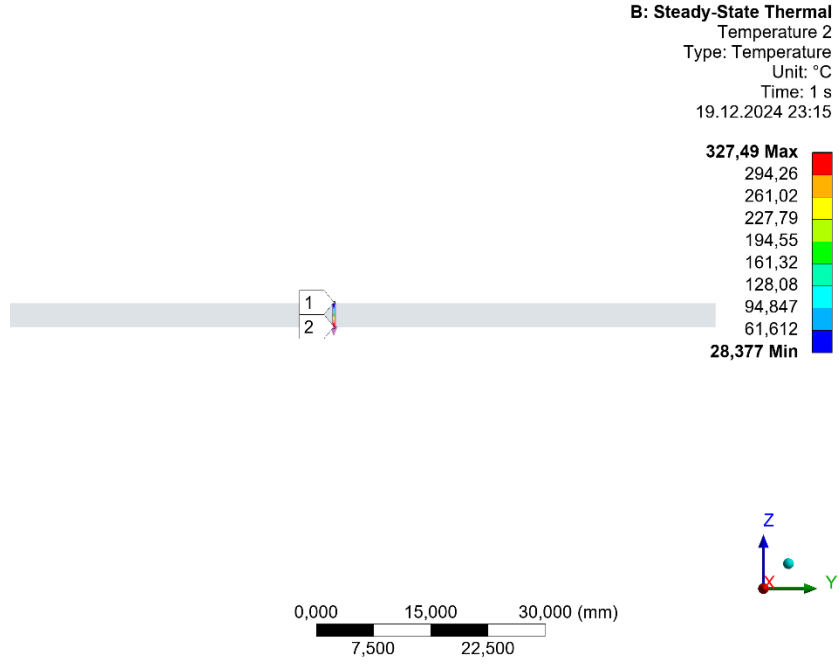
Bu aşamada, malzemenin termal ve mekanik davranışlarının simülasyonları gerçekleştirilmektedir. Ansys yazılımı, termal genleşme, ısı transferi ve mekanik yüklerin etkilerini dikkate alarak analiz sonuçlarını hesaplar. Sonuçların Değerlendirilmesi: Analiz sonuçları doğrulukları ve tutarlılıkları açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilir. Sonuçlar, malzemenin termal genleşme davranışı, stres dağılımı, deformasyon miktarı gibi önemli bilgiler sağlayabilir.

Termomekanik analiz adımları, polimer kompozit malzemelerin davranışı hakkında önemli bilgiler sunabilir. Bu adımların doğru bir şekilde uygulanması, analiz sonuçlarının güvenilir ve gerçekçi olmasını sağlar. Ansys yazılımı, analiz adımlarının kolayca takip edilmesini sağlayarak, bu tür analizlerin daha verimli bir şekilde yapılmasına yardımcı olur.

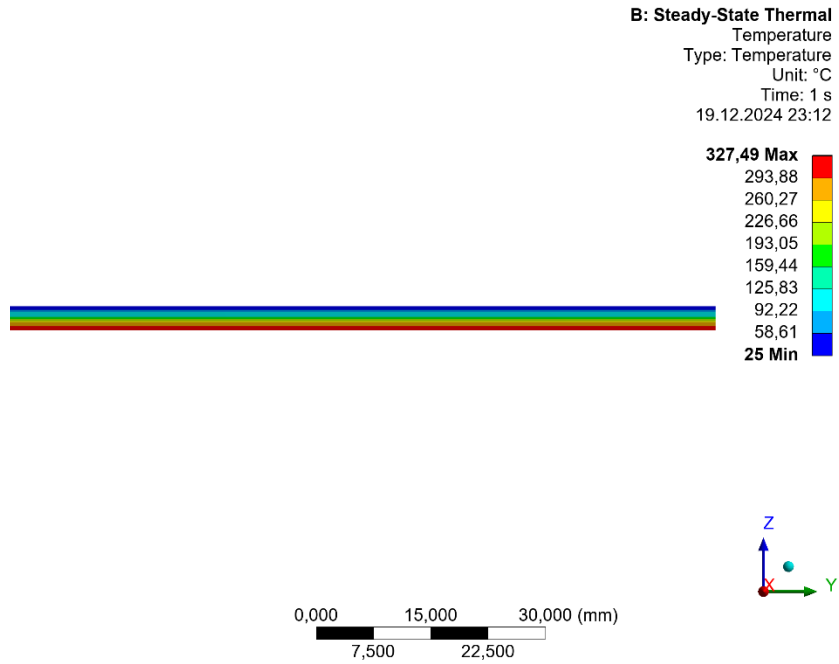
3.4.1 BCA katmanlı levha için analiz sonuçları

3.4.1.1 BCA katmanlı levha için termal analiz çıktıları

**Şekil 5.** Termal analiz görseli 1.

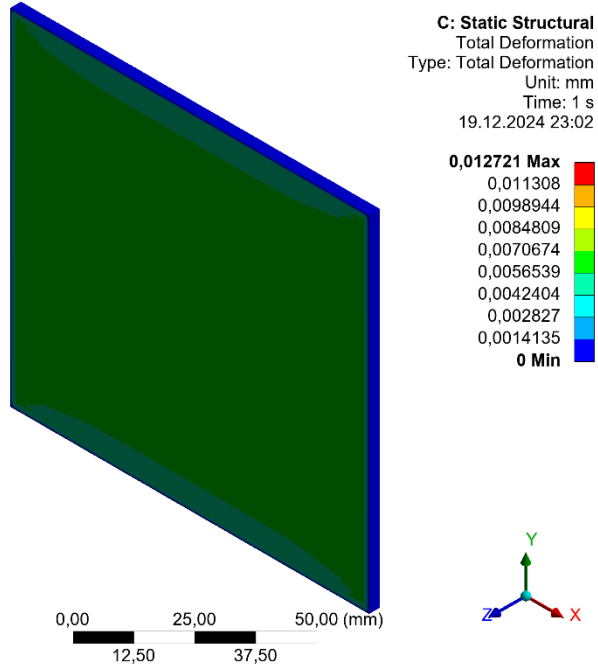


Şekil 6. Termal analiz görseli 2.



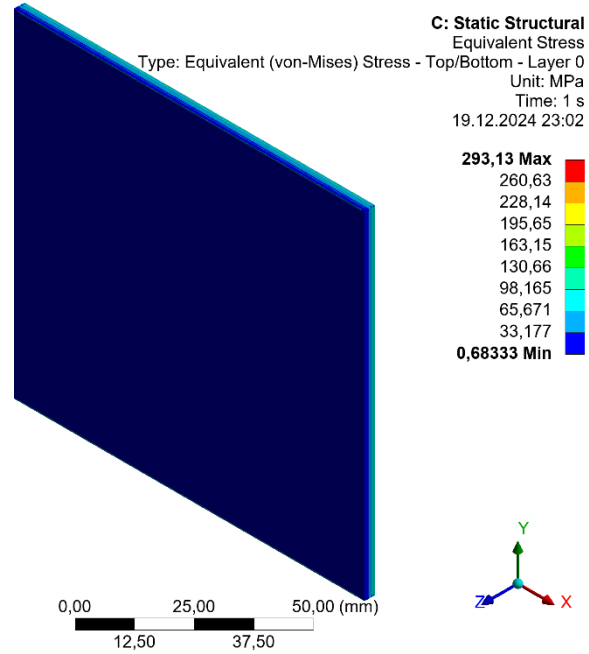
Şekil 7. Termal analiz görseli 3.

3.4.1.2 BCA Katmanlı Levha için Total Deformasyon Analizi Sonuçları

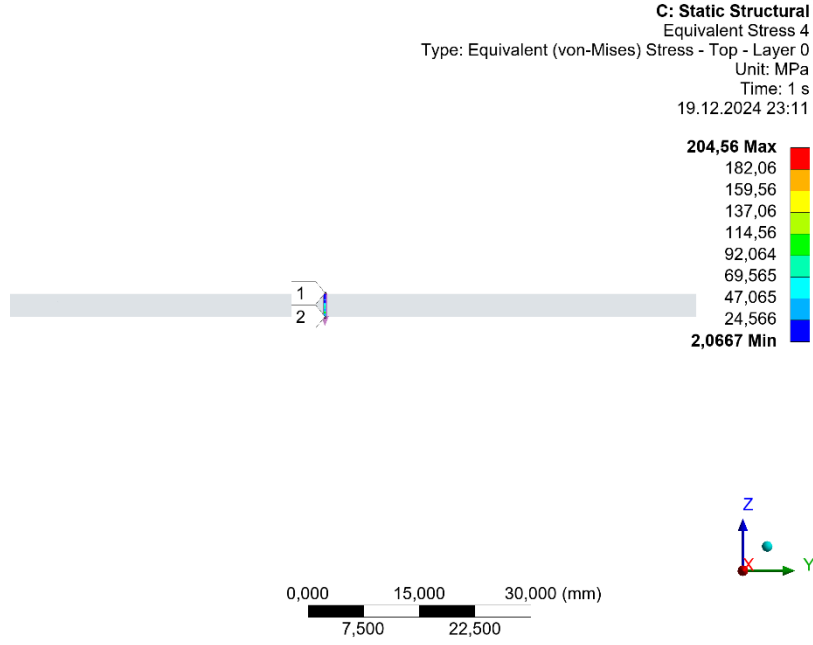


Şekil 8. Total Deformasyon Analiz görseli.

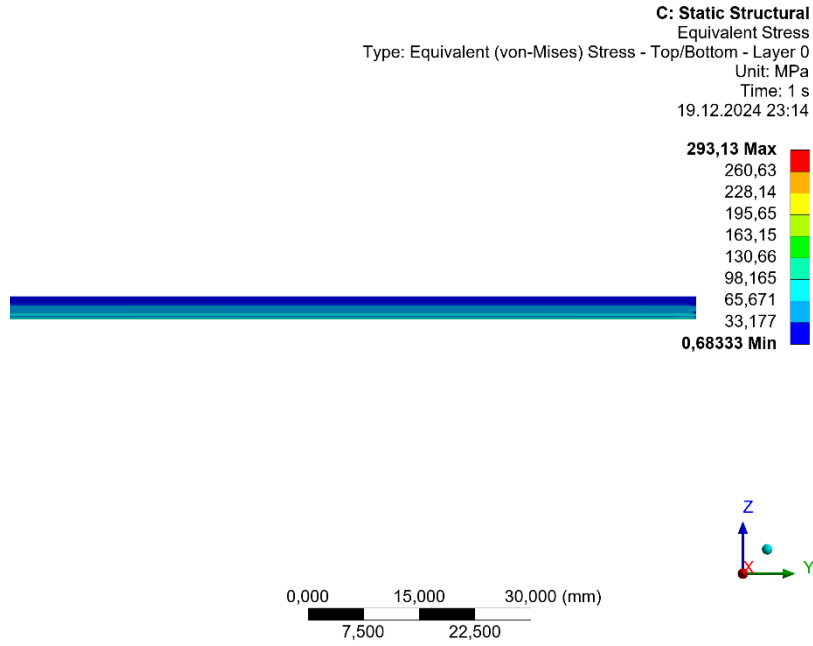
3.4.1.3 BCA Katmanlı Levha için Von Mises Gerilme Analizi Sonuçları



Şekil 9. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 1.



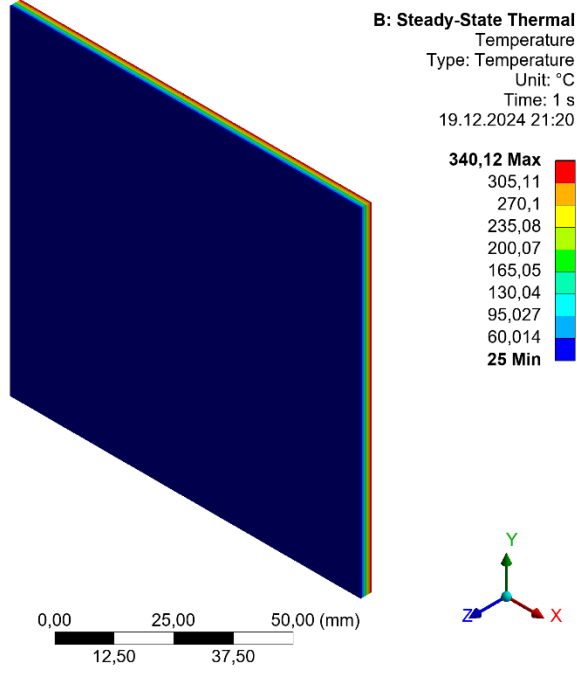
Şekil 10. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 2.



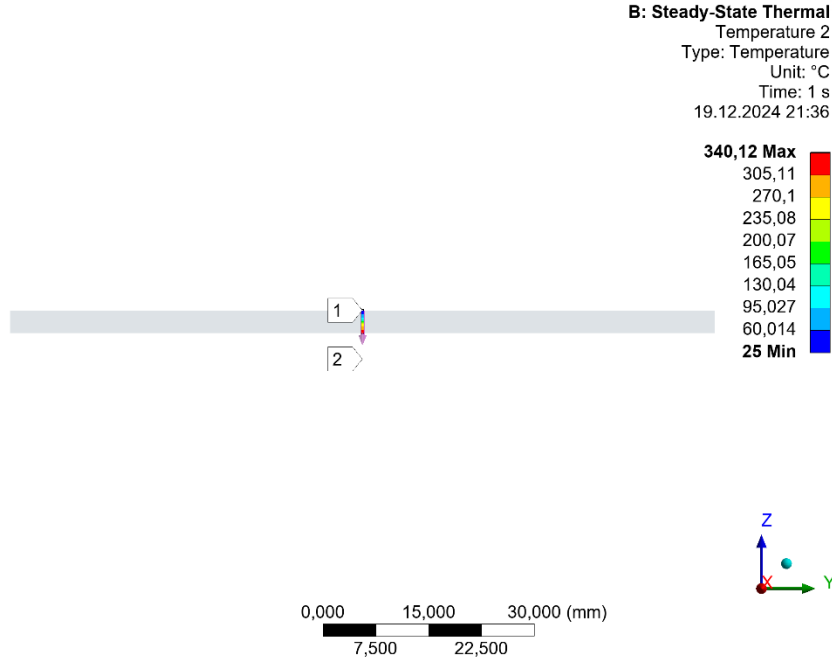
Şekil 11. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 3.

3.4.2 CBA katmanlı levha için analiz sonuçları

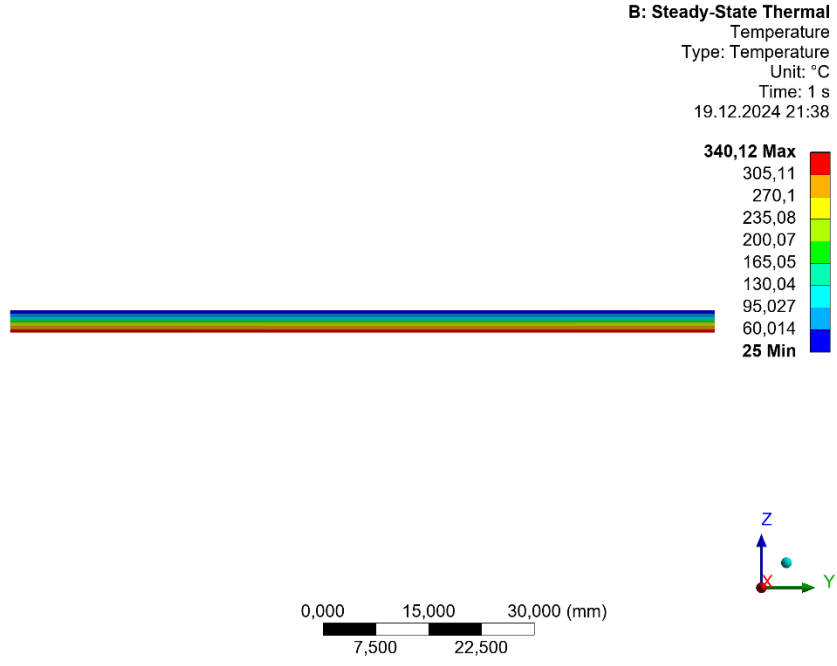
3.4.2.1 CBA katmanlı levha için termal analiz çıktıları



Şekil 12. Termal analiz görseli 1.

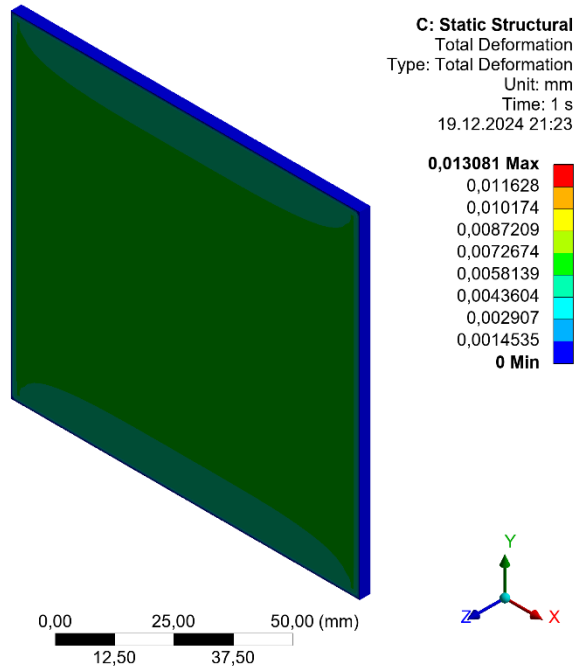


Şekil 13. Termal analiz görseli 2.



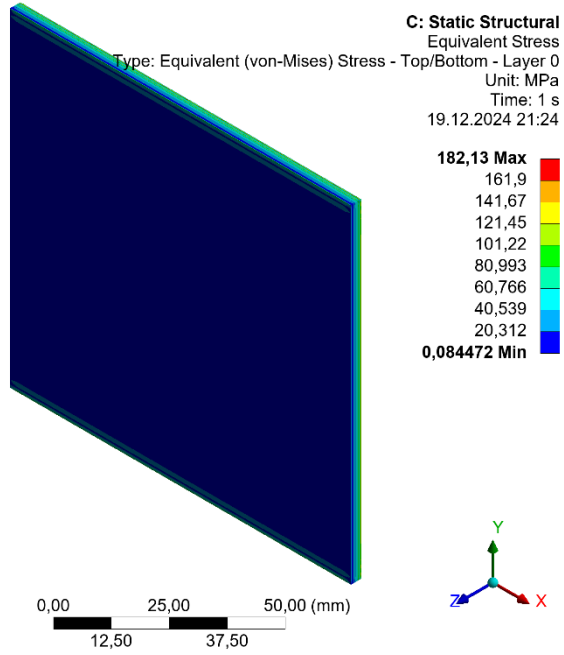
Şekil 14. Termal analiz görseli 3.

3.4.2.2 CBA katmanlı levha için total deformasyon analizi sonuçları

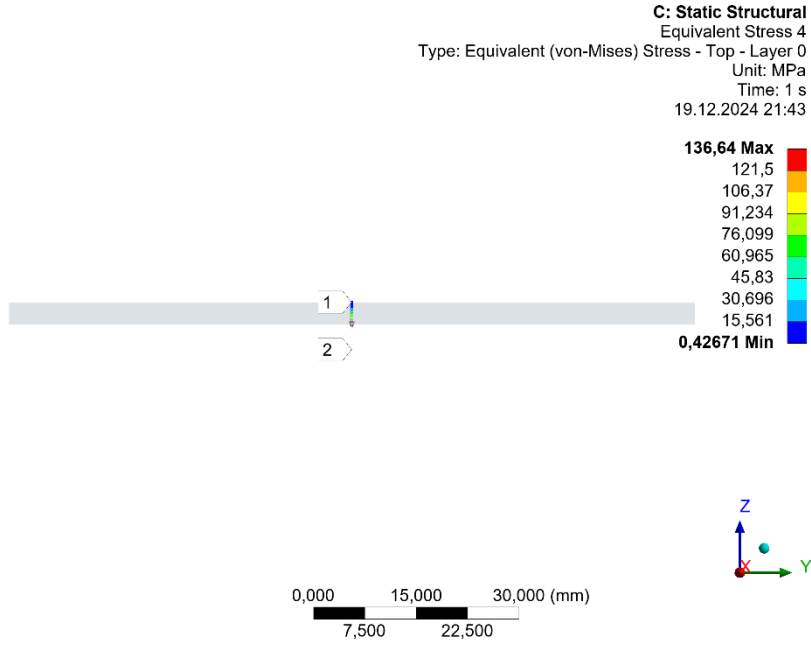


Şekil 15. Total Deformasyon Analiz görseli.

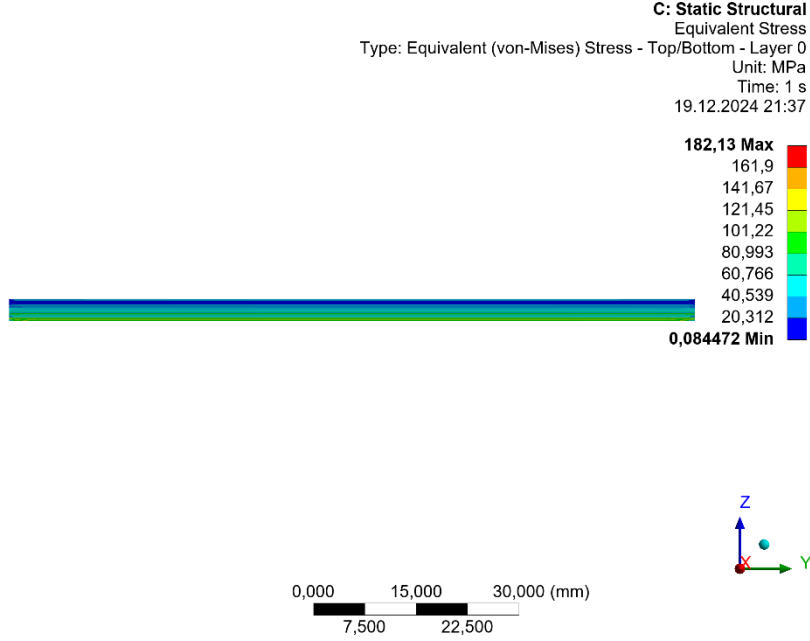
3.4.2.3 CBA katmanlı levha için von mises gerilme analizi sonuçları



Şekil 16. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 1.



Şekil 17. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 2.)



Şekil 18. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 3.

4. Bulgular

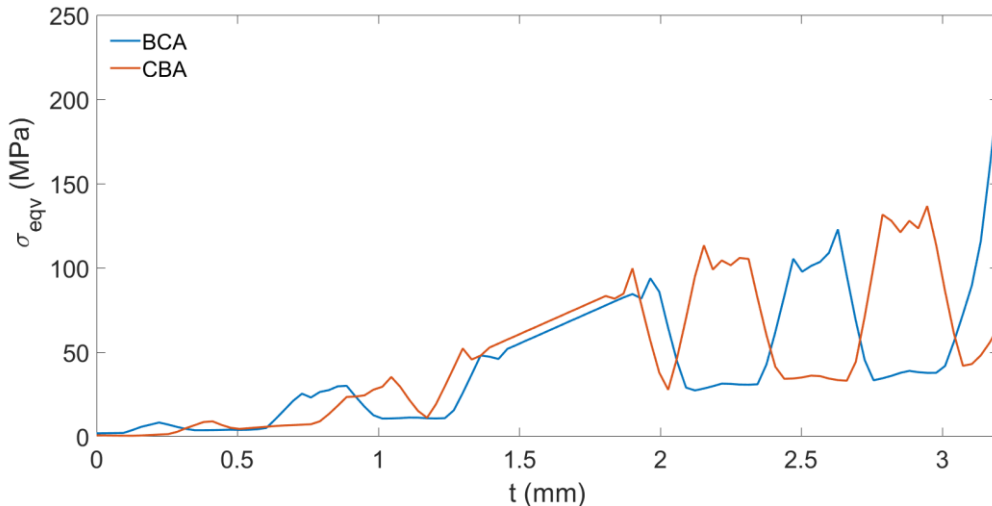
Bu çalışma kapsamında polimer kompozit levhaların termomekanik davranışı sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.

ANSYS yazılımı aracılığıyla, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışlarının sayısal modellenmesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, levhanın farklı sıcaklık ve mekanik yük koşullarında nasıl davrandığını göstermektedir.

Özellikle, levhanın sıcaklık dağılımı, termal gerilmeler, gerinme, deformasyon ve diğer mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının karmaşıklığını ve çeşitliliğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar görüntü ve tablo halinde verilmiştir ve bu neticeye göre, bu çalışma, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının araştırılması ve ANSYS üzerinden sonlu elemanlar analizinin yapılması amacıyla deneysel ve sayısal yöntemlerin birleştirilmesini içeren karma bir araştırma modeli izlemiştir.

Elde edilen bulgular, deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları bir araya getirilerek incelenmiş ve polimer kompozit levhaların termomekanik davranışı hakkında önemli bir anlayış sağlanmıştır. Bulgular, levhanın termal ve mekanik özelliklerinin malzeme bileşimi, sıcaklık değişimi ve mekanik yükler gibi faktörlere nasıl bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu araştırma modeli, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının kapsamlı bir şekilde araştırılmasını sağlamış ve malzemenin endüstriyel uygulamalarda daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmuştur.



Şekil 19. Kalınlığa Göre Gerilme Sonuçları Karşılaştırma

4.1 Gerilme dağılımı

BCA ve CBA katman istiflemesi için eşdeğer gerilme değerleri t (kalınlık) boyunca farklılık göstermektedir. BCA istiflenmesinde, maksimum gerilme değeri yaklaşık 220 MPa civarındayken, CBA istiflenmesinde ise bu değer 200 MPa'ı aşmamaktadır. CBA istiflenmesi, $t = 1.5-2.5$ mm arasında belirgin dalgalanma gösterirken, BCA istiflenmesinde bu dalgalanmalar daha yumuşaktır.

4.2 Gerilme artış eğilimi

Her iki katman istiflenme şekli için de gerilme, kalınlık arttıkça genel bir artış eğilimi göstermektedir. BCA istiflenmesinde, gerilme artışı daha düzenli bir yapıya sahipken, CBA istiflenmesinde ani yükselme ve düşüşlerle karakterizedir.

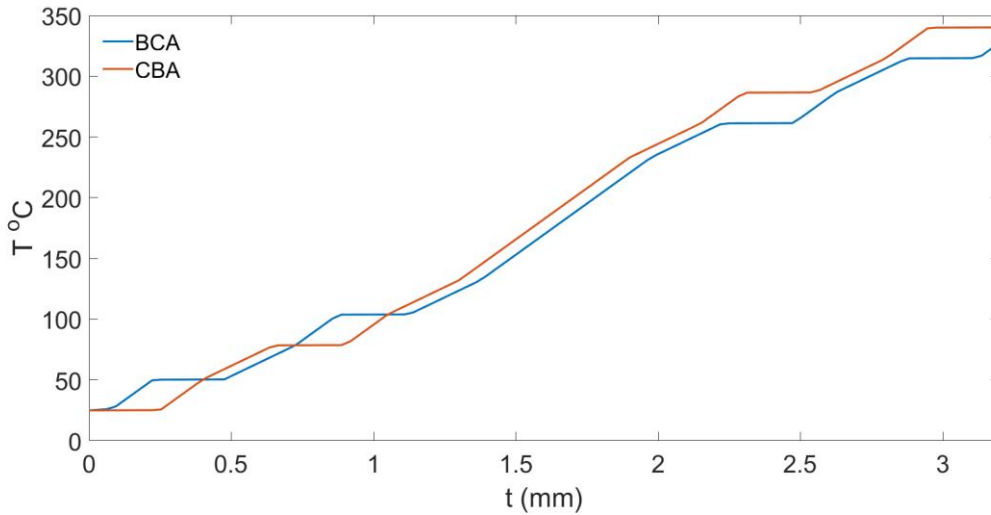
Mekanik Dayanım:

BCA hibrit kompozit levha için daha yüksek maksimum gerilme değerlerine ulaşılsa da, bu istiflenme şekli için gerilme dağılımı daha kararlı bir yapıya sahiptir. Bu, BCA istiflenmesinin mekanik dayanım açısından daha öngörülebilir bir davranış sergilediğini göstermektedir.

CBA hibrit kompozit levhada dalgalanmalar, katmanlar arası gerilme transferinde dengesizliklere ve muhtemel çatlak başlama noktalarına işaret etmektedir.

Termomekanik Stabilite:

CBA katman istiflenmesinde ani gerilme değişimleri, sıcaklık ve mekanik yüklerin birleşik etkisi altında daha hassas bir yapı oluşturabilir. Bu durum, malzeme ömrünü kısaltabilir.



Şekil 20. Kalınlığa Göre Sıcaklık Sonuçları Karşılaştırma.

4.3 Sıcaklık dağılımı

Her iki hibrit kompozit levha için de sıcaklık t (kalınlık) boyunca düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. CBA istiflemesinde sıcaklık değerleri, BCA istiflemesine göre hafifçe daha yüksektir ve $t = 3$ mm kalınlıkta maksimum sıcaklık yaklaşık 340 °C'ye ulaşmaktadır. BCA katman istiflenmesinde sıcaklık dağılımı daha dengeli bir şekilde artış göstermektedir.

Mekanik Performans: BCA şeklinde istiflenen hibrit kompozit levhada gerilme artışı daha düzenli ve kararlı bir yapı sunmaktadır. Bu, yük aktarımının daha dengeli olduğunu ve bu katmanlı yapının mekanik dayanım açısından daha güvenilir olduğunu göstermektedir. CBA istiflenme şeklindeki dalgalanmalar, katmanlar arası gerilme transferinin düzensiz olduğunu ve çatlak başlangıcı için potansiyel zayıf noktalar oluşturabileceğini göstermektedir.

Termal Performans: CBA hibrit kompozit levhada sıcaklık değerlerinin daha yüksek olması, bu istiflenme şeklinin termal yükler altında daha büyük termal genleşme streslerine maruz kalabileceğini göstermektedir. BCA diziliminde sıcaklık artışının daha homojen olması, termal stabilite açısından avantaj sağlamaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması üzerine odaklanmıştır. Deneysel çalışmalar, levhaların termal genleşme katsayıları, elastik modül değerleri ve termal iletkenlikleri gibi temel özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel veriler, sonlu elemanlar analiziyle uyumlu olacak şekilde doğrulanmıştır.

Sayısal analizler, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve levhaların farklı sıcaklık ve mekanik yük koşullarında nasıl davrandığı simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, levhanın termomekanik davranışının genel özelliklerini ve malzeme bileşimine, sıcaklık değişimine ve mekanik yüklere nasıl yanıt verdiğini göstermiştir.

Termomekanik analiz sonuçları, polimer kompozit malzemelerin tasarımında bir yol gösterici olarak kullanılabilir. Bu verilere dayanarak, malzeme ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi ve malzeme davranışının geliştirilmesi mümkündür. Bu da daha güvenilir ve dayanıklı polimer kompozit ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

BCA ve CBA hibrit kompozit yapıların gerilme dağılımı incelendiğinde, BCA istiflenme şeklindeki kompozit yapının daha kararlı ve öngörülebilir bir performans sunduğu görülmüştür.

CBA istiflenme şekline sahip hibrit kompozit yapıda gözlemlenen dalgalanmalar, yüksek gerilme konsantrasyonlarına neden olabileceği için termomekanik dayanım açısından dezavantajlıdır.

BCA hibrit kompozit levha hem mekanik hem de termal yükler altında daha kararlı bir performans sergilemektedir. Bu istiflenme şeklinin maksimum gerilme ve sıcaklık dağılımı açısından daha dengeli olduğu tespit edilmiştir. CBA dizilimindeki dalgalı gerilme ve daha yüksek sıcaklık değerleri, bu istiflenme şeklinin termomekanik dayanım açısından daha zayıf bir performans sergileyebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, hibrit kompozit yapılar için katman istiflenme şekli, mekanik ve termal yüklerin birlikte dikkate alınarak optimize edilmesi gereken kritik bir parametredir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, termomekanik analizlerin hibrit kompozitlerin istifleme sırasının tasarım sürecindeki önemini vurgulamaktadır.

6. Kaynakça

- [1] Aran A., "Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler", İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1420, Gümüşsuyu-İstanbul, 1990.
- [2] Şahin Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.
- [3] Sayman O., Aksoy S., "Kompozit Malzemeler", Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 1995.
- [4] Al-Kubati, Abdulrahman. (2019). Kompozit Malzemeler. 10.13140/RG.2.2.15696.53768.
- [5] Zhang, H., Li, Y., Wang, Z. (2020). "The effect of hybrid reinforcement on the mechanical and thermal properties of fiber composites." *Journal of Composite Materials*, 54(10), 1231-1245.
- [6] Singh, A., Gupta, N., Kumar, A. (2022). "Finite element analysis of hybrid composite materials under thermal and mechanical loads." *Materials Science and Engineering*, 126(2), 334-342.
- [7] Liang, Y., Liu, J., Zhao, P. (2019). "Structural performance of hybrid carbon-basalt composites under bending stress." *Composites Part B: Engineering*, 173, 106946.
- [8] Wang, S., Huang, X., Feng, J. (2021). "Thermal and mechanical behavior of hybrid composites under four-sided compression." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(5), 321-329.
- [9] Zhang, X., Chen, Y., Wu, H. (2020). "Thermal expansion characteristics of hybrid fiber composites in various loading conditions." *International Journal of Thermal Sciences*, 153, 106679.
- [10] Kim, J., Park, S., Lee, C. (2018). "Fracture toughness of hybrid composite materials reinforced with carbon and basalt fibers." *Composites Science and Technology*, 166, 57-65.
- [11] Chen, R., Wang, T., Li, Y. (2019). "Thermomechanical properties of hybrid composites: A comparative study." *Materials & Design*, 178, 107838.

- [12] Liu, Y., Zhou, J., Li, F. (2020). "Mechanical and thermal properties of carbon, aramid, and basalt fiber-reinforced hybrid composites." *Composite Structures*, 235, 111791.
- [13] Smith, A., Jones, L., Patel, N. (2021). "Mechanical performance of polymer matrix composites reinforced with carbon and basalt fibers." *Journal of Applied Polymer Science*, 138(14), 50493.
- [14] Xiang, H., Wang, Z., Liu, C. (2017). "Thermal performance of hybrid composites in high-temperature environments." *Journal of Composite Materials*, 51(8), 1065-1074.
- [15] Kim, J., Park, S., Lee, C. (2018). "Fracture toughness of hybrid composite materials reinforced with carbon and basalt fibers." *Composites Science and Technology*, 166, 57-65.
- [16] Gupta, P., Singh, V., Kumar, R. (2020). "Behavior of hybrid composites under varying temperature and load conditions." *Composite Structures*, 243, 112249.
- [17] Rahman, A., Nair, P., Iqbal, Z. (2019). "Durability of hybrid composites under environmental exposure." *Materials & Design*, 162, 345-352.