



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**PA6 MATRİSLİ, SÜREKLİ KARBON ELYAFLI MALZEMENİN MEKANİK
MALZEME KARTININ OLUŞTURULMASI VE PARÇA BAZINDA
DOĞRULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİNAN ZIVALI

DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM

**YALOVA
TEMMUZ 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

PA6 MATRİSLİ, SÜREKLİ KARBON ELYAFLI MALZEMENİN MEKANİK MALZEME
KARTININ OLUŞTURULMASI VE PARÇA BAZINDA DOĞRULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİNAN ZIVALI
238113005

DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM

YALOVA
TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “**PA6 MATRİSLİ, SÜREKLİ KARBON ELYAFLI MALZEMENİN MEKANİK MALZEME KARTININ OLUŞTURULMASI VE PARÇA BAZINDA DOĞRULANMASI**” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Sinan ZIVALI



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince akademik gelişimime değerli katkılar sunan, her zaman yol gösterici olan ve kıymetli bilgi ile tecrübeleriyle beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim Sevim'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Her koşulda yanımda olan, manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışmasının fikir aşamasından tamamlanmasına kadar geçen süreçte bilgi, tecrübe ve zamanını büyük bir cömertlikle paylaşan Plascam A.Ş. Ürün Geliştirme Şefi Sayın Faruk Yıldız'a ve Ar-Ge Şefi Sayın Emine Baş Çep'e değerli katkılarından dolayı içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine olanak sağlayan ve sürecin her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Plascam A.Ş. yönetimine ve değerli ekibine de şükranlarımı sunarım.

Temmuz – 2025

Sinan ZIVALI

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN.....	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
3. GENEL BİLGİLER.....	10
3.1. Parça ve Malzemesi.....	10
3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri	12
3.2.1. Kompozit tabaka düzlemi	13
3.2.2. Yoğunluk.....	14
3.2.3. Elastisite modülü	16
3.2.4. Kayma (kesme) modülü.....	16
3.2.5. Poisson oranı	17
3.2.6. Gerilmeler.....	17
3.2.6.1. Çekme gerilmesi	17
3.2.6.2. Basma gerilmesi.....	18
3.2.6.3. Kayma (kesme) gerilmesi.....	18
3.2.7. Gerinimler	18
3.2.7.1. Çekme birim uzaması.....	19
3.2.7.2. Basma birim uzaması	19
3.2.7.3. Kayma (kesme) birim uzaması	20
4. MALZEME VE YÖNTEM	21
4.1. Referans Alınan Test Standardı	21
4.2. Karbon Elyaf Yönelimleri	20
4.3. Testler.....	21
4.3.1. Çekme testi (ASTM D3039)	21
4.3.1.1. Test yöntemi	21
4.3.1.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler.....	22
4.3.1.3. Gerekli cihazlar.....	23

4.3.2. Basma testi (ASTM D3410).....	23
4.3.2.1. Test yöntemi	23
4.3.2.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler.....	23
4.3.2.3. Gerekli cihazlar.....	24
4.3.1. Kayma (kesme) testi (ASTM D5379).....	24
4.3.3.1. Test yöntemi	24
4.3.3.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler.....	24
4.3.3.3. Gerekli cihazlar.....	25
4.4. Numuneler	26
4.4.1. Numune ölçüleri	28
4.4.2. Gerinim ölçerler (strain gauge ve ekstansometre).....	30
4.5. Kullanılan CAE Yazılımları	31
4.5.1. CATIA V5 ve kullanımı	31
4.5.2. ANSYS ve kullanımı	31
4.5.2.1. ANSYS ACP ve kullanımı	33
4.5.3. LS-DYNA ve kullanımı.....	38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	41
5.1. Mekanik Testler	41
5.1.1. Çekme testleri.....	41
5.1.2. Basma testleri	46
5.1.3. Kayma (kesme) testleri	48
5.2. Simülasyonlar (Analizler).....	51
5.2.1. MAT_054 malzeme kartı terimleri.....	51
5.2.2. Çekme analizleri.....	53
5.2.2.1. Çekme 0° yönü analizi.....	53
5.2.2.2. Çekme 90° yönü analizi.....	54
5.2.3. Basma analizleri	56
5.2.3.1. Basma 0° yönü analizi	56
5.2.3.2. Basma 90° yönü analizi	57
5.2.4. Kayma (kesme) analizi	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
6.1. Sonuçlar.....	62
6.2. Öneriler.....	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	69

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

E	: Elastic modulus (elastisite modülü)
G	: Shear modulus (kayma modülü)
ν	: Poisson ratio (poisson oranı)
gr	: Gram
m_1	: Numunenin havadaki ağırlığı
m_2	: Numunenin daldırma sıvısındaki ağırlığı
S	: Daldırma sıvısının yoğunluğu
C	: Daldırma sıvısının sıcaklığı
D_{kompozit}	: Kompozitin reçinesiz yoğunluğu
$D_{\text{reçine}}$	: Reçinenin yoğunluğu
D	: Parça veya numune yoğunluğu
σ	: Gerilme
ϵ	: Çekme uzaması
ΔL	: Boydaki değişim
L_0	: İlk boy
γ	: Shear strain (kayma uzaması)
Δx	: Şekil değişimi
h	: İlk uzunluk
0°	: Kuvvete paralel elyaf yönü
90°	: Kuvvete dik elyaf yönü
$\pm 45^\circ$	: Kuvvete 45° açılı elyaf yönü

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAE	: Computer-Aided Engineering
CAD	: Computer-Aided Design
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
FEA	: Finite Element Analysis
FEM	: Finite Element Method
FRP	: Fiber Reinforced Polymer
MAT	: Material
PA6	: Polyamide 6
PC	: Polycarbonate
PLA	: Polylactic Acid
PP	: Polypropylene
SACMA	: Supplier of Advanced Composite Materials Association
TFP	: Tailored Fiber Placement

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Mekanik özellikler ve yapılması gereken testler	13
Tablo 3.2. Yoğunluk testinde sembol, birim açıklama tablosu.....	15
Tablo 3.3. Numune yoğunluk test sonuçları	15
Tablo 3.4. Reçinesiz kompozitin yoğunluk tayini.....	15
Tablo 3.5. Reçine yoğunluk tayini	15
Tablo 4.1. Numune ölçüleri	28



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin yapısı.....	2
Şekil 3.1. Kronolojik çalışma metodu	11
Şekil 3.2. Tunnel bracket parçasının araç üzerindeki konumu	12
Şekil 3.3. Parçanın çelik ve kompozit yapısının teknik olarak karşılaştırması.....	12
Şekil 3.4. Tek yönlü ve sürekli elyaf takviyeli bir tabaka	14
Şekil 3.5. Tabaka düzleminde eksenel gösterim	14
Şekil 4.1. 0^0 , 90^0 , $\pm 45^0$ karbon elyaf yönelimlerinin katmanlar üzerinde gösterimi	22
Şekil 4.2. TFP yöntemi ile üretim	26
Şekil 4.3. Enjeksiyon kalıbında kompozit plaka baskısı ve üretimi.....	26
Şekil 4.4. Kompozit plakası ve su jetiyle plakalardan numunelerin kesilmesi.....	27
Şekil 4.5. Kesilen numunelerin ölçümsel kontrolü	27
Şekil 4.6. Plakadan numune kesilmesi temsili.....	27
Şekil 4.7. Çekme test düzeneği	28
Şekil 4.8. V-Notch test düzeneği, kayma numunesinin teknik resmi.....	29
Şekil 4.9. Çekme numuneleri CAD görseli (yüzey).....	29
Şekil 4.10. Basma numuneleri CAD görseli (yüzey)	30
Şekil 4.11. Kayma numunesi CAD görseli (yüzey)	30
Şekil 4.12. Solda strain gauge ve sağda ekstansometre yerleşimi	31
Şekil 4.13. ANSYS içinde malzeme tanımlama ve özellik girdisi.....	32
Şekil 4.14. ANSYS içinde numunenin mesh hali	32
Şekil 4.15. ANSYS kronolojik çalışma sayfası	33
Şekil 4.16. ACP modellemede ürün ağacı	34
Şekil 4.17. Fabric ve stuckup özelliklerini tanımlama	34
Şekil 4.18. Rosette tanımlama.....	35
Şekil 4.19. Oriented selection set tanımlama.....	36
Şekil 4.20. Modeling groups görünümü	36
Şekil 4.21. Modelin fly fiber yönlü görünüm (90^0 yönü).....	37
Şekil 4.22. Çekme 0^0 yönü numune sınır şartı ve yüklenmesi.....	38
Şekil 4.23. LS-DYNA içi pencerelerin görünümü.....	38
Şekil 4.24. LS-DYNA içinde MAT_054 ayarı	39
Şekil 5.1. 0^0 yönü çekme numunelerinin mekanik test sonuçları	42
Şekil 5.2. 0^0 yönü çekme numunelerinin test öncesi ve sonrası	43
Şekil 5.3. 90^0 yönü çekme numunelerinin mekanik test sonuçları	44
Şekil 5.4. 90^0 yönü çekme numunelerinin test öncesi	45

Şekil 5.5. 90 ⁰ yönü çekme numunelerinin test sonrası	45
Şekil 5.6. 0 ⁰ yönü basma numunelerinin mekanik test sonuçları	46
Şekil 5.7. 90 ⁰ yönü basma numunelerinin mekanik test sonuçları	47
Şekil 5.8. Kayma numunelerinin mekanik test sonuçları	49
Şekil 5.9. Kayma numunelerinin test öncesi görseli	50
Şekil 5.10. Kayma numunelerinin test sonrası görseli	50
Şekil 5.11. MAT_054 malzeme kartı girdileri	52
Şekil 5.12. Çekme 0 ⁰ yönü simülasyon sonucu gerilme görseli	53
Şekil 5.13. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (çekme 0) ...	54
Şekil 5.14. Çekme 90 ⁰ yönü simülasyon sonucu gerilme görseli	55
Şekil 5.15. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (çekme 90) .	55
Şekil 5.16. Basma 0 ⁰ yönü simülasyon sonucu gerilme görseli.....	56
Şekil 5.17. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (basma 0) ...	57
Şekil 5.18. Basma 90 ⁰ yönü simülasyon sonucu gerilme görseli.....	58
Şekil 5.19. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (basma 90) .	59
Şekil 5.20. Kayma testi simülasyon sonucu gerilme görseli	60
Şekil 5.21. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (kayma).....	60

PA6 MATRİSLİ, SÜREKLİ KARBON ELYAFLI MALZEMENİN MEKANİK MALZEME KARTININ OLUŞTURULMASI VE PARÇA BAZINDA DOĞRULANMASI

ÖZET

Bu tez çalışması, PA6 matrisli ve sürekli karbon elyaf takviyeli kompozit bir parçanın mekanik davranışlarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemeyi amaçlamaktadır. Günümüzde plastik ve kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalardaki önemi her geçen gün artarken, özellikle otomotiv sektöründe yapısal performansı yüksek ve hafif parçaların üretimi öncelik kazanmıştır. Bu bağlamda, patentli bir ürün olan “tunnel bracket” parçası baz alınarak, ilgili kompozit malzemenin mekanik özellikleri ASTM standartlarına uygun testlerle belirlenmiş, ardından bu sonuçlar LS-DYNA ortamında oluşturulan sayısal modeller ile doğrulanmıştır. Elyaf yöneliminin, çekme, basma ve kayma davranışlarına olan etkisi detaylı şekilde analiz edilmiş, elde edilen verilerle bir mekanik malzeme kartı yapılandırılmıştır. Çalışma, malzeme davranışını test verileriyle destekleyen ve sonlu elemanlar analizi yoluyla sayısal ortamda simüle eden özgün bir yaklaşım sunmakta, mühendislik uygulamaları için yol gösterici nitelikte bir kaynak oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzeme, Karbon Elyaf Takviyesi, PA6 Matris, Mekanik Testler, Sayısal Analiz

CREATION OF MECHANICAL MATERIAL CARD AND PART-LEVEL VALIDATION FOR PA6 MATRIX, CONTINUOUS CARBON FIBER-REINFORCED MATERIAL

ABSTRACT

This thesis aims to investigate the mechanical behavior of a composite part reinforced with continuous carbon fiber and a PA6 matrix using both experimental and numerical methods. As the importance of plastic and composite materials in industrial applications continues to grow, especially in the automotive sector, the demand for lightweight components with high structural performance has become a priority. In this context, a patented component known as the "tunnel bracket" was selected as the reference part, and its composite material was experimentally characterized through standardized mechanical tests in accordance with ASTM methods. The obtained data were then validated through numerical simulations performed in the LS-DYNA environment. The influence of fiber orientation on tensile, compressive, and shear behavior was thoroughly analyzed, and a material card was developed based on the mechanical results. This study presents a unique approach that combines experimental testing with finite element analysis, offering a practical reference for engineering applications and composite part design.

Keywords: Composite Material, Carbon Fiber Reinforcement, PA6 Matrix, Mechanical Testing, Mekanik Testler, Numerical Analysis

1. GİRİŞ

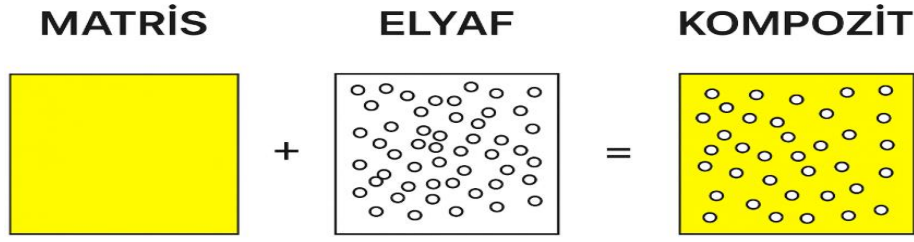
Plastik malzemeler, çoğu sektörde yaygın olarak kullanılmakta olup; sürekli gelişen teknolojileri, düşük maliyetli ham maddeleri ve güvenilir üretim süreçleri sayesinde endüstrilerde vazgeçilmez hale gelmiştir. Ham madde çeşitliliği ve üretim teknolojilerindeki inovasyonlar sayesinde plastikler, metaller kadar dayanıklı ve üretilebilir duruma ulaşmıştır.

Plastiğin dünya genelinde en yaygın kullanım alanları; ambalaj, otomotiv, elektronik, beyaz eşya, medikal, inşaat ve yapı sektörleridir. Hiç şüphesiz, plastiğin sürekli gelişmesinin ve vazgeçilmez olmasının ana sebebi, bu öncü sektörlerle sağladığı katkılardır.

Malzeme özelliklerini iyileştirmek ve kullanım alanlarını genişletmek amacıyla, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle kompozit adı verilen yeni bileşimler oluşturulmaktadır. Plastik de farklı bileşimler yaparak çok sayıda kompozit malzeme üretimini mümkün kılmaktadır.

Kompozit malzemeler, matriks fazı ve takviye fazı olmak üzere çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Kompozit malzemelerin üretiminde termoset polimerler, termoplastik polimerler gibi birçok matriks fazı kullanılabilirken, takviye fazı olarak da karbon elyaf, aramid elyaf veya cam elyaf gibi birçok takviye fazı kullanılabilir. Yapısal dayanıma en çok ihtiyaç duyulan sektörler olan otomotiv ve havacılıkta, genellikle termoset polimer esaslı kompozit malzemeler tercih edilmektedir [1].

Bu tezde polimer matris kompozitler üzerine, detaylı bir çalışma yapılmıştır. Polimer matris kompozitler; matris olarak bir polimer reçineyi, takviye olarak ise elyaflar (fiberler) ve/veya diğer takviye malzemelerini içeren kompozitlerdir. Tez kapsamında, poliamid 6 (PA6) matrisli ve sürekli karbon elyaf takviyeli bir kompozitin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada ele alınan, patentli bir parça olan “tunnel bracket” bileşeninin ham maddesini oluşturan malzemeler; PA6 olarak adlandırılan termoplastik, reçine ve karbon elyaf matrisidir. Şekil 1.1’de, bir kompozitin ana bileşenlerini oluşturan elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin yapısı [2]

Şirketler, maliyetleri azaltmak, malzeme özelliklerini iyileştirmek ve üretim süreçlerini hızlandırmak amacıyla çeşitli kompozit denemeleri yapmakta ve yenilikçi çalışmalar sürdürmektedir. Ancak, bu yeni malzemenin yapısı ve özellikleri hakkında yeterli bilgi birikimi veya teknik verilere sahip değildirler. Daha önce yapılan çalışmalarda, termoplastik polimer olan (PLA, ABS vb.) sürekli karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit eklemeli imalat işlemi başarılı şekilde uygulanmıştır [3]. Bu tez çalışmasında ise, PA6 matrisli ve karbon elyaf takviyeli yeni parçanın mekanik özellikleri hem deneysel testlerle hem de simülasyon yöntemleriyle analiz edilerek teknik bir sonuca ulaşılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın sonuçlanmasıyla, plastik kompozitler üzerinde çalışmalar yapan ve yeni ürünler elde etmeye çabalayan birçok şirket veya proje, kendilerine rehberlik edecek teknik çalışma adımlarını görebilecektir. Yarattıkları veya yaratmaya çalıştıkları yeni malzemenin sahip olduğu mekanik özellikleri nedir, mekanik davranışları nasıldır, mekanik bir teste veya teknik bir analize sokulduğunda ne sonuçlar verebilir, hatta çalışma detaylandırıldığında, mekanik malzeme kartının nasıl oluştuğu ve doğrulandığı sorularının cevabını adım adım takip edebileceklerdir.

Diğer çalışmalardan farklı olan yanlarından bahsetmek gerekirse çalışma, birçok teste tabii tutulup, bilgisayar destekli mühendislik programlarında (CAE), sonlu elemanlar metoduyla (FEM) sonlu elemanlar analizi (FEA) uygulayarak yetkin bir şekilde karşılaştırma yapabilme imkanındır. Diğer önemli bir fark ise parça tasarım çalışması, plastik malzeme denemeleri, parça üretilebilirliğini deneyebilme ve mekanik testler için gerekli numunelerin hepsini çeşitli standartlarda sağlayabilme gibi pozitif etkenler sayesinde çok geniş ve güvenilir adımlarla ilerleyen bir çalışma olmasıdır.

Bu teknik çalışma; özgün tasarıma ve patentli bir kompozit plastik parçaya dayanan, bu parçadan üretilen test plakalarından numune hazırlanması, teknik adımların sistematik biçimde

yürütülmesi ve sonuçların sektörel deneyim ile mühendislik bilgisi ışığında değerlendirilmesini içeren bütüncül ve nitelikli bir süreçtir.

Aynı zamanda, farklı malzemeler üzerinde çalışması yapılan veya farklı adımlarla sonuca ulaşmaya çalışan diğer akademik çalışmalara, kronolojik adımlarının incelenmesiyle yol gösterip katkıda bulunacaktır. Kompozit mekaniği üzerine yapılan çalışmalarda, malzeme kartı oluşturulması ve parça bazında doğrulanması gibi adımların genellikle yer almadığı görülmektedir. Çalışmanın ulaştığı sınırlar düşünüldüğünde kompozit mekaniğine dair kapsamlı bir teknik doküman sunmasının yanında simülasyonlarla CAE programlarında FEA tekniğinin kullanılıp sonuçlara ulaşması ve incelenmesi gerçeğidir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde polimer matrisli ve elyaf takviyeli kompozitler üzerine yapılan çalışmaların incelenmesine yer verilmiştir. Yapılan bu çalışmalar hangi yöntemlerle ilerlemiş ve hangi sonuçlara ulaşmış, detaylı bir şekilde incelenmiştir. Fakat elde edilen veya üretilen yeni kompozitin malzeme kartının değerlendirilmesi, parça bazında doğrulanması ve incelenmesi ile ilgili yeterli kaynak veya çalışmaya rastlanmamıştır.

Joyce, çalışmasında kompozit malzemelerin mekanik testlerini ele almıştır. İçeriğinde, Mil-Hdbk-17 standardına göre kabul edilen testler, ASTM ve SACMA test metotları gibi standartlar detaylandırılmıştır. Havacılık ve ileri mühendislik uygulamalarında kompozit malzemelerin değerlendirilmesi için önemli bir kaynak niteliğindedir [4].

Şentürk, tez çalışmasında kısa cam elyaf ve kalsit dolgulu polipropilen hibrit kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemektedir. Çalışmada, farklı oranlarda polipropilen (PP), kalsit ve kısa cam elyafı içeren hibrit kompozit malzemeler hazırlanmış ve bunların yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak test edilmiştir [5].

Motavalli, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemelerinin test yöntemleri üzerine odaklanmıştır. Çalışmasında, kompozit malzemelerin mekanik, elektriksel, termal ve kimyasal özelliklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesi için kullanılan standart test prosedürleri açıklanmaktadır. ASTM ve ISO gibi uluslararası standartlar temel alınarak farklı seviyelerde (fiber, lamina, laminat ve tam kesit) yapılan testler ele alınmıştır. Statik ve dinamik test yöntemleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Statik testler kapsamında çekme, kayma, bükülme ve basma testleri gibi temel mekanik testler bulunurken, dinamik testler ile malzemelerin rezonans frekansları, sönümlenme özellikleri ve elastik parametreleri belirlenmiştir [6].

Helbig, çalışmasında iç mekân parçalarının malzeme karakterizasyonu üzerine odaklanmaktadır ve özellikle dinamik ve statik mekanik testler yoluyla malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, üç nokta eğme testleri, çekme testleri, basma testleri ve yorulma testleri gibi deneysel yöntemler kullanılmıştır. Testler sırasında, farklı malzemelerin gerilme-altında nasıl davrandığı, kopma mekanizmaları ve katmanlı kompozitlerin deformasyon özellikleri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve polikarbonat (PC) tabakalarının mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve gerilme oranı bağımlılığı incelenmiştir. Ayrıca, test sonuçlarının sayısal

simülasyonlarla karşılaştırılması yapılmış, elastik-viskoplastik malzeme modelleri kullanılarak deformasyon davranışı modellenmiştir. Sonuçlar, malzeme kalınlığı, yükleme hızı ve tabaka yöneliminin mekanik performans üzerindeki etkilerini göstermektedir [7].

Wilson, çalışmasında fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin (Fibre Reinforced Thermoplastic Composites- FRTC) mühendislik uygulamalarındaki önemini ve otomotiv sektöründeki kullanımını ele almaktadır. Çalışmasının sonunda varılan sonuçlardan anlaşılacağı üzere kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli elyaflar ve hafif matrislerin birleşimiyle oluşturularak yüksek özgül mekanik özellikler sunar. Elyafın uzunluğu, malzemesi, yapısı ve matris polimerinin doğru seçimi ile geniş bir mühendislik malzemesi yelpazesi üretmek mümkündür. Bu malzemeler, enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa fiber takviyeli termoplastiklerden, hassas mühendislik gerektiren uzun fiber yönlendirilmiş kompozitlere kadar değişen geniş bir uygulama alanına sahiptir [8].

Carlsson, Adams ve Pipes yazarlarının ortak makalesinde ise polimer matrisli kompozit malzemeler üzerine odaklanmakta ve özellikle sürekli fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Havacılık, uzay, yarış arabaları ve spor ekipmanları gibi ileri mühendislik uygulamalarında kullanılan bu malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunan unidirectional (tek yönlü) veya dokuma kumaş şeklinde düzenlenmiş fiber katmanlardan (ply) oluşur. Çalışma, bu tür kompozitlerin sertlik ve mukavemet özelliklerini belirlemek için kullanılan test yöntemlerini ele almaktadır [9].

Appelsved, detaylı çalışmasında yük taşıyan termoplastik bileşenlerin özellikle otomotiv endüstrisinde artan kullanımı nedeniyle, PA 6/66 reçinesinin (poliamid 6/66) mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada hem cam elyaf takviyeli hem de takviyesiz poliamid malzemelerin fiber yönelimi, boşaltma sonrası artık gerinimler ve çekme-basma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak LS-DYNA yazılımında sonlu eleman analizleri (FEA) gerçekleştirilmiştir [10].

Arriaga vd. termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak ve bu özellikleri sonlu elemanlar analizi (FEA) ile doğru bir şekilde modellemek için yapılan deneysel ve sayısal analizleri ele almıştır. Çalışmada, özellikle iki tip termoplastik malzeme incelenmiştir: Borealis'ten PP (polipropilen) BE677AI ve Bayer'den PC/ABS (polikarbonat/akrilonitril-bütadien-stiren) T45. Gerçekleştirilen testler arasında üç nokta eğme testi ve yarı küresel darbeli plak penetrasyon testi bulunuyor. Bu testlerin sonuçları, ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, deneysel olarak elde edilen verilerle FEA

simülasyonları arasındaki korelasyon düzeyini incelemektir. Bunun için, gerilme-gerinim dönüşüm yöntemleri, farklı malzeme modelleme teknikleri (elastik-plastik davranış ve izotropik pekleşme), Poisson oranının değişimi, sürtünme katsayısının etkisi gibi faktörler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, doğru malzeme verileri girildiğinde ve uygun sürtünme katsayıları seçildiğinde, FEA analizlerinin deneysel sonuçlarla büyük oranda örtüştüğünü göstermektedir. Bu çalışma, mühendislik uygulamalarında termoplastik bileşenlerin simülasyon doğruluğunu artırmak için önemli bilgiler sunmaktadır [11].

Hufenbach, Schirner ve Andrich'in çalışması, tekstil takviyeli kompozit malzemelerin iç (intralaminar) ve katmanlar arası (interlaminar) kayma davranışlarını incelemektedir. Özellikle V-notched rail shear test yöntemi kullanılarak, bu malzemelerin kayma modülleri ve kayma dayanımları belirlenmiştir. Çalışma, karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) mekanik özelliklerini daha iyi anlamak ve bu özellikleri güvenilir bir şekilde karakterize etmek için test yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Araştırmada, standart V-notched rail shear testi ile modifiye edilmiş bir test düzeneği kullanılarak iç ve katmanlar arası kayma özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, optik ölçüm sistemleri ile geleneksel strain gauge ölçüm teknikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optik ölçüm sisteminin geniş desenli tekstil takviyeli kompozitler için daha uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen kayma deformasyon sonuçları, sonlu elemanlar analizi (FEA) ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır [12].

Shimadzu Corporation, karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) analiz, test ve denetim süreçlerine yönelik çok yönlü değerlendirme yöntemlerini ele almıştır. CFRP malzemelerinin performansını ve güvenilirliğini artırmak amacıyla farklı test yöntemleri ve analiz teknikleri çalışılmış, CFRP malzemelerinin başarısızlık mekanizmaları detaylı olarak incelenmiş ve çatı çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf yönelimi gibi iç yapıya bağlı kusurların tespit edilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, havacılık, otomotiv ve spor malzemeleri gibi sektörlerde kullanılan CFRP bileşenlerinin daha verimli tasarlanabilmesi için test süreçlerinin nasıl iyileştirilebileceğine dair önemli veriler sunmaktadır. Özellikle, ASTM ve JIS gibi uluslararası test standartlarına uygun test prosedürleri tanıtılarak, malzeme performansının değerlendirilmesine yönelik en iyi uygulamalar ele alınmıştır [13].

Kaddour, Hinton, Smith ve Li ortak çalışmalarında Hasar Egzersizi (WWFE-III) kapsamında kompozit laminatların mekanik özelliklerini, hasar oluşumunu ve başarısızlık kriterlerini değerlendirmek için kullanılan test vakalarını ele almaktadır. Çalışmada, 13 farklı test vakası belirlenmiş ve bu vakalar için elastik sabitler, maksimum gerinimler, dayanım değerleri ve doğrusal olmayan gerilme-gerinim eğrileri gibi giriş verileri sunulmuştur. Araştırmanın amacı,

dünya çapındaki önde gelen hasar tahmini yöntemlerini karşılaştırarak, matris çatlaması ve hasar ilerlemesiyle ilgili en doğru tahmin yöntemlerini belirlemektir [14].

Khaled vd. tamamladıkları çalışmada tek yönlü kompozit malzemelerin ortotropik plastiklik özelliklerini belirlemek amacıyla deneysel karakterizasyon yöntemlerini ele almıştır. Özellikle, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan T800/F3900 karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) malzemesi incelenmiştir. Çalışmada, 12 farklı gerilme-gerinim eğrisi ve diğer mekanik parametreler belirlenerek LS-DYNA yazılımında kullanılan yeni bir malzeme modeli oluşturulmuştur. Deneylerde çekme, basma ve kayma testleri gerçekleştirilmiş, ayrıca düşük hızlı darbe testleri ile elde edilen veriler, sonlu elemanlar analizi (FEA) ile doğrulanmıştır. Özellikle dog-bone şekilli numuneler, Iosipescu (V-Notch Shear) kayma testi ve değişik tabakalaşma yönelimleri gibi farklı test yöntemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, geleneksel test yöntemlerinin yanı sıra geliştirilmiş test tekniklerinin daha güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bu kapsamlı test prosedürleri, kompozit malzemelerin elastik, plastik ve hasar davranışlarını daha iyi modellemek için önemli bir temel oluşturmaktadır [15].

Fahrenheit, ileri kompozit malzemelerin test edilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Özellikle havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinde kullanılan uzun fiber takviyeli kompozitlerin mekanik testleri ele alınmıştır. Çalışmada, farklı test yöntemleri ve standartlar incelenerek, kompozit malzemelerin güvenilirliğini artırmaya yönelik en iyi uygulamalar açıklanmıştır. Test yöntemleri arasında çekme testleri, eğilme testleri, darbe dayanımı, yorulma testleri, sertlik ve sürünme testleri gibi çok çeşitli mekanik değerlendirmeler yer almaktadır. Ayrıca, çentikli numuneler, delikli ve dolu delikli çekme testleri, interlaminar kayma dayanımı testleri gibi özel test prosedürleri de ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan test ekipmanları arasında hidrolik sıkıştırma fiksürleri, çift eksenli ekstansometreler ve optik ölçüm sistemleri gibi yüksek hassasiyetli cihazlar bulunmaktadır. Araştırma, 150'den fazla uluslararası test standardına uygun olarak gerçekleştirilen bu testlerin, kompozit malzemelerin performansını belirlemede kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Ayrıca, test süreçlerinin otomasyonu ve verimliliği artırmaya yönelik yenilikçi çözümler sunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma, kompozit malzeme testlerinin endüstriyel seviyeye taşınması ve doğruluk ile tekrarlanabilirliğin artırılması için önemli bir rehber niteliğindedir [16].

Feraboli, Wade, Deleo, Rassaian, Higgins ve Byar, LS-DYNA MAT54 malzeme modeli kullanılarak kompozit malzemelerin eksenel ezilme davranışının simülasyonunu ele almaktadır. Çalışmanın temel amacı, MAT54 modelinin karbon fiber/epoksi (CFRP) prepreg bantlardan üretilmiş yarı dairesel sinüzoidal bir numunenin ezilme davranışını doğru şekilde

modelleyip modelleyemeyeceğini değerlendirmektir. Çalışmada, deneysel testlerden elde edilen sonuçlar ile MAT54 modelinin ürettiği sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, MAT54 modelinin deneysel verileri makul bir doğrulukla yansıtabilmesine rağmen, modelleme sürecinin tamamen öngörücü olmadığını ve parametrelerin deneme yanılma yöntemiyle ayarlanması gerektiğini göstermektedir [17].

Karlsson ve Gradin, kompozit malzemelerin çarpışma testlerinin LS-DYNA kullanılarak modellenmesi ve malzeme modellerinin doğrulanması üzerine odaklanmaktadır. Araştırma, hafif kompozit araçların çarpışma davranışlarının doğru şekilde modellenmesi için yeni fiziksel tabanlı bir malzeme modelinin geliştirilmesini ve değerlendirilmesini amaçlamaktadır [18].

Holt, LS-DYNA'da kullanılan MAT213 malzeme modelinin deneysel doğrulama testlerini özetlemektedir. T800-F3900 karbon fiber kompozit malzemesi üzerinde yapılan gerilme testleri, modelin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, yığılmış katmanlı (stacked-ply) gerilme ve basma testleri, açık delikli numuneler üzerinde gerilme ve basma testleri, çift konsollu giriş ve uçtan çentikli eğme testleri gerçekleştirilmiştir [19].

Yıldırım [20] yaptığı çalışmada kompozit malzemelerin yapısı, özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili geniş kapsamlı bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Dubey, K. Sahu ve Arjunan [21] ise çevre dostu olarak adlandırdıkları fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanım potansiyellerini detaylı bir şekilde araştırmıştır.

Memarzadeh, Onyibo, Asmael ve Safaei [22] yaptıkları çalışmada kompozit malzemelerin dinamik davranışlarını inceleyen teknik bir makale ortaya çıkarmışlardır. Katman açısı ve elyaf yönelimlerinin titreşim özellikleri üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Özsoy [23] ise polimer matrisli kompozitlerin mühendislik uygulamalarındaki önemini ve aynı zamanda epoksi bazlı kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir.

Gülmez [24] otomotiv sektöründe polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı, üretim yöntemlerini ve bu malzemelerin avantajlarını anlatmıştır. Pelin, Ştefan, Andronescu, Dinca, Ficai, Truşca [25] ise kompozit malzemelerin otomotivin yanı sıra havacılık sektöründeki uygulamalarını ve kullanımlarını da açıklamış, özellikle PA6 matrisli kompozitlerin potansiyellerini incelemişlerdir.

Taşkıran [26], karbon takviyeli PA6 polimer matrisli kompozitlerin geliştirilmesi ve bu kompozitlerin çeşitli mekanik, termal, fiziksel ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi konusunda bir çalışma yapmıştır. Liang, Xu, Wei, Song, Chen, Zhang [27] tamamladıkları

çalışmada PA6 ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi ve bu kompozitlerin mekanik, termal ve kristalleşme davranışlarının incelenmesinden bahsetmiştir.

1984 yılında, Walrath ve Adams [28] yaptıkları çalışmada kompozit malzemelerin kayma özelliklerini ölçmek için kullanılan çeşitli test yöntemlerini ele almıştır. Özellikler losipescu kayma test yöntemi, kompozitlerin kayma özelliklerini belirlemekte yıllardır kullanılmaktadır. Çalışmamızın içinde de bulunan V-Notch Shear testi diğer adıyla losipescu uygulanırken ve değerlendirilirken bu çalışmadan fayda görülmüştür.

Semerciöz, kompozitler üzerine yaptığı teknik çalışmasında sonuçları karşılaştırma metoduyla göstermiştir. Bu teknik çalışmada, bor takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerini incelemiş ve karbon fiber takviyeli kompozitlerle karşılaştırmasını yaparak mekanik ve termal özellik farklılıklarını anlatmıştır [29].

Tüm bu çalışmalar, kompozit mekaniği alanında, CAE desteğiyle ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) metodu ile çeşitli programlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toptaş ve Fındık [30] ise, elyaf takviyeli kompozitlerin kuvvetlere karşı gösterdiği direnci ANSYS programı üzerinden yürüttükleri çalışmalarla analiz ederek sonuçlara ulaşmıştır.

Yukarıdaki literatür taramasında da görüldüğü gibi PA6 matrisli, sürekli karbon elyafli parçanın/malzemenin mekanik davranışları, mekanik malzeme kartı hakkında bilgiler, hangi standartlar kullanılmalı ve hangi testler/analizler yapılmalı gibi çalışmaya dair henüz bir veri bulunmamaktadır. Birçoğu polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerini incelenmiş, farklı takviye katkılarıyla kıyaslamalar yapıp değerlendirmiş, kompozitlerin sektördeki önemi ve faydalarını anlatmıştır. Ama oluşturulan kompozitin mekanik davranışlarından, malzeme kartı bilgisinden ve nasıl elde edileceğinden bahsedilmemiştir. Aynı zamanda CAE tarafında teknik analizlerin ve mekanik testlerin simüle edilmesine pek rastlanmamıştır. Yaptığımız çalışmada ise bu eksikliklerin hepsi giderilmiş, çalışmalar kronolojik sırayla listelenmiş ve detaylı bir şekilde sonuçlandırılmıştır.

3. GENEL BİLGİLER

Tez çalışması yedi aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşama, yapılacak testlere karar verme ve testlerin araştırılmasıdır. Bu aşama, kompozit parçanın mekanik özelliklerini ve davranışını incelemek amacıyla; hangi standartlara göre, hangi testlerin ve nasıl yapılması gerektiğinin araştırıldığı kısımdır.

İkinci aşama, test numunelerinin oluşturulmasıdır. Belirlenen testler için, kompozit parçanın hammaddesinden plakalar üretilmekte ve bu plakalardan standartlara uygun numuneler kesilerek kontrol edilmektedir.

Üçüncü aşama, bu test numunelerinin fiziksel olarak test edilmesidir. Test çalışmaları, standartlara göre akredite edilmiş bir test merkezinde gerçekleştirilmekte ve sonuçlar raporlanmaktadır.

Dördüncü aşama, test sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanmasıdır. Mekanik testleri yapılan numunelere ait veriler topluca incelenmekte, ilgili literatür çalışmaları da dikkate alınarak sonuçlar yorumlanmaktadır. Bu aşamada grafikler ve numunelere ait ham veriler üzerinden değerlendirme yapılarak, bazı mekanik özellik değerleri tespit edilmektedir.

Beşinci ve altıncı aşamalar, uzun ve zahmetli bir deneme-yanılma süreci olan CAE ile testlerin modellenmesi aşamasıdır. Bu süreçte, çeşitli Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) çalışmaları yürütülmekte ve her bir test simüle edilerek, mekanik test sonuçlarına benzer çıktılar elde edilmeye çalışılmaktadır. Simülasyon sonuçları yeterli düzeyde benzeştiğinde, yazılıma girilen bu değerler malzeme kartının oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Yedinci ve son aşama, elde edilen verilerin doğrulanması ve final analizlerin yapılarak malzeme kartının beyan edilmesidir. Bu aşamada, kalın numune olarak ayrılan test çubuklarının mekanik test sonuçları simüle edilmekte ve CAE analizleriyle karşılaştırılarak doğrulama yapılmaktadır. Sonuçların tutarlı bulunması hâlinde doğruluk sağlanmış olur. Böylece, malzemenin mekanik davranışları incelenerek, özelliklerini ifade eden sayısal veriler oluşturulmuş olur.

Tezin kapsamı ve sonuca ulaşma yöntemi, aşağıdaki şema olan Şekil 3.1’de kronolojik olarak daha net bir şekilde gösterilmiştir.

1- Patentli kompozit parça

2- Parça malzemesinden kompozit plaka basılması (enjeksiyon makinesinde)

3- Kompozit plakalardan standartlara uygun numune kesilmesi (su jeti ile)

4- Test laboratuvarında numunelerin mekanik testleri (çekme, basma, kayma)

5- Mekanik testleri yorumlama ve değerlendirme

6- FEA metodu ile simülasyon (CAE)

7- Mekanik testlerin ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi

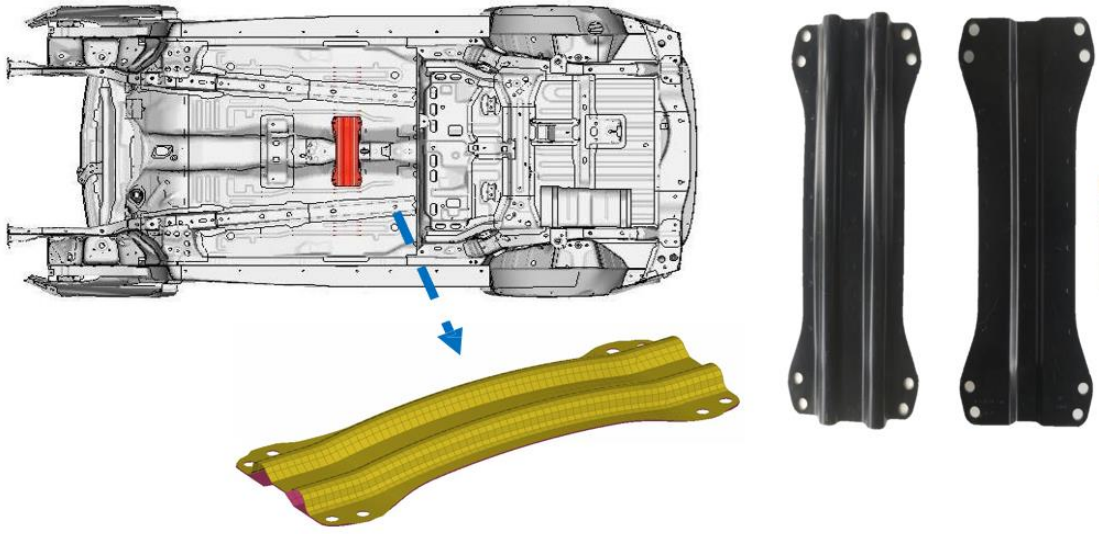
Şekil 3.1. Kronolojik çalışma metodu

3.1. Parça ve Malzemesi

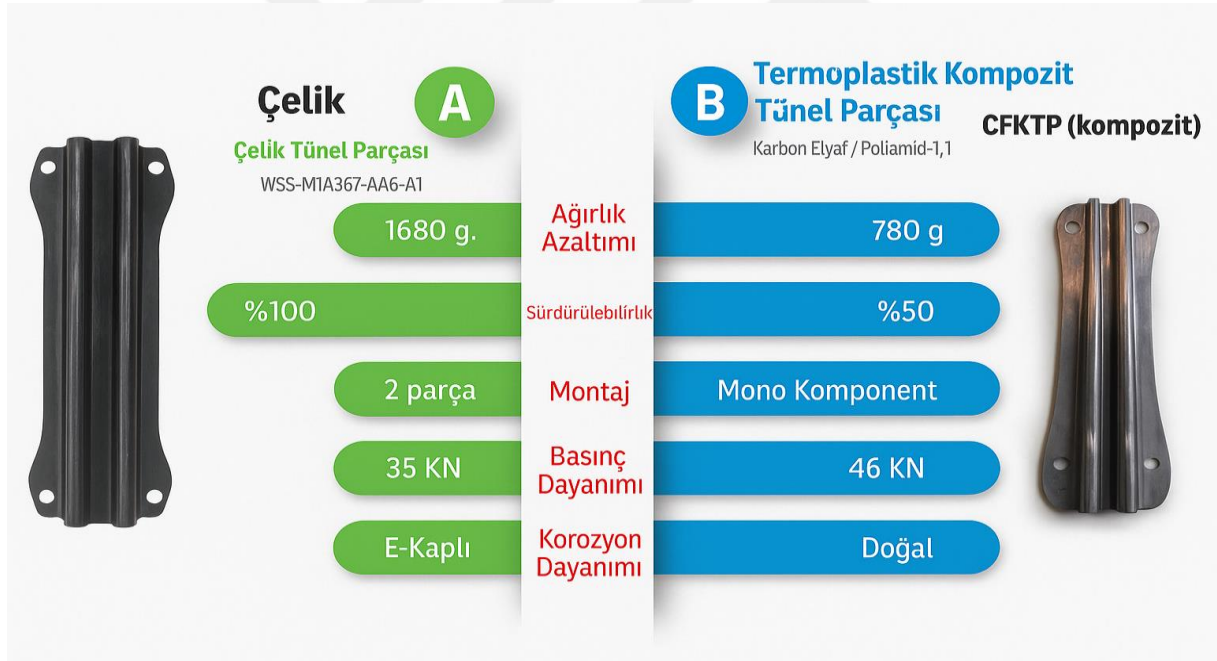
Test numunelerinin oluşturulduğu ve malzeme kartının çıkarılmasına temel oluşturan parçadan bahsetmek gerekirse, “Tunnel Bracket” olarak adlandırılan bu parça, Plascam A.Ş. tarafından üretilmiş ve patenti alınmış bir üründür. Ford Courier araçlarında, şaft tüneline saran ve yanal destek sağlayan bu parça, başlangıçta metal olarak tasarlanmışken, Plascam A.Ş. tarafından polimer matrisli (PA6) ve sürekli karbon elyaf takviyeli kompozit bir yapıya dönüştürülmüştür. Ayrıca, yapıştırıcı ve güçlendirici özellik kazandırmak amacıyla reçine kullanılmıştır. Patenti bulunan bu parçaya ait kompozit malzemenin henüz bir malzeme kartı veya mekanik malzeme özelliklerine ait temel bilgiler mevcut değildir.

Metal parça yerine kompozit malzeme tercih edilmesinin başlıca avantajları ise şu şekildedir:

- Mükemmel dayanıklılık ve darbe direnci
- Mükemmel aşınma direnci
- Düşük sürtünme katsayısı
- Yüksek kopma direnci özellikleri, kayma direnci
- Geniş sıcaklık aralığında mekanik ve elektriksel özelliği koruyabilme
- Yağlara, gres yağına, solventlere ve bazlara mükemmel direnç gösterme
- Bütün termoplastik metotlara uyum



Şekil 3.2. Tunnel bracket parçasının araç üzerindeki konumu



Şekil 3.3. Parçanın çelik ve kompozit yapısının teknik olarak karşılaştırması

3.2. Malzeme Mekanik Özellikleri

Bu noktada parçanın mekanik davranışını yorumlamada; malzeme özelliklerinin belirlenmesi için hangi mekanik özelliklere, ne oranda ihtiyaç duyulduğuna karar verilir (Tablo 3.1). Yapılacak testler, test merkezi, kompozit malzemenin cinsi, bileşenleri, elyaf türü, elyaf yönü ve sürekliliği düşünüldüğünde yeterli olabilecek mekanik özellikler kararlaştırılır.

Tablo 3.1. Mekanik özellikler ve yapılması gereken testler

Malzeme Özellikleri	ASTM Testleri ve Elyaf Yönleri	
E1(Elastic Modulus-1)	ASTM D 3039 SG 0 yönü	
E2(Elastic Modulus-2)	ASTM D 3039 SG 90 yönü	Ortak
E3(Elastic Modulus-3)	ASTM D 3039 SG 90 yönü	
G12(Shear Modulus-12)	ASTM D5379 SG	Ortak
G13(Shear Modulus-13)	ASTM D5379 SG	
G23(Shear Modulus-23)	ASTM D5379 SG	
v12(Poisson Ratio 12)	ASTM D 3039 SG 0 yönü	
v13(Poisson Ratio 13)	ASTM D 3039 SG 0 yönü	
v23(Poisson Ratio 23)	ASTM D 3039 SG	
Tensile Stress-1	ASTM D 3039 SG 0 yönü	
Tensile Stress-2	ASTM D 3039 SG 90 yönü	Ortak
Tensile Stress-3	ASTM D 3039 SG 90 yönü	
Compressive Stress-1	ASTM D3410 SG 0 Yönü	
Compressive Stress-2	ASTM D3410 SG 90 Yönü	Ortak
Compressive Stress-3	ASTM D3410 SG 90 Yönü	
Shear Stress-12	ASTM D5379 SG	Ortak
Shear Stress-13	ASTM D5379 SG	
Shear Stress-23	ASTM D5379 SG	
Tensile Strain-1	ASTM D 3039 SG 0 yönü	
Tensile Strain-2	ASTM D 3039 SG 90 yönü	Ortak
Tensile Strain-3	ASTM D 3039 SG 90 yönü	
Compressive Strain-1	ASTM D3410 SG 0 Yönü	
Compressive Strain-2	ASTM D3410 SG 90 Yönü	Ortak
Compressive Strain-3	ASTM D3410 SG 90 Yönü	
Shear Strain-12	ASTM D5379 SG	
Shear Strain-13	ASTM D5379 SG	Ortak
Shear Strain-23	ASTM D5379 SG	
Yoğunluk	Kompozit ve Reçine Yoğunluğunun Ortalaması	

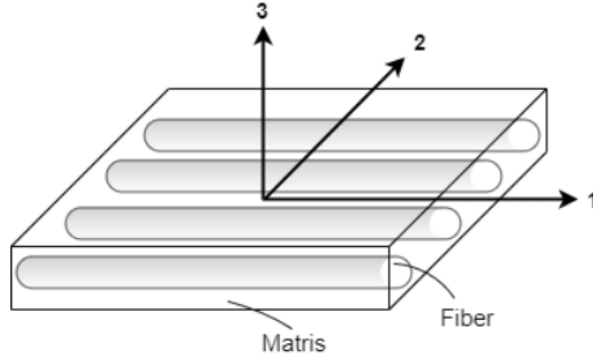
3.2.1. Kompozit tabaka düzlemi

Mekanik özelliklerde gördüğümüz 1,2 ve 3 numaralı işaretlemelerden bahsetmek gereklidir. Kompozit mekaniği kurallarından gelen bu numaralandırma aslında elyaf yani fiber yönelmesidir.

1 Tabaka düzleminde, fiber doğrultusuna paralel eksen

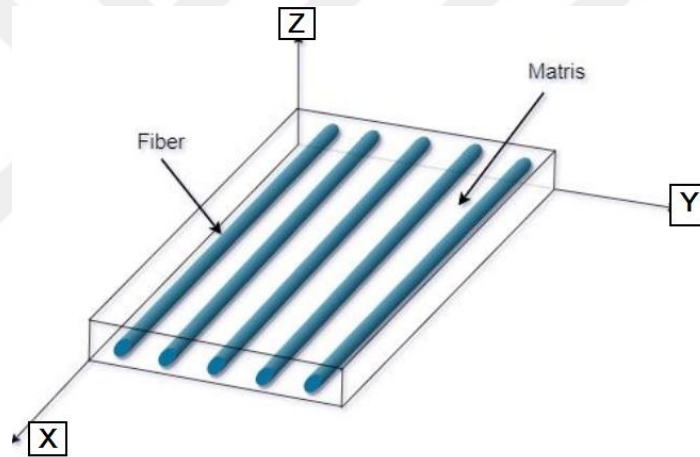
2 Tabaka düzleminde, fiber doğrultusuna dik eksen

3 Tabaka düzlemine dik ve kalınlık yönündeki eksen



Şekil 3.4. Tek yönlü ve sürekli elyaf takviyeli bir tabaka [31]

Kullanılan CAE programlarında ANSYS ve LS-DYNA üzerinde 1 yönü X eksen, 2 yönü Y eksen ve 3 yönü Z eksen kabul edilir. Program girdilerinde malzeme mekanik özellikleri doldururken ve test sonuçları yorumlanırken kabuller bu şekilde yapılmalıdır.



Şekil 3.5. Tabaka düzleminde eksenel gösterim [31]

3.2.2. Yoğunluk

Yoğunluk girdisi girmek için kompozit yoğunluğu ve kullanılan reçine yoğunluğu bilinmelidir. Mekanik testlerin yapıldığı test merkezinde yoğunluk testi de yapılmış ve raporlanmıştır. Test ASTM D792 standart kurallarına göre yapılmıştır. Bu yöntem, katı bir cismin sıvı içindeki kaldırma kuvveti yardımıyla hacminin ve dolayısıyla yoğunluğunun hesaplanmasına dayanır.

Uygulama sırasında, kompozit numune önce hava ortamında tartılmış, ardından tamamen saf su içerisine daldırılarak sıvı içerisindeki tartımı gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, özellikle düzensiz yüzeye sahip olan veya gözenekli yapıda üretilebilen kompozit numunelerde yüksek doğrulukla sonuç vermektedir.

Tablo 3.2. Yoğunluk testinde sembol, birim açıklama tablosu

Sembol	Birim	Açıklama
m_1	gr	Numunenin havadaki ağırlığı
m_2	gr	Numunenin daldırma sıvısındaki ağırlığı
S	gr/cm ³	Daldırma sıvısının yoğunluğu
C	°C	Daldırma sıvısının sıcaklığı
D	gr/cm ³	Yoğunluk

Standartlara göre (ASTM D 3171 B) üç adet numune oluşturulmuş ve teste tabii tutulmuştur. Numune test sonuçları aşağıdaki tablodadır.

Tablo 3.3. Numune yoğunluk test sonuçları

Sembol	Numune 1	Numune 2	Numune 3
m_1	1,9423	1,9837	1,8334
m_2	0,6235	0,6346	0,5900
S	0,997538	0,997538	0,997538

Tablo 3.4. Reçinesiz kompozitin yoğunluk tayini

Sembol	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
D_{kompozit}	1,4692	1,4668	1,4709	1,4689

Bu sonuçlara göre ölçülmüş kompozit yoğunluğu (D_{kompozit}) çalışmalarda 1,47 g/cm³ alınabilir. Aynı işlemler ve numune testleri, reçine yoğunluğunun tayini için de yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Aşağıdaki tabloda reçine numunelerinin yoğunluk testindeki sonuçları mevcuttur.

Tablo 3.5. Reçine yoğunluk tayini

Sembol	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
$D_{\text{reçine}}$	1,1524	1,1519	1,1537	1,1527

Bu sonuçlara göre reçine yoğunluğu çalışmalarda 1,15 g/cm³ alınabilir. Daha sonra mekanik testler için hazırlanan test numunelerinin yoğunluğunu tayin etmek için ise kompozit ve reçine yoğunluğunun toplamının ortalamasıdır.

$$D = \frac{D_{\text{kompozit}} + D_{\text{reçine}}}{2} \quad (3.1)$$

Burada D, kompozit parçamızın ve testlerde kullandığımız numunelerin yoğunluğunu ifade etmektedir. D_{kompozit} sembolü reçine sürülmeden önceki Tailored Fiber Placement (TFP) teknolojisiyle üretilen ve PA6 ile basılan kompozitin yoğunluğudur. $D_{\text{reçine}}$ ise reçinenin yoğunluğudur. Reçinesiz kompozitin ve reçinenin yoğunluk tayinini yukarıdaki tablolarda verilen değerlerden hesaplanır ve formüldeki (3.1) gibi yoğunluk toplamı ikiye bölündüğünde kompozit parçanın ve testlerde/analizde kullanılan numunelerin yoğunluğu bulunur.

Bu formül ile de yoğunluk değeri 1.31 g/cm³ olarak belirlenir. Gerekli mekanik testlerde simülasyon modellemelerinde bu yoğunluk değeri kullanılır.

3.2.3. Elastisite modülü

Elastisite modülü (Young's modulus) bir nesnenin gerilme (tensile) elastikliğini veya zıt yönlerde kuvvet uygulanan bir eksen boyunca deforme olma eğilimini tanımlar. Tensile stress (çekme gerilmesi) değerinin tensile strain (çekme uzaması) değerine oranı olarak ifade edilir. Birimi basınç birimidir [32].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Burada E, elastisite modülüdür. σ Sembolü tensile stress, ε sembolü ise çekme uzaması (tensile strain) değeridir.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3039 (çekme) testlerinden elastik modül değeri bulunabilir. E1, E2, E3 değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Elastic modulus-1 (E1) değeri için ASTM D3039 SG 0 yönü test sonuçları

Elastic modulus-2 (E2) değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

Elastic modulus-3 (E3) değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

3.2.4. Kayma (kesme) modülü

Kayma (shear) modülüne esnemezlik modülü de denir; G veya bazen S ile tanımlanır. Shear modülü shear stress (kayma gerilmesi) değerinin shear strain (kayma uzaması) değerine oranıdır [32].

$$G = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Strain}} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.3)$$

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D5379 (kayma) testlerinden shear modül değeri bulunabilir. G1, G2, G3 değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Shear modulus-12 (G12) değeri için ASTM D5379 SG 0 yönü test sonuçları

Shear modulus-13 (G13) değeri için ASTM D5379 SG 0 yönü test sonuçları

Shear modulus-23 (G23) değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

3.2.5. Poisson oranı

Poisson oranı, bir nesnenin enine uzamasının boyuna uzamasına oranıdır. ν ile gösterilir.

$$\nu = \frac{\epsilon (\text{enine})}{\epsilon (\text{boyuna})} \quad (3.4)$$

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3039 (çekme) testlerinden poisson ratio (poisson oranı) değeri bulunabilir. ν_1 , ν_2 , ν_3 değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Poisson ratio-12 (ν_{12}) değeri için ASTM D3039 SG 0 yönü test sonuçları

Poisson ratio-13 (ν_{13}) değeri için ASTM D3039 SG 0 yönü test sonuçları

Poisson ratio-23 (ν_{23}) değeri için ASTM D3039 SG test sonuçları

3.2.6. Gerilmeler

Gerilim yönü ve boyutu cinsinden tanımlanır. Yönü açısından üçe ayrılır. Bunlar; çekme gerilmesi (tensile stress), basma gerilmesi (compressive stress) ve kayma gerilmesidir (shear stress) [33].

3.2.6.1. Çekme gerilmesi

Çekme gerilimi, kütleyi uzatmak veya germek isteyen bir yükün yarattığı deformasyona karşı çıkan kuvvettir. Daima çekme gerilmesiyle beraber oluşur.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3039 (çekme) testlerinden gerilme değeri bulunabilir. Tensile stress değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Tensile stress-1 değeri için ASTM D3039 SG 0 yönü test sonuçları

Tensile stress-2 değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

Tensile stress-3 değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

3.2.6.2. Basma gerilmesi

Basma gerilimi, eğer bir kütle kendisini kısaltmaya ya da sıkıştırmaya çalışan bir yüke maruz bırakılırsa bu yüke karşı çıkan iç kuvvetlere sıkışma gerilimi adı verilir. Basma gerilimi daima basma gerilmesi ile beraber görülür.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3410 (basma) testlerinden gerilme değeri bulunabilir. Compressive stress değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Compressive stress-1 değeri için ASTM D3410 SG 0 yönü test sonuçları

Compressive stress-2 değeri için ASTM D3410 SG 90 yönü test sonuçları

Compressive stress-3 değeri için ASTM D3410 SG 90 yönü test sonuçları

3.2.6.3. Kayma (kesme) gerilmesi

Kayma gerilimi, çevirme hareketine veya bir kütleyi diğerinin üzerinde kaydırmaya karşı çıkan gerilime makaslama veya kayma gerilimi adı verilir.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D5379 (kayma) testlerinden gerilme değeri bulunabilir. Shear stress değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Shear stress-12 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

Shear stress-13 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

Shear stress-23 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

3.2.7. Gerinimler

Plastik gerinim, bir malzemenin elastik sınırını aştıktan sonra maruz kaldığı şekil değişikliğinin kalıcı hale gelmesi durumudur. Başka bir deyişle, bir malzeme üzerine uygulanan yük

kaldırıldığında eski şekline geri dönemiyorsa ve belirli bir oranda kalıcı deformasyon kalıyorsa, bu plastik gerinim olarak adlandırılır [34].

3.2.7.1. Çekme birim uzaması

Çekme birim uzaması (tensile strain), bir malzemenin üzerine çekme kuvveti uygulandığında boyundaki uzamanın, orijinal boyuna oranıdır. Birim uzama olarak da bilinir ve malzemenin deformasyonunu ölçmek için kullanılır.

$$\text{Tensile strain} = \Delta L / L_0 \quad (3.5)$$

(3.5) formülündeki ΔL sembolü, çekme kuvveti uygulandıktan sonra boydaki değişim bir başka deyişle son boy ile ilk boy arasındaki farktır. L_0 ise numunenin ilk boyu, orijinal halidir.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3039 (çekme) testlerinden gerinim değeri bulunabilir. Tensile strain değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Tensile strain-1 değeri için ASTM D3039 SG 0 yönü test sonuçları

Tensile strain-2 değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

Tensile strain-3 değeri için ASTM D3039 SG 90 yönü test sonuçları

3.2.7.2. Basma birim uzaması

Basma birim uzaması (compressive strain), bir malzemeye basma kuvveti uygulandığında boyundaki kısalmanın, orijinal boyuna oranıdır. Tensile strain (çekme birim uzaması) malzemenin uzamasını ifade ederken, compressive strain malzemenin sıkışmasını ölçer.

$$\text{Compressive strain} = \Delta L / L_0 \quad (3.6)$$

(3.6) formülündeki ΔL sembolü, basma kuvveti uygulandıktan sonra boydaki değişim bir başka deyişle ilk boy ile son boy arasındaki farktır. L_0 ise numunenin ilk boyu, orijinal halidir.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D3410 (basma) testlerinden gerinim değeri bulunabilir. Compressive strain değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Compressive strain-1 değeri için ASTM D3410 SG 0 yönü test sonuçları

Compressive strain-2 değeri için ASTM D3410 SG 90 yönü test sonuçları

Compressive strain-3 değeri için ASTM D3410 SG 90 yönü test sonuçları

3.2.7.3. Kayma (kesme) birim uzaması

Kayma birim uzaması (shear strain), bir malzemeye uygulanan kesme kuvveti nedeniyle oluşan şekil değişiminin, başlangıçtaki uzunluğa oranıdır. Diğer bir deyişle, malzemenin bir yüzeyi sabitken diğer yüzeyinin yatay yönde kayması sonucu oluşan açısal deformasyonu ifade eder.

$$\text{Shear strain} = \gamma = \Delta x / h \quad (3.7)$$

(3.7) formülündeki Δx sembolü, kesme/kayma kuvveti uygulandıktan sonra boydaki değişimdir. h ise numunenin ilk boyu, orijinal halidir.

Yapılan mekanik testler içerisinde ASTM D5379 (kayma) testlerinden gerinim değeri bulunabilir. Shear strain değerleri için aşağıdaki test sonuçları dikkate alınmalıdır:

Shear strain-12 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

Shear strain-13 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

Shear strain-23 değeri için ASTM D5379 SG test sonuçları

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Referans Alınan Test Standardı

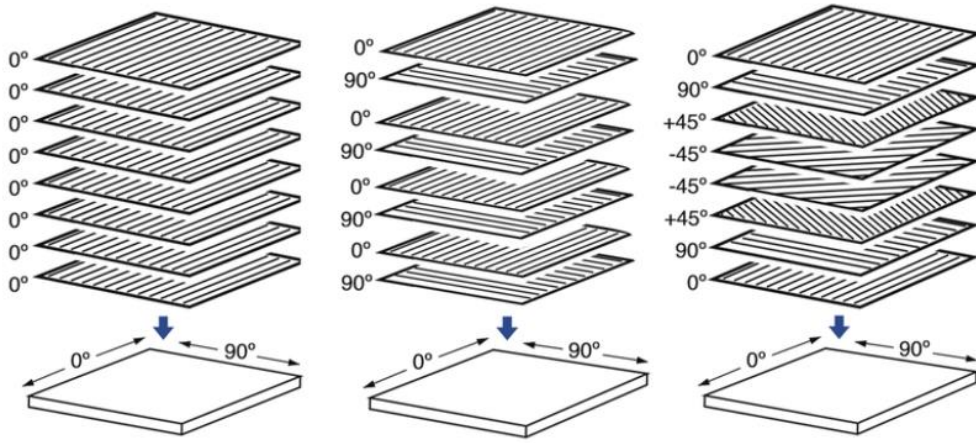
Bu bölümde testler ve numuneler hakkında bilgiler verildi. Testlerin neden ve nasıl yapıldığı, numunelerin hangi standartlara göre kesilip boyutlandırılarak teste hazır hale geldiği gibi konular işlendi.

Bu çalışma, tunnel bracket parçasının mekanik malzeme kartı hakkında temel bilgiler elde etme, malzemenin mekanik davranışı inceleme ve deneysel ve sayısal sonuçlar oluşturma çalışması olduğu için burada termal, kimyasal, elektriksel vb. özellikler dikkate alınmamalıdır. Bu yüzden parça ham maddesinin mekanik özelliklerini gösterecek ve doğrulayacak testler yeterli olacaktır.

Tüm testlerde kullanılan standart ASTM standardıdır. ASTM standartları, ürünlerin ve malzemelerin test edilmesi için gerekli metotları, ölçüm ve analiz tekniklerini, ürün ve malzemelerin özelliklerini ve kullanım koşullarını belirler [35]. ASTM türlerinden ise ASTM D standart türü testlerde uygulandı. ASTM D standardı, inşaat, çevre koruma, kimya endüstrisi, ilaç, gıda, otomotiv, elektronik vb. dahil olmak üzere çeşitli uygulama alanlarına uygulanabilir. Bu standartlar, test yöntemleri, numune hazırlama, test koşulları, veri analizi ve sonuç raporu için gereklilikleri belirtir.

4.2. Karbon Elyaf Yönelimleri

Sürekli karbon elyaf (continuous carbon fiber), uzun ve kesintisiz karbon elyaflarından oluşan bir malzemedir. Kesikli karbon elyaflardan farklı olarak, sürekli karbon elyaflar tek bir yön boyunca uzanır ve mekanik özellikleri daha iyidir. Var olan parça ve numuneler için basılan test plakalarında sürekli karbon elyaf yöntemi kullanıldı. Karbon elyaflarda doğrusal yönde bir süreklilik mevcuttur. Sürekli karbon elyaflar genellikle prepreg (ön emprenye edilmiş reçineli şeritler) veya dokuma kumaşlar şeklinde kullanılır. Kompozit malzemelerde matris (genellikle epoksi reçine) ile birleştirilerek yüksek performanslı yapılar oluşturulur [36]. Test plakalarında ve bunlardan kesilen numunelerde 0^0 , 90^0 ve 45^0 açıları kullanıldı. Bu açığa sahip numuneler, bulmaya çalıştığımız mekanik özellikler için yeterli olacaktır.



Şekil 4.1. 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ karbon elyaf yönelimlerinin katmanlar üzerinde gösterimi [37]

4.3. Testler

Mekanik özellikleri belirlemek için çekme, basma ve kayma testi yapılmasına karar verildi. Bulmaya çalıştığımız malzeme özelliklerini (gerilmeler, gerinimler, poisson ratio, elastik modül ve shear modül) belirlemek için yeterli olacaktır. Bu testler Sabancı Üniversitesi'nin de kurulumunda ortak payda sahibi olduğu uluslararası standartları sağlayan akrediteye sahip test merkezi olan Kordsa'da, uzman teknikerler ve danışmanlar tarafından standartlara uygun bir şekilde yapıldı.

4.3.1. Çekme testi (ASTM D3039)

Bu standart, yüksek modüllü elyaflarla güçlendirilmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin düzlem içi çekme özelliklerini belirlemek için kullanılan bir test yöntemini açıklar.

4.3.1.1. Test yöntemi

- Numune Hazırlığı: Dikdörtgen kesitli ince bir malzeme numunesi hazırlanır.
- Test Prosedürü: Numune, mekanik test cihazına yerleştirilerek tek eksenli çekme yüküne tabi tutulur.
- Ölçülen Değerler: Çekme mukavemeti, çekme gerinimi, elastik modül, poisson oranı, geçiş gerinimi

4.3.1.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler

- Malzeme kusurları, fiber hizalama hataları ve kötü numune işleme, sonuçlarda yüksek saçılmaya neden olabilir.

- Tutuş ve hizalama kritik öneme sahiptir; yanlış hizalama numunenin erken kopmasına sebep olabilir.

4.3.1.3. Gerekli cihazlar

- Mikrometre ve kumpas: Numune kalınlığı ve genişliği ölçmek için.
- Çekme test cihazı: Hareketli ve sabit kafaya sahip olmalı, hassas kuvvet ölçümü yapabilmelidir.
- Gerilim ölçerler (strain gage) veya uzama ölçerler (extensometer): Malzemenin elastik özelliklerini belirlemek için.
- Çevresel test odası: Farklı sıcaklık ve nem koşullarında test yapmak için.

Bu test yöntemi, kompozit malzemelerin çekme dayanımını belirlemek ve karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

4.3.2. Basma testi (ASTM D3410)

ASTM D3410 testi, karbon elyaf takviyeli polimerlerin (CFRP) mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan bir testtir. Bu test, özellikle kompozit malzemelerin Eğilme dayanımı ve eğilme modülünü belirlemek amacıyla kullanılır.

4.3.2.1. Test yöntemi

- Numune Hazırlığı: Numune, belirli bir boyutta ve şekillerde hazırlanmalıdır. Tipik olarak 3 veya 4 noktalı eğilme testi yapılır.
- Yükleme Şekli: Numune üzerine yük uygulanırken, numune sabit bir hızla eğilir. Yük ve deformasyon arasındaki ilişki ölçülür.
- Test Sırasında Ölçümler: Yük ve yer değiştirme ölçülür. Eğilme modülü, bu ölçümlerle hesaplanır.

4.3.2.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler

- Malzeme kusurları, fiber hizalama hataları ve kötü numune işleme, sonuçlarda yüksek saçılmaya neden olabilir.
- Tutuş ve hizalama kritik öneme sahiptir; yanlış hizalama numunenin erken kopmasına sebep olabilir.

- Sonuçlar: Eğilme dayanımı, numunenin kırılma noktasındaki maksimum yük ile ölçülür. Eğilme modülü, elastik bölgedeki yük-deformasyon ilişkisinden elde edilir.

4.3.2.3. Gerekli cihazlar

- Eğilme Test Cihazı (Bending Test Machine): Numuneye yük uygulamak için kullanılır.
- Yük Ölçüm Sistemi (Load Cell): Yük miktarını ölçmek için kullanılır.
- Deformasyon Ölçer (Displacement Transducer): Numunenin deformasyonunu ölçmek için gereklidir.
- Cihaz Kalibrasyonu: Yük ve deformasyon ölçüm cihazlarının doğru kalibrasyona sahip olması gerekir.
- Bilgisayar ve Yazılım: Verilerin kaydedilmesi ve analiz edilmesi için bilgisayar ve uygun yazılım gereklidir.

Bu test, kompozit malzemelerin mühendislik tasarımları için kritik olan eğilme özelliklerini belirlemek adına yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

4.3.3. Kayma (kesme) testi (ASTM D5379)

ASTM D5379 testi, kompozit malzemelerin eğilme dayanımı ve eğilme modülünü belirlemek amacıyla yapılan bir başka testtir. Bu test, özellikle kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.

4.3.3.1. Test yöntemi

- Numune Hazırlığı: Numune, belirli bir boyutta ve şekillerde hazırlanmalıdır. Numune uzunluğu, genişliği ve kalınlığı belirli sınırlar içinde olmalıdır.
- Yükleme Şekli: Numune, test cihazı üzerinde üç noktalı eğilme testine tabi tutulur. Yük, numunenin ortasındaki bir noktadan uygulanır.
- Test Sırasında Ölçümler: Yük ve deformasyon ölçülür. Eğilme dayanımı, numunenin kırılma noktasındaki maksimum yük ile ölçülür. Eğilme modülü, yük-deformasyon eğrisinin elastik bölgesinden hesaplanır.
- Sonuçlar: Eğilme dayanımı, numunenin kırılma noktasındaki yük ile belirlenirken, eğilme modülü yük-deformasyon eğrisinden elde edilir.

4.3.3.2. Test sistemi ve dikkat edilmesi gerekenler

- Eğilme Test Cihazı (Bending Test Machine): Yük uygulama ve numunenin deformasyonunu izleme amaçlı kullanılır. Test sırasında, yük cihazı belirli bir hızda uygulanmalıdır.
- Yük Uygulama Sistemi: Genellikle hidrolik veya mekanik yük uygulama sistemleri kullanılır.
- Deformasyon Ölçüm Sistemi: Yük uygulama sırasında numunenin deformasyonunu ölçen bir sistem gereklidir. Bu, genellikle uzama ölçer veya lazer cihazı ile yapılır.
- Destek Yüzeyleri: Numune, test cihazındaki destek yüzeylerine düzgün bir şekilde yerleştirilmelidir. Testin doğru sonuç vermesi için bu yüzeylerin düzgün ve pürüzsüz olması gereklidir.
- Numune Boyutları: ASTM D5379 standardında belirtilen numune boyutlarına ve şekillerine uygunluk önemlidir. Numune boyutunun hatalı olması, test sonuçlarının güvenilirliğini etkileyebilir.
- Yükleme Hızı: Yükleme hızı, testin doğruluğu için kritiktir. ASTM D5379'da belirtilen hızda yük uygulamak gereklidir.
- Test Ortamı: Test ortamının sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullarının kontrol altında olması gerekir. Bu faktörler malzeme davranışını etkileyebilir.
- Numune Yerleştirme: Numune düzgün şekilde yerleştirilmeli, herhangi bir eksenel kayma veya yer değiştirme olmamalıdır.

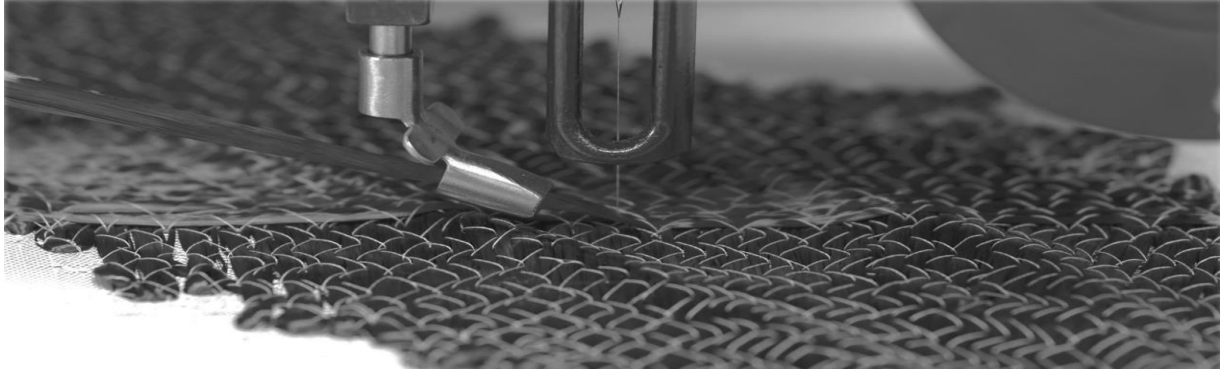
4.3.3.3. Gerekli cihazlar

- Eğilme Test Cihazı (Bending Test Machine): Numuneye yük uygulamak için gereklidir.
- Yük Ölçüm Sistemi (Load Cell): Uygulanan yükü ölçmek için kullanılır.
- Deformasyon Ölçer (Displacement Transducer): Numunenin deformasyonunu ölçmek için kullanılır.
- Destek Yüzeyleri: Numuneyi düzgün bir şekilde desteklemek için kullanılan düz yüzeyler.
- Bilgisayar ve Yazılım: Verilerin kaydedilmesi, analiz edilmesi ve sonuçların raporlanması için gereklidir.

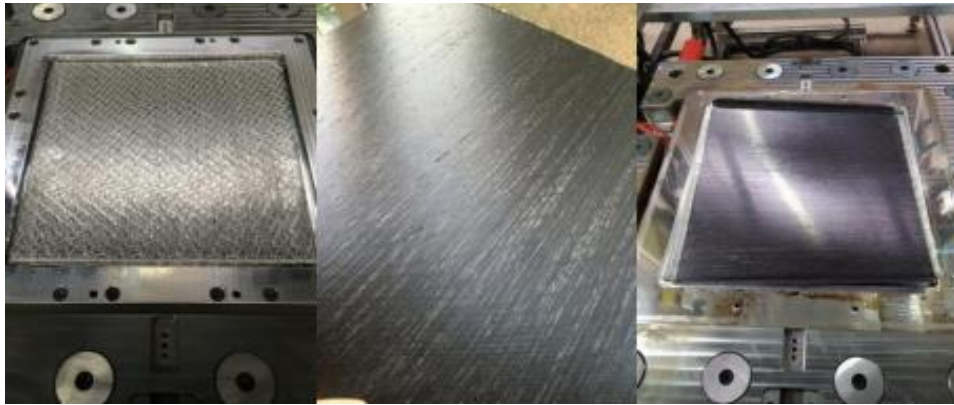
Bu test, kompozit malzemelerin özellikle yapısal uygulamalarda nasıl davrandığını anlamak için önemli bir testtir ve mühendislik tasarımlarında kritik bilgi sağlar [40].

4.4. Numuneler

Numuneleri oluşturmak için test plakaları hazırlandı. Bu test plakaları farklı et kalınlıklarında ve farklı karbon elyaf diziliminde üretildi. İnovatif teknolojilerden biri olan Tailored fiber placement (TFP) yöntemi ile oluşturulan elyaflar, yüksek teknoloji olan Roctool cihazında hızlı ve seri bir şekilde ısıtılıp ergimiş hale getirilir. Ardından yine hızlı bir soğuma teknolojisi ile PA6 ile enjeksiyona hazır hale getirilir. Plastik enjeksiyon makinesinde PA6 ile enjeksiyona giren bu ergimiş ve soğutulmuş ürün, PA6 matrisli kompozit parçamız olarak veya test plakaları olarak elde edilir. Ve kompozit plakalar daha sonra su jeti ile kesilmiştir. Numuneler, 4.1’de bahsedildiği gibi ASTM standartlarına göre hazırlanmıştır.



Şekil 4.2. TFP yöntemi ile üretim



Şekil 4.3. Enjeksiyon kalıbında kompozit plaka baskısı ve üretimi



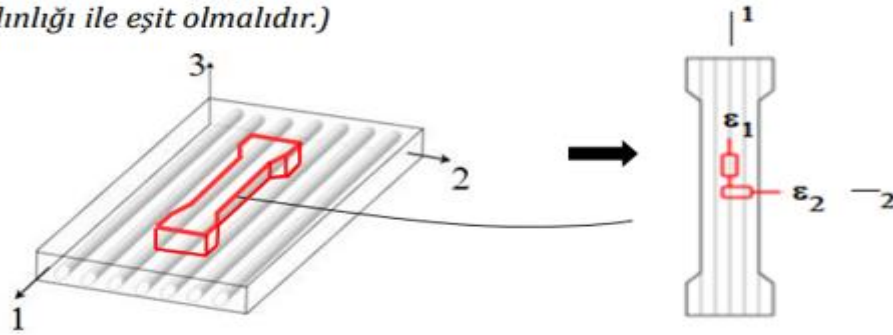
Şekil 4.4. Kompozit plakası ve su jetiyle plakalardan numunelerin kesilmesi



Şekil 4.5. Kesilen numunelerin ölçümsel kontrolü

Plakadan numune kesilirken yönlerine dikkat edilmiştir. Çünkü ihtiyaç duyulan numune ölçülerinde ve fiber doğrultusunda plaka üretilmiştir. Bu sebeple her numune veya numune grubu kendi plakasından kesilmiştir.

(Numune kalınlığı, plaka kalınlığı ile eşit olmalıdır.)



Şekil 4.6. Plakadan numune kesilmesi temsili [41]

4.4.1. Numune ölçüleri

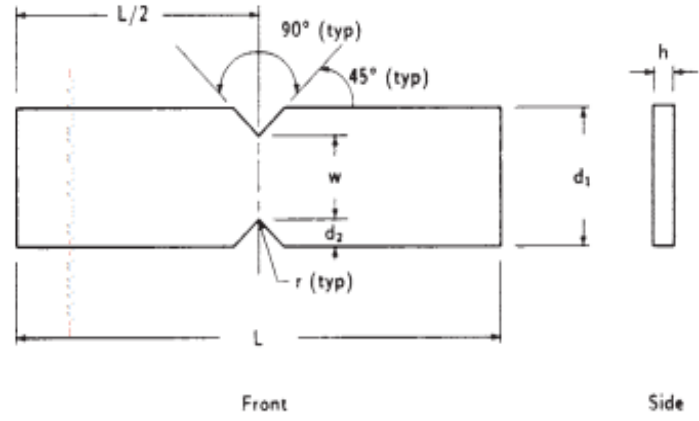
Her bir test ve her bir yön için ASTM standartları incelenmiş ve yorumlanmıştır. Bu inceleme sonucunda aşağıda bulunan tablodaki numune ölçü değerleri belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Numune ölçüleri

Test Türü	Fiber Yönü	Genişlik (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)
Çekme	0 ⁰	15	150	1
Çekme	90 ⁰	25	125	2
Basma	0 ⁰	10	20	2
Basma	90 ⁰	25	20	2
Kayma	±45°	15	150	4



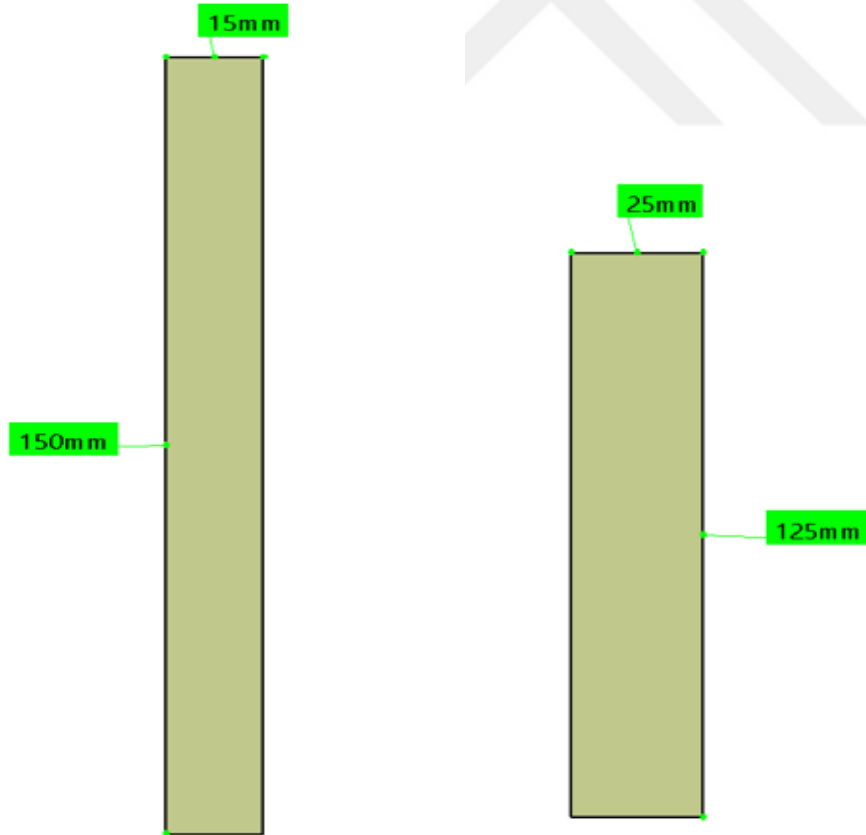
Şekil 4.7. Çekme test düzeneği



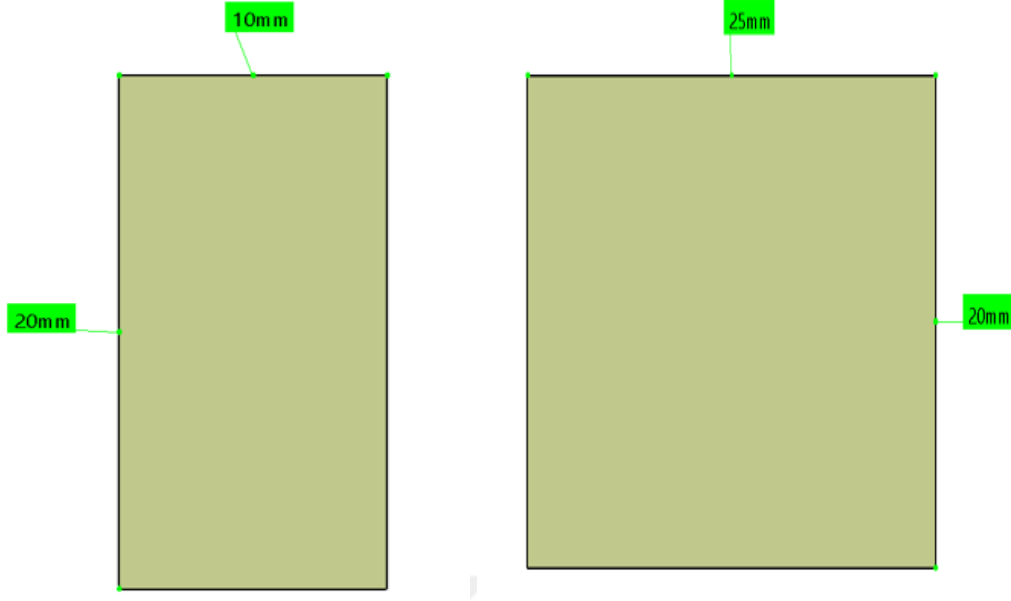
Nominal Specimen Dimensions

d_1	= 20.0 mm [0.75 in.]
d_2	= 4.0 mm [0.15 in.]
h	= as required
L	= 76.0 mm [3.0 in.]
r	= 1.3 mm [0.05 in.]
w	= 12.0 mm [0.45 in.]

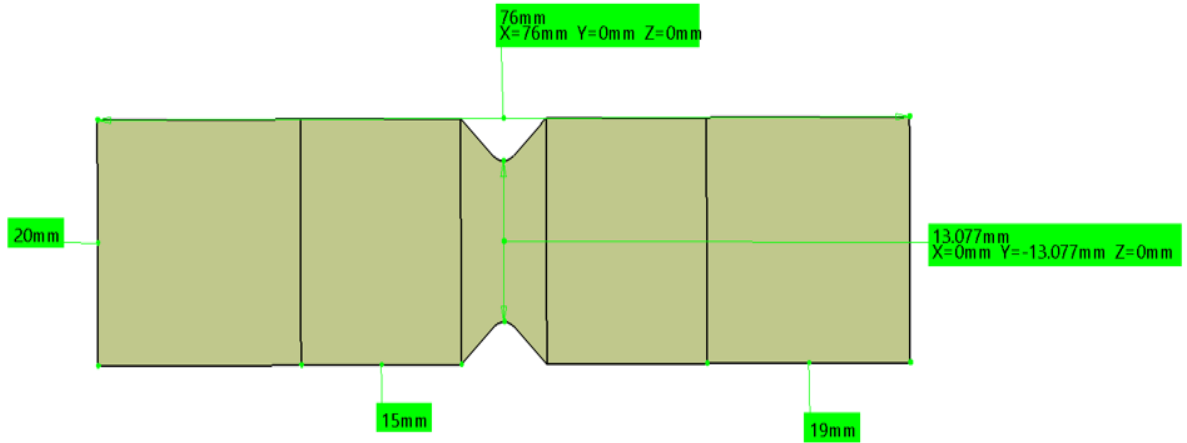
Şekil 4.8. V-Notch test düzeneği ve test numunesinin teknik resmi [40, 41]



Şekil 4.9. Çekme numuneleri CAD görseli (Tablo 4.1'e göre)



Şekil 4.10. Basma numuneleri CAD görseli (Tablo 4.1'e göre)

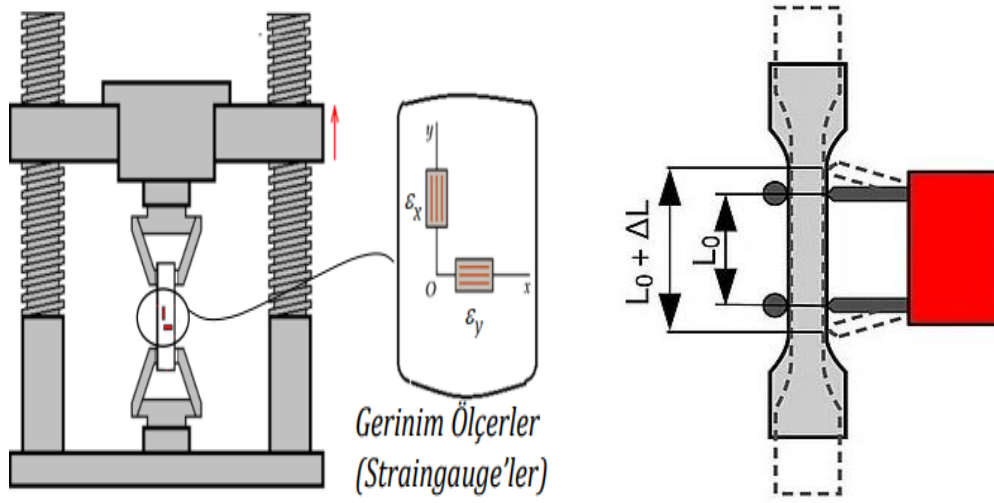


Şekil 4.11. Kayma numunesi CAD görseli (Tablo 4.1'e göre)

4.4.2. Gerinim ölçerler (strain gauge ve ekstansometre)

Gerinimleri ölçmek için kullanılan sensörlerdir. Strain gauge (gerinim ölçer), kendi yapıştırma doğrultusundaki ε birim uzamayı ölçer ve numune üzerine bağlanır. Çekme testlerinde gerinim ölçerler yerine ekstansometreler kullanılabilir. Bu durumda numune üzerinden ΔL uzama miktarları farklı anlar için ölçülür ve o anlar için $\varepsilon = \Delta L/L_0$ formülünden birim uzamalar elde edilebilir. Ekstansometreler bu açıdan önemli kolaylık sağlar [41]. Tablo 3.1'de hangi testlerde

kullanıldı ise yanına “SG” olarak yazılmıştır. Ayrıca çekme testlerinde kolaylık sağlaması için ekstansometre kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Solda strain gauge ve sağda ekstansometre yerleşimi [41]

4.5. Kullanılan CAE Yazılımları

4.5.1. CATIA V5 ve kullanımı

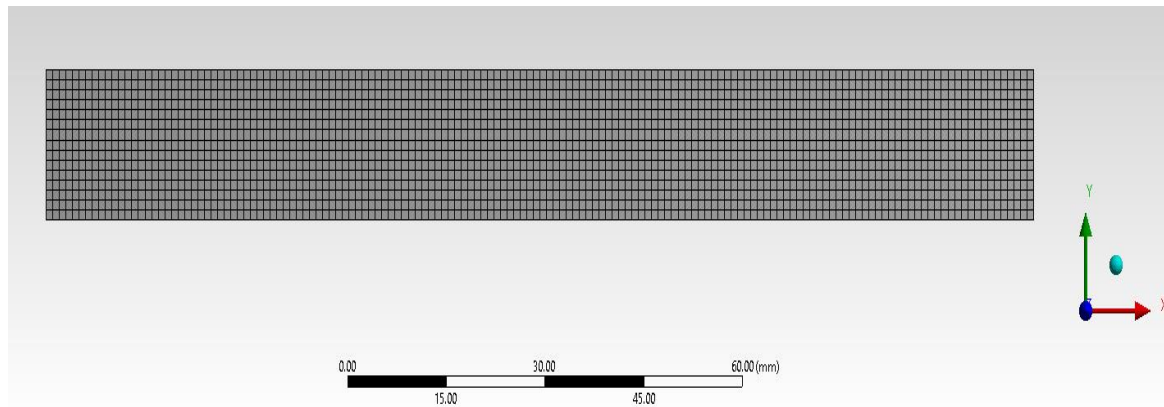
CATIA V5 bilgisayar destekli tasarım (CAD), mühendislik ve üretim yazılımıdır. Otomotiv, havacılık, savunma, gemi inşaatı ve endüstriyel tasarım gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tasarım programı tez çalışmasında numunelerin çizilmesinde ve yüzeylerinin oluşturulup baskı alanlarına göre bölünmesi gibi tasarım çalışmada kullanıldı. Şekil 4.5., Şekil 4.6. ve Şekil 4.6. görselleri CATIA V5 programında çizilmiştir.

4.5.2. ANSYS ve kullanımı

ANSYS, farklı mühendislik disiplinlerine yönelik çok yönlü analiz çözümleri sunan bir sonlu elemanlar analiz (FEA) yazılımıdır. Bu yazılım aracılığıyla yapısal dayanım, akışkan davranışı, termal analiz ve elektromanyetik etkileşim gibi çeşitli fiziksel olaylar modellenenilmektedir. Bu çalışmada, CAE sürecinin simülasyon modelleme aşamasında ANSYS yazılımı tercih edilmiş ve özellikle mesh oluşturma, kompozit yapı tanımlama, malzeme kütüphanesi kullanımı gibi fonksiyonlarından faydalanılmıştır. Gerekli geometrik ve fiziksel tanımlamalar tamamlandıktan sonra, ANSYS'in ACP (Pre) modülü aracılığıyla kompozit katman yapıları modellenmiştir.

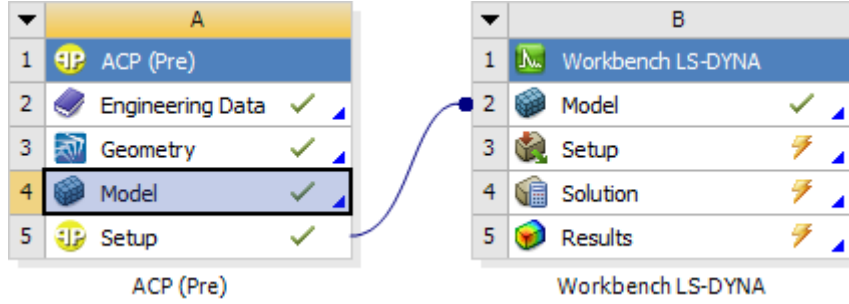
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	1.31	g cm ⁻³
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	40524	MPa
10	Young's Modulus Y direction	4140	MPa
11	Young's Modulus Z direction	4140	MPa
12	Poisson's Ratio XY	0.17	
13	Poisson's Ratio YZ	0.49	
14	Poisson's Ratio XZ	0.17	
15	Shear Modulus XY	1800	MPa
16	Shear Modulus YZ	1350	MPa
17	Shear Modulus XZ	1800	MPa
18	Orthotropic Stress Limits		
19	Tensile X direction	726.42	MPa
20	Tensile Y direction	28.18	MPa
21	Tensile Z direction	28.18	MPa
22	Compressive X direction	-406.03	MPa
23	Compressive Y direction	-47.7	MPa
24	Compressive Z direction	-47.7	MPa
25	Shear XY	27.64	MPa
26	Shear YZ	20.73	MPa
27	Shear XZ	27.64	MPa
28	Orthotropic Strain Limits		
29	Tensile X direction	0.01437	
30	Tensile Y direction	0.0096	
31	Tensile Z direction	0.0096	
32	Compressive X direction	-0.0033	
33	Compressive Y direction	-0.00016	
34	Compressive Z direction	-0.00016	
35	Shear XY	0.05	
36	Shear YZ	0.0375	
37	Shear XZ	0.05	

Şekil 4.13. ANSYS içinde malzeme tanımlama ve özellikler girdisi



Şekil 4.14. ANSYS içinde numunenin mesh hali

Her bir test yönü için, ANSYS ACP ortamında modelleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve ilgili analizler çalıştırılmıştır. Aşağıdaki görselde, çekme testi için 0° yönüne ait analiz sürecinin ANSYS Workbench içerisindeki parametrik ve kronolojik çalışma akışı yer almaktadır. Modelleme aşaması tamamlandıktan sonra, kompozit yapıların tanımlanması amacıyla ACP modülüne geçilmiş ve burada katmanlar ile malzeme özellikleri detaylandırılmıştır.



Şekil 4.15. ANSYS kronolojik çalışma sayfası

4.5.2.1. ANSYS ACP ve kullanımı

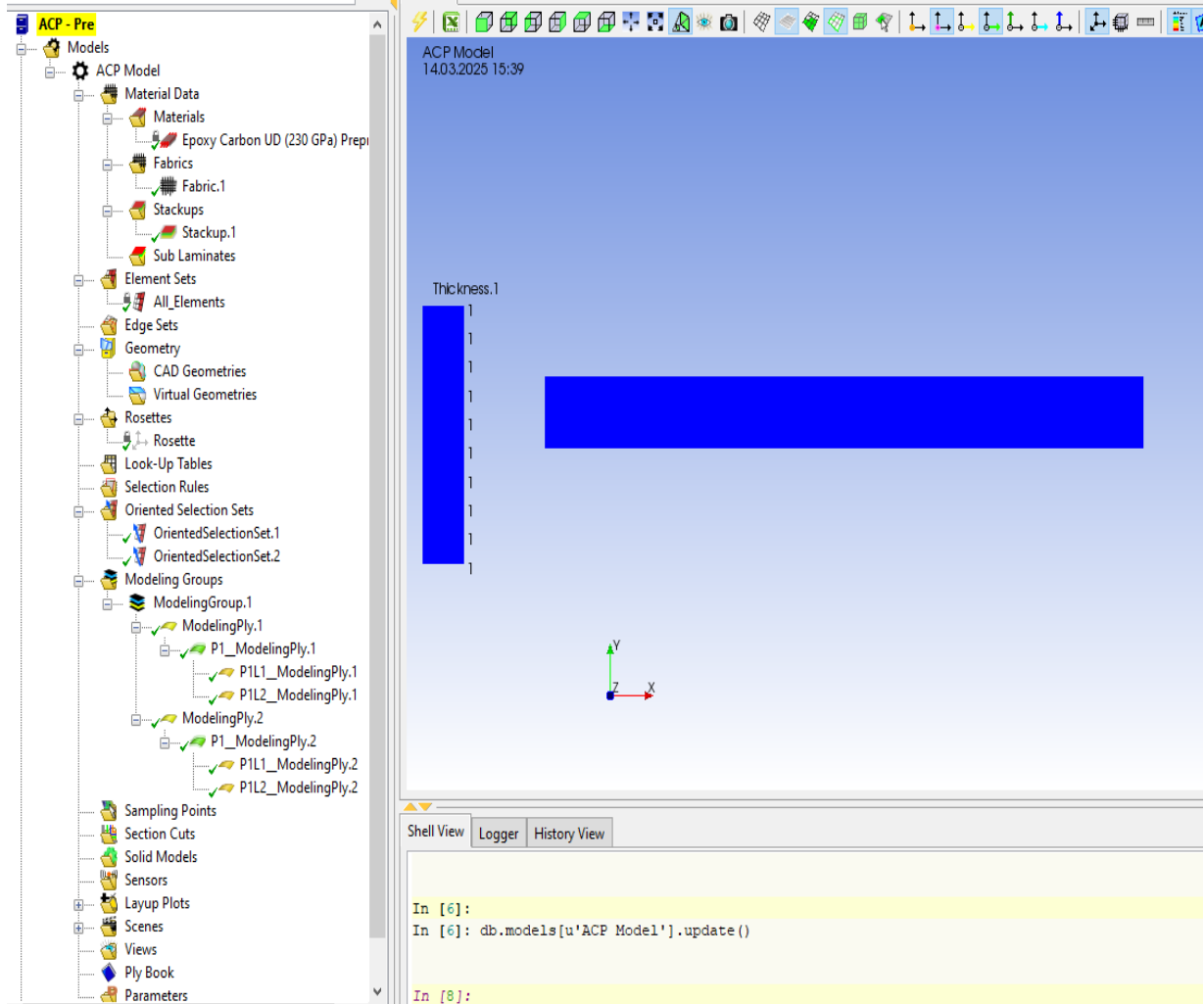
Ansys Composite PrepPost (ACP), kompozit malzemeler üzerinde çalışan mühendisler için özel olarak geliştirilmiş bir ön işleme ve sonuç analizi modülüdür. ACP, katmanlı malzemelerin mekanik davranışlarını analiz etmeye ve modellemeye olanak tanır. Bu alanda birçok üstün özelliklere sahiptir.

Özellikleri:

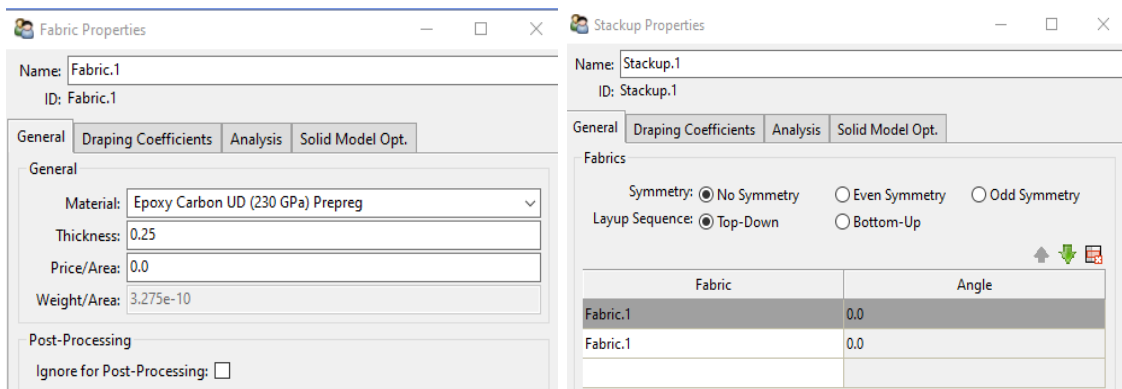
- Kompozit malzeme modelleme (elyaf yönlendirmesi, katman düzeni)
- Otomatik katman yapısı tanımlama
- Kompozit yapıların sonlu eleman analizi
- Analiz sonrası değerlendirme
- ANSYS Mechanical ile entegrasyon

Aşağıdaki görselde, ANSYS ACP ile modelleme yapılırken karşılaşılan ürün ağacı (Model Tree) yapısı görülmektedir. İlk olarak, Material sekmesinde ANSYS ortamında tanımlanan ve özellikleri girilen malzeme belirlenmiştir. Daha sonra, kompozit yapının katmanları tanımlanmıştır. TFP yöntemi ile üretilen parça ve test plakaları çok sayıda katmandan oluşmakta olup, her bir katman 0.25 mm kalınlığındadır. Örneğin, 1 mm kalınlığındaki bir kompozit numune veya test plakası için 4 adet katman tanımlanması gerekmektedir. ACP ortamında bu katmanlar, “Fabric” olarak adlandırılmış ve tanımlanmıştır.

Katman tanımlamalarının ardından, Stackup sekmesinde her bir katmanın yönelimi ve malzeme özellikleri girilmiştir. Elyaf yönleri, katman sıralamaları ve kullanılan malzeme bilgileri bu aşamada detaylı olarak belirlenmiş ve modelde yer alan toplam katman sayısı kadar fabric tanımlanmıştır.

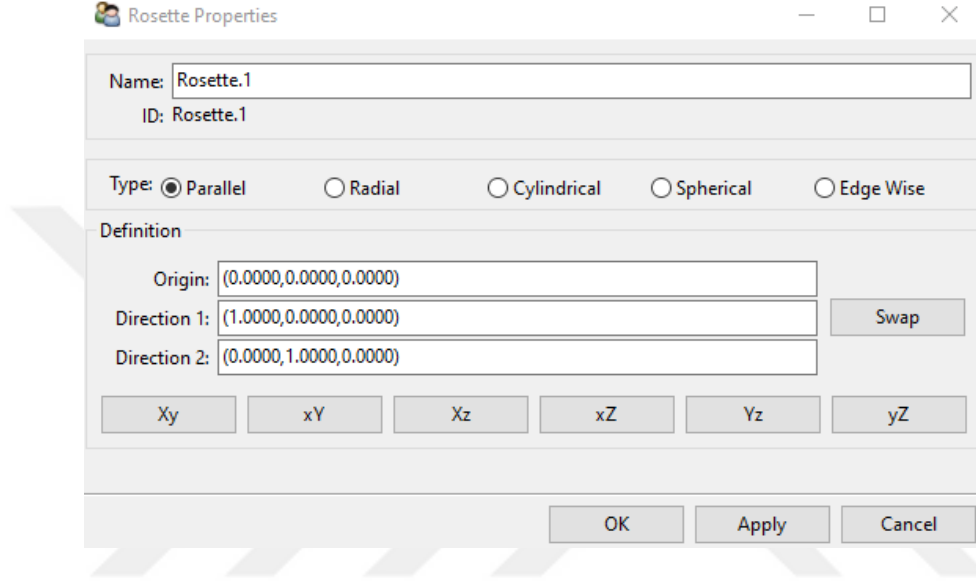


Şekil 4.16. ACP modellemede ürün ağacı



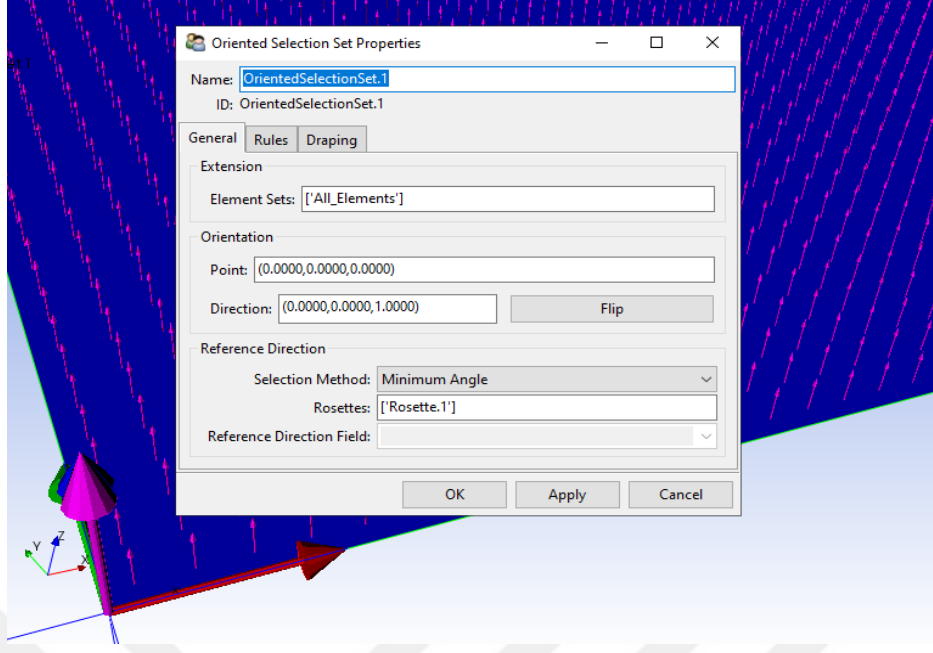
Şekil 4.17. Fabric ve stackup özellikleri tanımlama

Rosette, kompozit analizlerinde kullanılan bir koordinat sistemi referansıdır. Özellikle elyaf yönelimlerini ve malzeme yönlendirmelerini tanımlamak için kullanılır. Kompozit malzemelerin farklı yönlerde farklı mekanik özellikleri olduğu için, analizlerde yerel koordinat sistemine ihtiyaç duyulur. Rosette, bu yerel koordinat sistemini belirleyerek elyaf yönleri ve malzeme eksenlerini tanımlar. Bu sayede gerilme, deformasyon ve dayanım hesaplamaları doğru bir şekilde yapılabilir. Kompozit malzemelerin anizotropik (yön bağımlı) özelliklerini dikkate almak için gereklidir.



Şekil 4.18. Rosette tanımlama

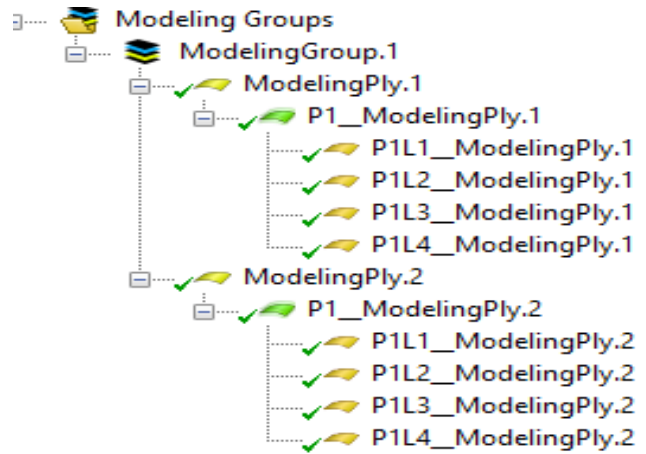
Oriented Selection Sets, ANSYS ACP ortamında kullanılan bir özelliktir ve belirli yönlendirme kurallarına göre elemanların veya yüzeylerin gruplandırılmasına olanak tanır. Bu özellik sayesinde, kompozit analizlerinde elyaf yönelimleri ve katman hizalamaları daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Malzeme yönelimleri, modelin farklı bölgelerinde değişkenlik gösterebildiği için, ilgili bölgeleri organize etmek ve yönetmek amacıyla Selection Sets tanımlamaları yapılır. Böylece elyaf açılarının ve yönelimlerinin modele doğru bir şekilde aktarılması sağlanır.



Şekil 4.19. Oriented selection set tanımlama

Modeling Group, benzer özelliklere sahip katmanları veya bölgeleri organize etmek amacıyla kullanılan bir gruplama yöntemidir. Farklı katman setlerinin ve elyaf yönelimlerinin düzenlenmesini sağlar. ANSYS ACP ortamında bağımsız bölgeler oluşturup bu bölgeleri yönetmeyi kolaylaştırır. Özellikle birden fazla katmandan oluşan karmaşık modellerde, yapıların düzenli ve etkin bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır.

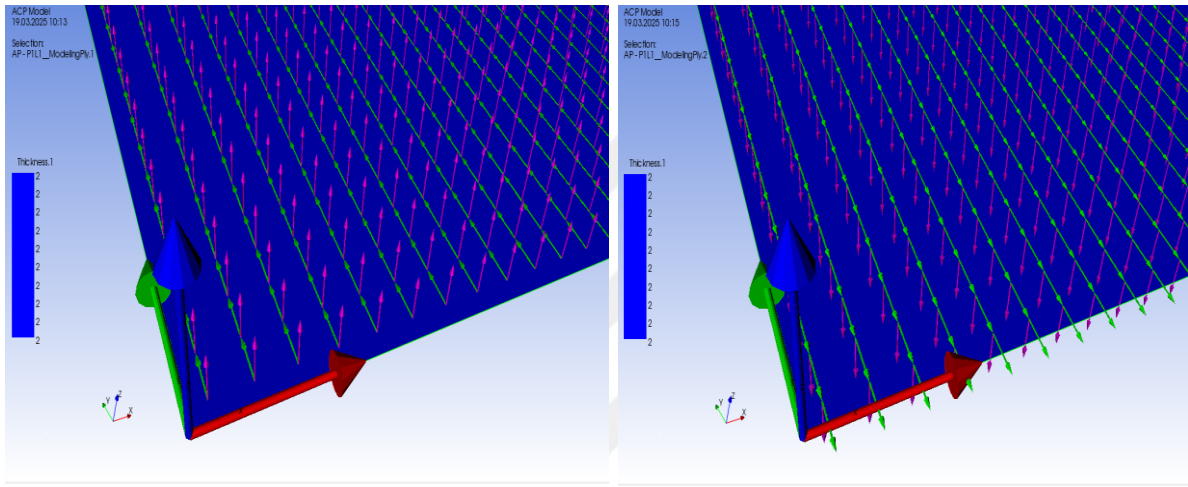
Modeling Ply ise, geçici veya dinamik bir modelleme yaklaşımı olarak tanımlanabilir. Kullanıcının hızlı düzenlemeler yapmasına ve bu değişikliklerin model üzerindeki etkilerini anlık olarak gözlemlemesine imkân tanır. ACP modülünde elyaf yönelimlerinin, katmanların veya malzeme özelliklerinin geçici olarak değiştirilmesine olanak sağlayarak hızlı ön izleme ve test yapılabilmesini mümkün kılar.



Şekil 4.20. Modeling groups görünümü

Yukarıdaki görselde de görüldüğü üzere, Modeling Group ve Modeling Ply tanımlamaları yapılmıştır. Burada, toplamda 2 mm et kalınlığına sahip bir test numunesinin modellendiği anlaşılmaktadır. Bu durum, her biri 0.25 mm kalınlığında olan fabric (dokuma elyaf) düzlemlerinden oluşan sekiz katmandan kaynaklanmaktadır.

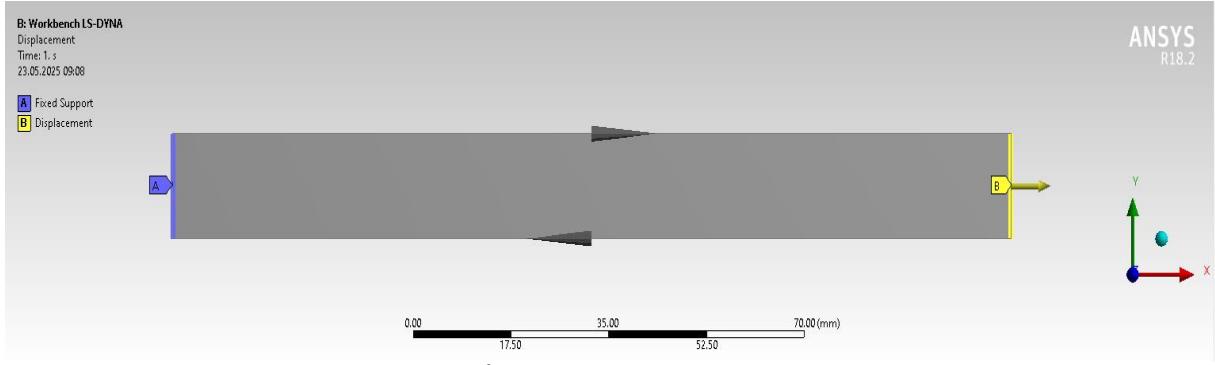
Görselde görüldüğü gibi, numunenin ortasından simetrik olacak şekilde iki adet Modeling Ply tanımlanmış; her bir Modeling Ply için dört katman oluşturulmuştur. Alt kısımdaki görselde ise bu Modeling Ply katmanlarına ait elyaf yönleri ve Oriented Selection Set yönleri yer almaktadır. Burada “90° yönü” elyafların yönlenmesini ifade etmektedir. Yeşil oklar elyaf yönünü, mor oklar ise Oriented Selection Set yönlerini göstermektedir.



Şekil 4.21. Modeling fly elyaf yönlü görünüm (90° yönü)

ANSYS ACP (Pre) modülünde tüm işlemler tamamlanıp kaydedildikten sonra, ANSYS Workbench–LS-DYNA modülüne geçilmiştir. Bu aşamada hâlâ ANSYS programı içerisinde çalışılmakta olup, henüz bağımsız LS-DYNA ortamına geçilmemiştir. Workbench–LS-DYNA, ANSYS içerisinde yer alan ve LS-DYNA çözücüsü ile entegre çalışabilen bir modüldür. Bu yapıda, çözümleyici olarak LS-DYNA seçilerek analizler gerçekleştirilir. Bu aşamada, ANSYS Workbench–LS-DYNA ortamında sınır şartları tanımlanmış ve yüklemeler uygulanmıştır.

Aşağıdaki görselde, çekme testine tabi tutulan 0° yönündeki numunenin program içerisindeki modellenmesi görülmektedir. Bu modelde, numunenin en solundaki kenar sabit destek (fixed support) olarak tanımlanmış; en sağdaki kenar ise yer değiştirme (displacement) uygulanarak çekme yönünde uzatılmıştır. Çekme kuvveti ve süre bilgileri, mekanik testte kullanılan değerlerle eşleştirilerek simüle edilmiştir. Bu numune için toplamda 3 mm yer değiştirme uygulanmıştır.

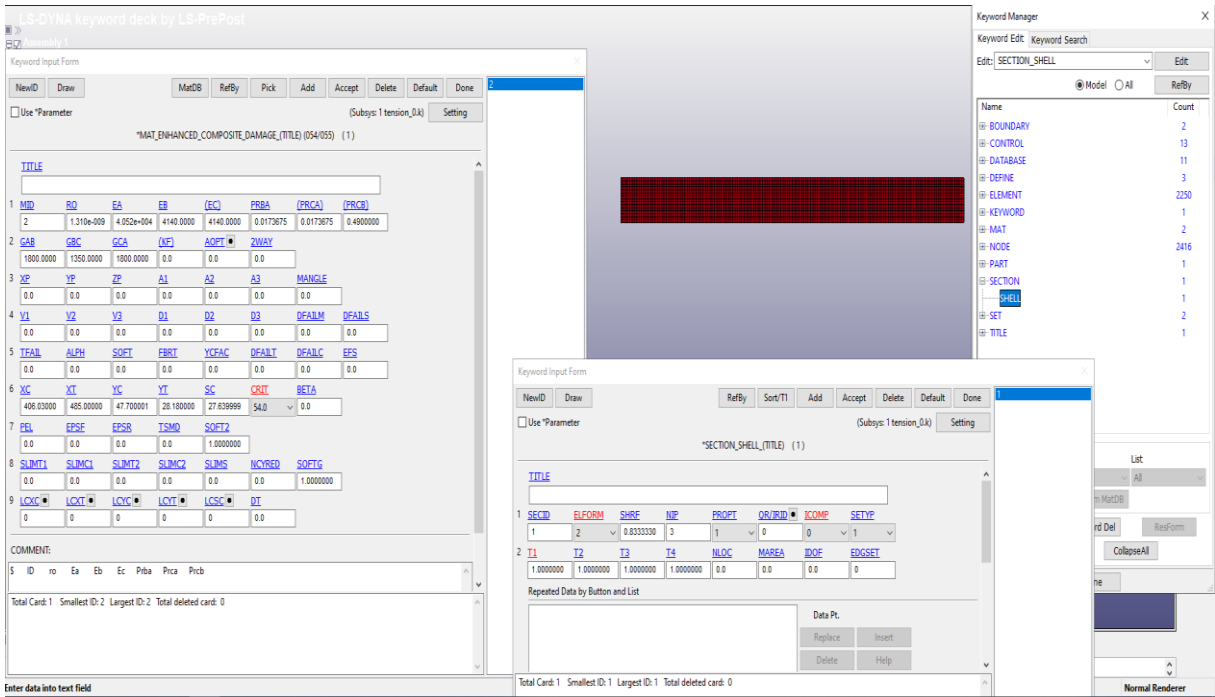


Şekil 4.22. Çekme 0^0 yönü numune sınır şartı ve yüklenmesi

Sınır şartları ve yüklemeler tanımlandıktan sonra, uygulanacak test ve analiz türüne göre analiz ayarlarında gerekli düzenlemeler yapılmış; ardından “key file” çıktısı alınarak LS-DYNA programına geçiş yapılmıştır.

4.5.3. LS-DYNA ve kullanımı

LS-DYNA, yüksek hızda dinamik yüklemelerin ve karmaşık malzeme davranışlarının analizinde kullanılan, explicit (doğrusal olmayan) çözüm yöntemine dayalı sonlu elemanlar analiz (FEA) yazılımıdır. Bu çalışmada, kompozit numunelerin mekanik testlerinin sayısal simülasyonları LS-DYNA üzerinden gerçekleştirilmiş, malzeme modeli, sınır şartları ve yüklemeler bu ortamda tanımlanarak çözümler elde edilmiştir.



Şekil 4.23. LS-DYNA içi pencerelerin görünümü

Yukarıdaki görselde, program içerisinde kullanılan pencerelerin genel görünümü tek bir sayfa üzerinde gösterilmektedir. Bu pencereler arasında; malzeme bilgilerinin girildiği arayüz, parçanın sahip olduğu malzemeyi tanımlama ekranı, malzemenin elastik özelliklerinin belirlendiği bölüm ve sınır şartlarının tanımlandığı ayar pencereleri yer almaktadır. Bu arayüzler, çalışmada sıkça kullanılan ve her analiz öncesinde mutlaka düzenlemeleri yapılan temel bileşenlerdir.

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 tension_0.k) Setting

*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_(TITLE) (054/055) (1)

TITLE

1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
2	2	1.310e-009	4.052e+004	4140.0000	4140.0000	0.0173675	0.0173675	0.4900000
2	GAB	GBC	GCA	(KF)	AOPT	2WAY		
	1800.0000	1350.0000	1800.0000	0.0	0.0	0.0		
3	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	MANGLE	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAILM	DFAILS
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAILT	DFAILC	EFS
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA	
	406.03000	485.00000	47.700001	28.180000	27.639999	54.0	0.0	
7	PEL	EPSF	EPSR	TSMD	SOFT2			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	SLIMIT1	SLIMC1	SLIMIT2	SLIMC2	SLIMS	NCYRED	SOFTG	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	LCXC	LCXT	LCYC	LCYT	LCSC	DT		
	0	0	0	0	0	0.0		

Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Şekil 4.24. LS-DYNA içinde MAT_054 ayarı

Şekil 4.21'deki ayar penceresi, LS-DYNA yazılımı içerisinde en sık kullanılan ve en kritik ön işlem ekranlarından biridir. Şekil 4.10'daki girdiğimiz mekanik malzeme özellikleri referans alınarak doldurulmuştur. ANSYS Workbench-LS-DYNA modülünden alınan "key file" dosyası içeri aktarıldığında ve malzeme modeli olarak MAT_054: Enhanced Composite Damage seçildiğinde bu pencere kullanıcıya sunulmaktadır. MAT_054, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yönetime bağlı doğrusal elastik davranışlarını ve hasar mekanizmalarını simüle edebilen gelişmiş bir malzeme modelidir. Bu model, özellikle farklı elyaf yönelimlerine sahip katmanların çekme, basma ve kayma davranışlarının ayrı ayrı

tanımlanabilmesine olanak tanıdığı için kompozit analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Pencerede yer alan malzeme parametreleri, ANSYS ortamında Engineering Data kısmında tanımlanmış ve mekanik testler sonucunda elde edilen verilere dayanarak girilmiştir. Analiz öncesinde, test türüne bağlı olarak bu değerlerde küçük çaplı düzenlemeler yapılmaktadır. Bu düzenlemeler, analiz çıktılarına göre deneme–yanılma yöntemiyle tekrar tekrar gözden geçirilmekte ve model üzerinde gerekli uyarlamalar sağlanmaktadır. Tüm ön tanımlamalar ve ayarlamalar tamamlandıktan sonra, analiz Mechanical APDL Product Launcher arayüzü üzerinden başlatılmıştır.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmada elde edilen mekanik test sonuçları ile sayısal analiz çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmakta ve değerlendirmeler yapılmaktadır. Çekme, basma ve kayma gibi farklı yükleme durumlarına ait laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen veriler, grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Aynı şekilde, ANSYS Workbench–LS-DYNA ortamında gerçekleştirilen sayısal simülasyonlara ait gerinim-gerilme eğrileri, deformasyon konturları ve analiz sonuçları da grafiklerle desteklenerek sunulmuştur.

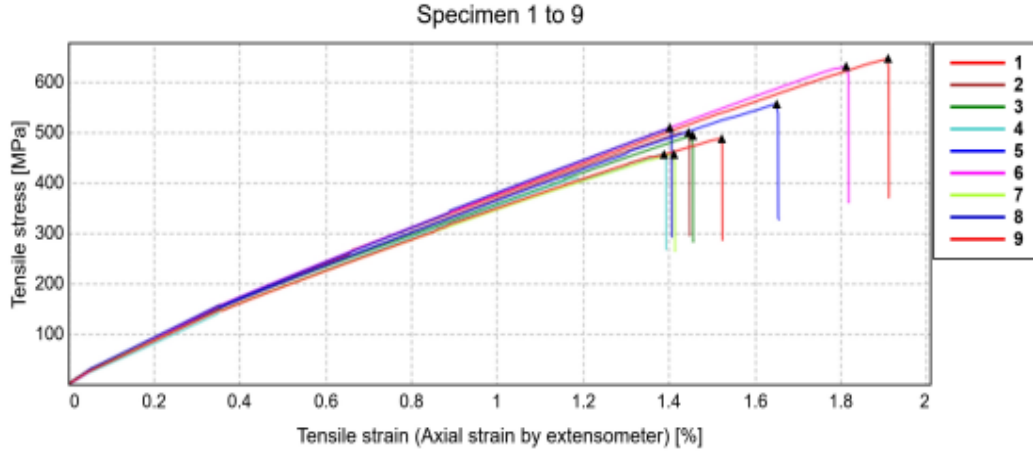
Mekanik testler sonucunda belirlenen malzeme karakteristikleri, LS-DYNA ortamına aktarılmış ve aynı test koşulları altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Böylece, deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle ne derece uyumlu olduğu analiz edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen çıktıların doğruluğu, deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar yardımıyla sorgulanmış ve varsa sapmaların nedenleri tartışılmıştır.

Bu bölümde ayrıca, elde edilen tüm grafiksel veriler detaylı olarak incelenmiş, farklı yönlerde (0° , 90° , $\pm 45^\circ$ vb.) üretilen numunelere ait davranış farklılıkları açıklanmış ve malzeme performansı ile modelleme yaklaşımı üzerine çıkarımlar yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmı, hem kompozit malzeme tasarımı hem de sayısal modelleme sürecinin geçerliliği açısından kritik değerlendirmeleri içermektedir.

5.1. Mekanik Testler

5.1.1. Çekme testleri

Bu bölümde, mekanik testleri gerçekleştirilen numunelere ait test sonuçları paylaşılmıştır. Aşağıdaki görsellerde, 0° ve 90° yönünde yapılan çekme testleri incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bilindiği üzere 0° yönlü numunelerde elyaf yönelimi, çekme yükünün uygulandığı yönde; 90° yönlü numunelerdeki elyaf yönelimi ise çekme yönüne dik olarak hizalanmıştır. Test numuneleri, ASTM D3039 standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneysel süreç bu standardın esaslarına göre yürütülmüştür.



	Specimen label	Width [mm]	Thickness [mm]	Gauge length [mm]	Cross section area [mm ²]	Poisson's ratio (Chord)	Modulus at Chord modulus (%0.1 - 0.3) [GPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Tensile strain (Axial strain by extensometer) at Maximum Load [%]	Maximum Load [kN]
1	1	15.08	1.05	150.00	15.83	0.007	43.019	646.269	1.909	10.233
2	2	15.05	1.08	150.00	16.25	-0.082	40.975	501.071	1.445	8.144
3	3	15.13	1.10	150.00	16.64	0.005	41.474	493.461	1.453	8.213
4	4	15.11	1.08	150.00	16.32	-0.012	39.049	457.352	1.387	7.463
5	5	15.12	1.07	150.00	16.18	-0.096	39.866	557.114	1.652	9.013
6	6	15.09	1.09	150.00	16.45	-0.005	42.681	631.761	1.813	10.391
7	7	15.10	1.09	150.00	16.46	-0.030	39.365	457.757	1.411	7.534
8	8	15.11	1.08	150.00	16.32	-0.030	42.141	508.398	1.402	8.296
9	9	15.13	1.09	150.00	16.49	-0.029	40.145	488.593	1.522	8.058
Mean		15.10	1.08	150.00	16.33	-0.030	40.968	526.864	1.555	8.594
Standard deviation		0.026	0.015	0.000	0.232	0.036	1.454	70.152	0.193	1.073
C.O.V		0.171	1.344	0.000	1.419	-	3.549	13.315	12.399	12.490

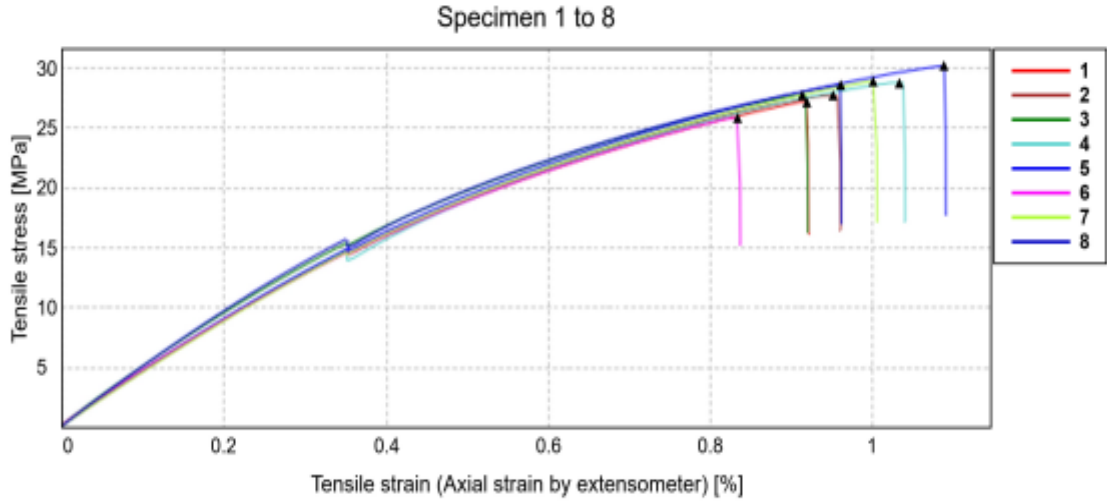
Şekil 5.1. 0° yönü çekme numunelerinin mekanik test sonuçları

Çekme testine tabi tutulan 0° yönlü numunelerin gerilme-gerinim eğrileri ve karşılık gelen mekanik özellikleri Şekil 5.1’de sunulmuştur. Numuneler arasında genel olarak benzer bir davranış eğilimi gözlemlenmiş olup, maksimum çekme gerilmesi ortalama 526.864 MPa, elastik modül ise ortalama 40.968 GPa olarak tespit edilmiştir. Poisson oranı, bazı numunelerde negatif değerlere sahip olsa da bu durum ölçüm tekniği kaynaklı sapmalarla ilişkilendirilebilir. C.O.V (değişim katsayısı) değerlerinin düşük olması, numunelerin tutarlı bir şekilde üretildiğini ve test sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.



Şekil 5.2. 0^0 yönü çekme numunelerinin test öncesi ve sonrası

Şekil 5.2’de, 0^0 yönündeki çekme numunelerinin test öncesi ve sonrası durumları karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Test sonrası fotoğrafta, numunelerde gözle görülür şekilde elyaf kırılmaları ve delaminasyon izleri mevcuttur. Hasarın, çekme yönüne paralel olarak ilerlediği ve çoğunlukla orta bölgede yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, elyaf yöneliminin yük yönüyle aynı doğrultuda olması nedeniyle numunelerin doğrudan elyaf çekmesine maruz kaldığını ve elyafların koparak gövde boyunca kırılmaya neden olduğunu göstermektedir.



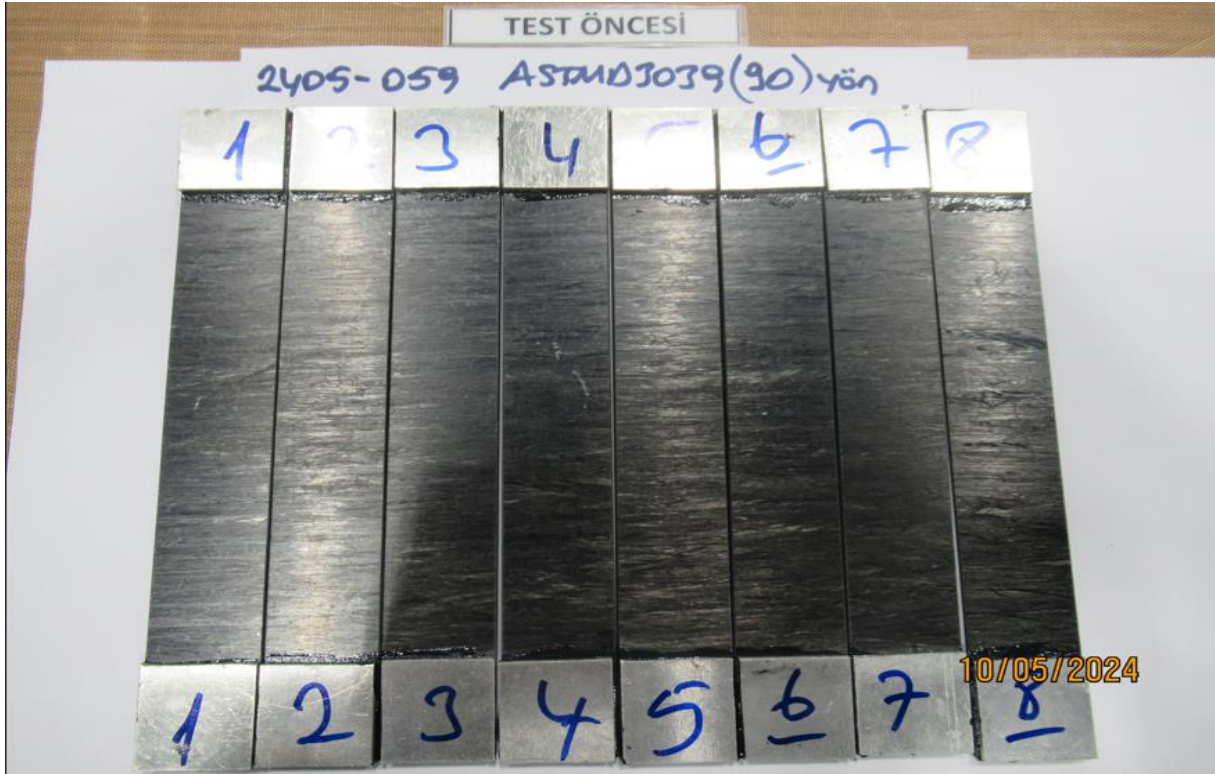
	Specimen label	Width [mm]	Thickness [mm]	Gauge length [mm]	Cross section area [mm ²]	Poisson's ratio (Chord)	Modulus at Chord modulus(0.1 - 0.3) [GPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Tensile strain (Axial strain by extensometer) at Maximum Load [%]	Maximum Load [kN]
1	1	25.11	1.91	125.00	47.96	0.083	4.006	27.244	0.918	1.307
2	2	25.14	1.88	125.00	47.26	0.050	4.084	27.740	0.951	1.311
3	3	25.15	1.84	125.00	46.28	0.021	4.215	27.713	0.912	1.282
4	4	25.10	1.87	125.00	46.94	0.026	4.083	28.836	1.032	1.353
5	5	25.11	1.91	125.00	47.96	0.024	4.128	30.203	1.088	1.449
6	6	25.08	1.88	125.00	47.15	0.024	4.005	25.891	0.832	1.221
7	7	25.10	1.91	125.00	47.94	0.028	4.083	28.959	1.000	1.388
8	8	25.11	1.86	125.00	46.70	0.030	4.364	28.617	0.960	1.337
Mean		25.11	1.88	125.00	47.27	0.036	4.121	28.150	0.962	1.331
STDV		0.023	0.026	0.000	0.636	0.021	0.119	1.301	0.079	0.069
C.O.V		0.090	1.384	0.000	1.346	59.366	2.881	4.620	8.217	5.170

Şekil 5.3. 90° yönü çekme numunelerinin mekanik test sonuçları

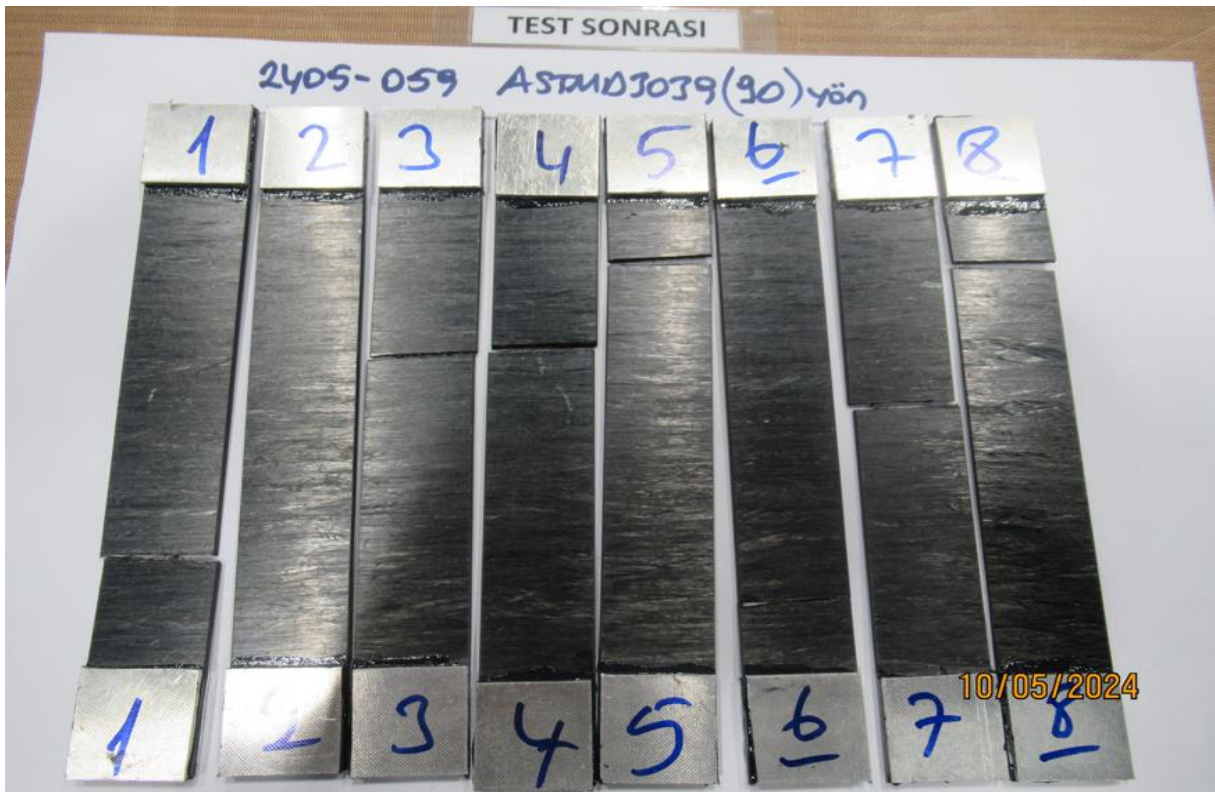
Şekil 5.3'te, 90° yönünde çekme testine tabi tutulan numunelere ait gerilme-gerinim eğrileri ile mekanik özellikler sunulmuştur. Elyafın yük yönüne dik olduğu bu konfigürasyonda, numuneler elyaf yönünde değil, esasen matriksin taşıyıcı olduğu bir şekilde yüklenmiştir. Bu durum, maksimum çekme gerilmesi ve elastik modül değerlerinin oldukça düşük olmasına neden olmuştur. Ortalama maksimum çekme gerilmesi 28.617 MPa, elastik modül ise 4.120 GPa olarak belirlenmiştir.

Poisson oranları pozitif ve tutarlı değerler göstermekte olup, değişim katsayısı (C.O.V) değerleri bu yöndeki numunelerin de kontrollü ve homojen üretildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, 90° yönünde elyaf takviyesinin yük taşıma kapasitesine olan katkısının sınırlı

olduğunu ve esasen matriks malzemenin mekanik performansının öne çıktığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.4. 90° yönü çekme numunelerinin test öncesi

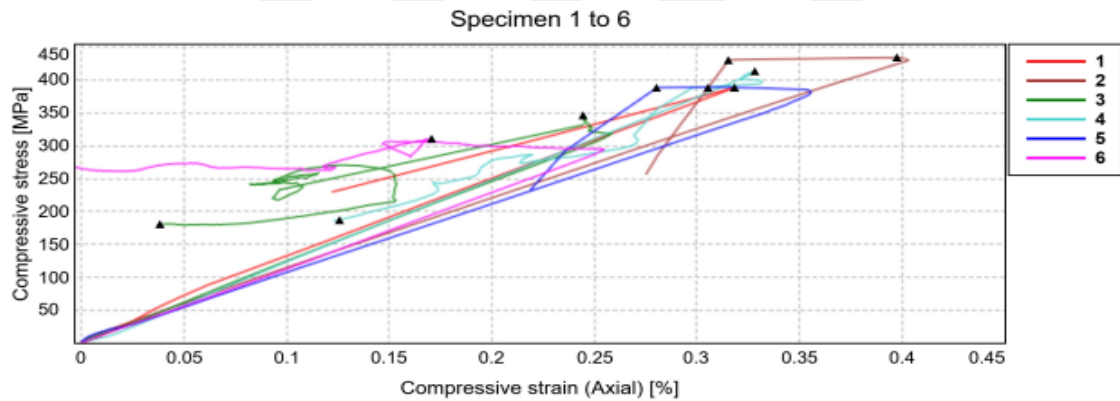


Şekil 5.5. 90° yönü çekme numunelerinin test sonrası

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te, 90° yönünde test edilen çekme numunelerinin test öncesi ve sonrası görünümleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Test sonrasında numunelerde gözlemlenen hasar, genellikle yüzeysel çatlaklar ve elyaf-matris ayrılmaları şeklinde olup, kırılma çoğunlukla düzgün ve keskin değildir. Bu durum, elyafların yük yönüne dik konumlanması nedeniyle yük taşımanın büyük oranda matriks malzeme tarafından karşılandığını ve dolayısıyla düşük dayanımlı, gevrek kırılma eğilimi sergilediğini göstermektedir.

5.1.2. Basma testleri

Bu bölümde, mekanik testleri gerçekleştirilen numunelere ait basma test sonuçları paylaşılmıştır. Aşağıdaki görsellerde, 0° ve 90° yönünde yapılan basma testleri incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bilindiği üzere 0° yönlü numunelerde elyaf yönelimi, basma yükünün uygulandığı yönde; 90° yönlü numunelerdeki elyaf yönelimi ise basma yönüne dik olarak hizalanmıştır. Test numuneleri, ASTM D3410 standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneysel süreç bu standardın esaslarına göre yürütülmüştür.

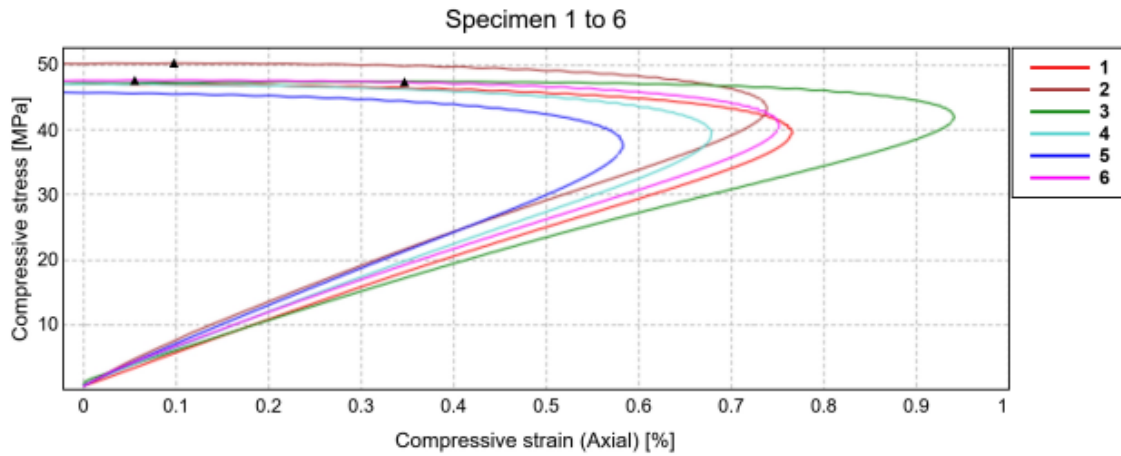


	Specimen label	Width [mm]	Thickness [mm]	Gauge length [mm]	Area [mm ²]	Modulus (Chord) [GPa]	Poisson Ratio	Compressive stress at Maximum Load [MPa]	Compressive strain (SGB1) at Maximum Load [%]	Maximum Load [kN]
1	1	10.200	2.060	20.000	21.012	117.3615	0.795	388.528	0.319	8.164
2	2	10.200	2.090	20.000	21.318	105.7685	0.588	433.797	0.398	9.248
3	3	10.190	2.100	20.000	21.399	120.3547	0.352	346.759	0.244	7.420
4	4	10.180	2.060	20.000	20.971	124.7438	0.472	412.646	0.328	8.654
5	5	10.180	2.050	20.000	20.869	104.1528	0.575	389.163	0.305	8.121
6	6	10.180	2.100	20.000	21.378	116.3371	0.468	310.631	0.171	6.641
Mean		10.188	2.077	20.000	21.158	114.7864	0.542	380.254	0.294	8.041
Standard deviation		0.010	0.023	0.000	0.233	8.168	0.151	44.796	0.078	0.916
Coefficient of variation		0.097	1.084	0.000	1.102	7.116	27.849	11.780	26.512	11.396

Şekil 5.6. 0° yönü basma numunelerinin mekanik test sonuçları

Şekil 5.6'da, 0° yönünde basma yüküne maruz bırakılan numunelere ait gerilme-gerinim eğrileri ile karşılık gelen mekanik veriler sunulmuştur. Elyafların yük yönüne paralel hizalandığı bu konfigürasyonda, numuneler yüksek basma dayanımı göstermiştir. Ortalama maksimum basma gerilmesi 380.254 MPa, ortalama elastik modül ise 114.786 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, elyaf yöneliminin yük taşıma kapasitesine olan katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

Test numuneleri arasında gözlemlenen sapmalar oldukça düşüktür. Standart sapma ve değişim katsayısı (C.O.V) değerlerinin düşük çıkması, numunelerin hem üretim hem de test süreçlerinin tekrarlanabilirlik açısından tutarlı olduğunu göstermektedir. Poisson oranları ise ortalama 0.716 olup, numunelerin deformasyon karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. Elde edilen bu veriler, sayısal analizlerle karşılaştırılmak üzere referans olarak kullanılmıştır.



	Specimen label	Width [mm]	Thickness [mm]	Gauge length [mm]	Area [mm ²]	Modulus (Chord) [GPa]	Poisson Ratio	Compressive stress at Maximum Load [MPa]	Compressive strain (SGB1) at Maximum Load [%]	Maximum Load [kN]
1	1	25.250	2.140	20.000	54.035	5.1046	0.027	47.105	-0.108	2.545
2	2	25.200	2.120	20.000	53.424	5.8324	0.026	50.293	0.099	2.687
3	3	25.220	2.110	20.000	53.214	4.6023	0.032	47.503	0.347	2.528
4	4	25.250	2.120	20.000	53.530	5.5130	0.030	47.180	-0.097	2.526
5	5	25.250	2.120	20.000	53.530	5.8595	0.038	45.889	-0.203	2.456
6	6	25.250	2.120	20.000	53.530	5.2144	0.022	47.698	0.056	2.553
Mean		25.237	2.122	20.000	53.544	5.3544	0.029	47.611	0.016	2.549
Standard deviation		0.022	0.010	0.000	0.270	0.481	0.005	1.457	0.197	0.076
Coefficient of variation		0.086	0.463	0.000	0.504	8.982	18.267	3.061	1265.825	2.967

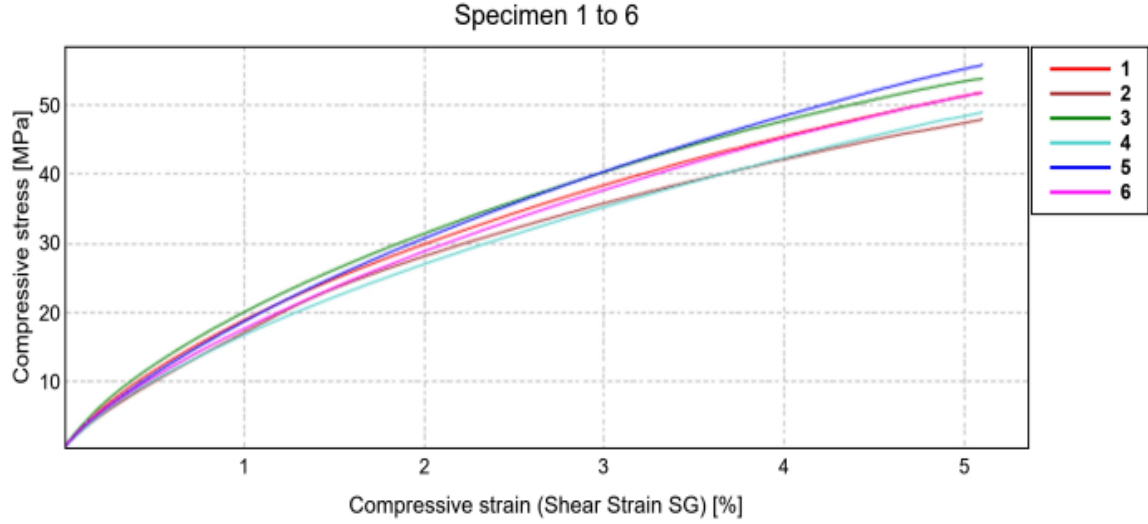
Şekil 5.7. 90° yönü basma numunelerinin mekanik test sonuçları

Şekil 5.7’de, 90° yönünde basma yükü altında test edilen numunelere ait gerilme-gerinim eğrileri ve karşılık gelen mekanik özellikler sunulmuştur. Bu yönde elyaf yönelimi, uygulanan basma kuvvetine dik olarak hizalanmış olup, yük taşıma kapasitesi esas olarak matriks malzeme tarafından karşılanmıştır. Bu nedenle, elde edilen ortalama basma gerilmesi değerleri 47.611 MPa gibi oldukça düşük bir seviyede kalmıştır. Aynı şekilde, elastik modül ortalaması da yalnızca 5.354 GPa olarak hesaplanmıştır.

Gerilme-gerinim eğrilerinde, bazı numunelerde ani kırılma davranışı ve dengesiz deformasyon izleri gözlemlenmiştir. Bu durum, elyaf -matriks etkileşiminin zayıf olduğu yönlerde, malzemenin daha kırılğan davranış sergilediğini göstermektedir. Poisson oranları pozitif ve düşük değerlere sahip olup, deformasyon yönelimi açısından sınırlı yanıt verdiğini işaret etmektedir. Ayrıca, değişim katsayısı (C.O.V) değerlerinin düşük olması, test sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.

5.1.3. Kayma (kesme) testleri

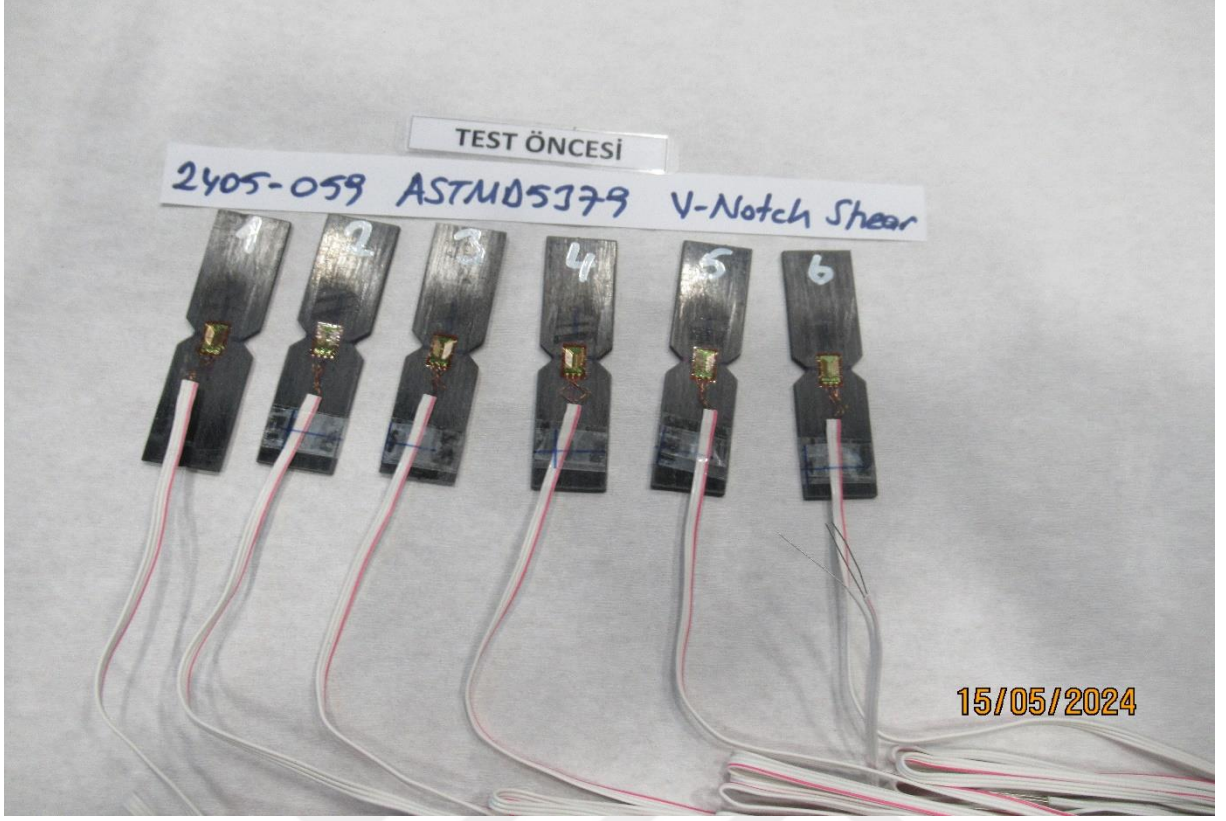
Bu bölümde, mekanik testleri gerçekleştirilen numunelere ait kayma (V-Notch) test sonuçları paylaşılmıştır. Aşağıdaki görsellerde, $\pm 45^\circ$ elyaf yönelimli numuneler üzerinde uygulanan kayma testleri incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bilindiği üzere, $\pm 45^\circ$ yönlü numunelerde elyaflar yükleme eksenine çapraz yerleştiği için, uygulanan yük doğrudan makroskobik kayma deformasyonunu tetiklemektedir. Bu sayede, kompozit malzemenin ara yüzey dayanımı ve matriks deformasyon kapasitesi hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Test numuneleri, ASTM D5379 (V-Notch Shear Test) standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneysel süreç bu standardın esaslarına göre yürütülmüştür.



	Specimen label	Width Across the Notch [mm]	Thickness at the Notch [mm]	Area [mm ²]	Shear Chord Modulus of Elasticity (0.2 % - 0.6 %) [MPa]	Shear Strength at Shear Strain 5 % [MPa]	Offset Shear Strength (0.2 %) [MPa]
1	1	12.200	2.030	24.766	1840.592	51.312	22.861
2	2	12.180	2.020	24.604	1611.630	47.414	24.748
3	3	12.160	2.020	24.563	1930.375	53.457	23.884
4	4	12.230	2.020	24.705	1617.760	48.382	20.974
5	5	12.240	2.020	24.725	1804.625	55.223	24.588
6	6	12.250	2.030	24.868	1665.141	51.255	23.129
Mean		12.210	2.023	24.705	1745.021	51.174	23.364
Standard deviation		0.036	0.005	0.110	132.221	2.952	1.393
C.O.V		0.293	0.255	0.447	7.577	5.768	5.962

Şekil 5.8. Kayma numunelerinin mekanik test sonuçları

Şekil 5.8’de, $\pm 45^\circ$ elyaf yönelimli numuneler üzerinde gerçekleştirilen V-Notch kayma testlerine ait gerilme-gerinim eğrileri ve karşılık gelen mekanik özellikler sunulmuştur. Ortalama kayma modülü (0.2%–0.6%) 1,7450211 GPa, ortalama kayma dayanımı (5% kayma deformasyonunda) ise 51.174 MPa olarak elde edilmiştir. Numuneler arasında gözlemlenen düşük standart sapma ve değişim katsayısı (C.O.V) değerleri, test sonuçlarının tekrarlanabilirliğini ve üretim sürecinin tutarlılığını göstermektedir.



Şekil 5.9. Kayma numunelerinin test öncesi görseli



Şekil 5.10. Kayma numunelerinin test sonrası görseli

Şekil 5.9’da, V-Notch kayma testine tabi tutulan numunelerin test öncesi; Şekil 5.10’da ise test sonrası görselleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Test sonrasında, özellikle V çentik bölgesinde belirgin çatlamlar ve ayrılmalar gözlemlenmiş, bu da kayma yüklemesi sonucunda meydana gelen elyaf-matris etkileşimli hasar mekanizmalarını doğrulamaktadır. Numunelerdeki deformasyon, $\pm 45^\circ$ elyaf yöneliminin kayma etkisine maruz kalması nedeniyle homojen bir dağılım göstermiştir.

5.2. Simülasyonlar (Analizler)

5.2.1. MAT_054 malzeme kartı terimleri

LS-DYNA analizlerinde kullanılan MAT_054: Enhanced Composite Damage modeli, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin doğrusal elastik davranışlarını ve hasar gelişim süreçlerini yönetime bağlı olarak modelleyebilme kapasitesine sahiptir. Bu model, hem elyaf hem de matriks yönündeki çekme, basma ve kayma yüklemeleri için ayrı ayrı mekanik özellik tanımlamalarına olanak tanımaktadır. Modelin doğru şekilde çalışabilmesi için, malzemeye ait elastik modül, Poisson oranı, kayma modülü, çekme/basma dayanımları ve kayma dayanımları gibi mekanik özelliklerin yanı sıra, hasar başlama ve ilerleme davranışını etkileyen birçok parametre de eksiksiz olarak girilmelidir. Aşağıda, analizlerde kullanılan MAT_054 kartına ait temel parametreler ve bu parametrelerin fiziksel anlamları açıklanmıştır [42].

- MID: Malzeme kartı numarasıdır; her farklı malzeme için benzersiz bir ID tanımlanır.
- RO: Malzemenin yoğunluğunu ifade eder (kg/mm^3).
- EA / EB / EC: Elyaf yönündeki (1), elyaf dik (2) ve kalınlık yönündeki (3) elastik modül değerleridir (MPa).
- PRBA / PRCA / PRCB: Poisson oranlarını tanımlar; ana eksenler arasındaki bağlı deformasyon oranlarını temsil eder.
- GAB / GBC / GCA: Kayma modülüdür; ilgili düzlemlerdeki (1–2, 2–3, 3–1) kayma sertliğini tanımlar (MPa).
- XT / XC: Elyaf yönündeki çekme (XT) ve basma (XC) dayanımlarıdır (MPa).
- YT / YC: Elyaf dik yönlerdeki çekme (YT) ve basma (YC) dayanımlarıdır.
- SC: Kayma dayanımıdır; elyaf yönüne dik yönde uygulanan kesme kuvvetlerine karşı dayanımı ifade eder.

- FBRT: Elyaf yönündeki hasar oluşumuna etki eden parametredir; genellikle 0 olarak bırakılırsa otomatik tanımlanır.
- ALPH / SOFT / SOFTG: Hasar yumuşama katsayılarıdır; kırılma sonrası davranışın modellenmesinde kullanılır.
- CRIT: Hasar başlama ölçütü için kullanılan kriterin türünü belirler (örn. Hashin, Tsai-Wu vb.).
- BETA: Hasar kriteri içinde kullanılan oran parametresidir; 0.1 değeri genelde varsayılan olarak seçilir.
- EPSF / EPSR: Elyaf yönünde ve matris yönünde hasar sonrası plastik şekil değiştirme parametreleridir.
- PEL / TSMD: Enerjiye dayalı hasar modellemesi için kullanılan parametrelerdir (isteğe bağlıdır).
- SOFT2 / SOFTG: Hasar sonrası yumuşama eğrisinin karakterini belirler; gerilme-şekil değiştirme eğrisini kontrol eder.

The image shows two windows from the ANSYS LS-DYNA software. The left window is the 'Keyword Input Form' for material card MAT_054. It contains a table of material properties and a list of keywords. The right window is the 'Keyword Manager', which displays a list of keywords and their counts.

ID	ro	Ea	Eb	Ec	Prba	Prca	PrCb
2	1.310e-009	4.052e+004	4140.0000	4140.0000	0.0173680	0.0173680	0.4900000

Keywords and Counts:

Keyword	Count
BOUNDARY	2
CONTROL	13
DATABASE	11
DEFINE	3
ELEMENT	9000
KEYWORD	1
MAT	2
002-ORTHOTROPIC-ELASTIC	1
054/055-ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE	9331
NODE	1
PART	1
SECTION	1

Şekil 5.11. MAT_054 malzeme kartı girdileri

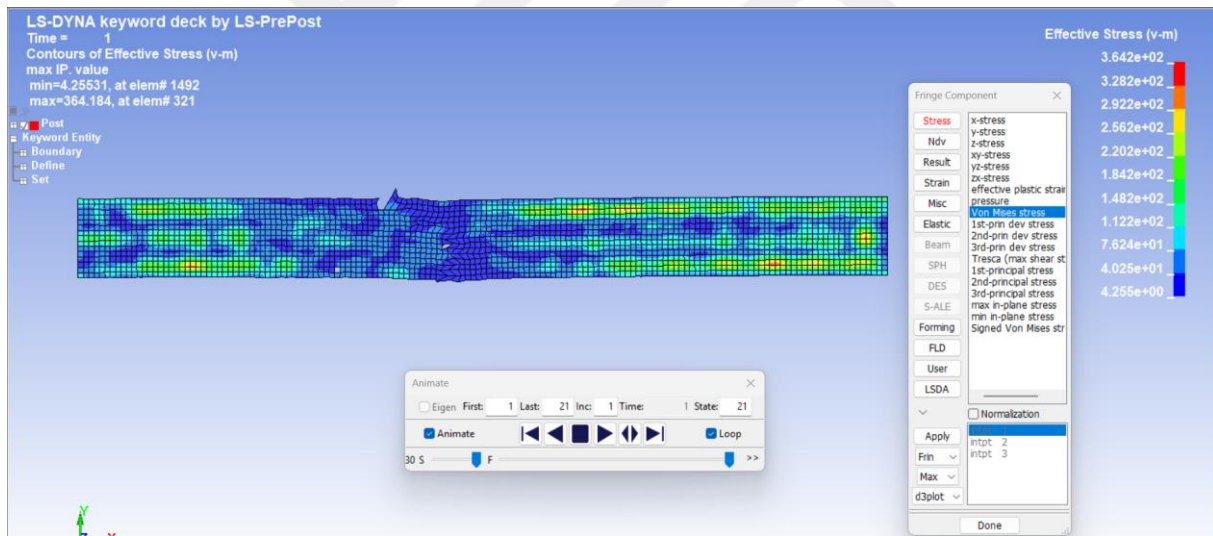
Şekil 5.11’de, LS-DYNA analizlerinde kullanılan MAT_054 malzeme kartının giriş arayüzü görülmektedir. Bu malzeme modeli için, ANSYS Engineering Data kısmında mekanik testler sonucunda belirlenen elastik ve mukavemet özellikleri kullanılmış, aynı değerler LS-DYNA

ortamına da aktarılmıştır. Genel analizlerde bu tanımlamalar esas alınmış olup, analiz türüne (çekme, basma, kayma) ve numune konfigürasyonuna bağlı olarak bazı parametrelerde küçük ölçekli revizyonlar yapılarak MAT kartı güncellenmiştir. Böylece her analiz türüne özel doğru ve kararlı bir malzeme modeli oluşturulması hedeflenmiştir.

5.2.2. Çekme analizleri

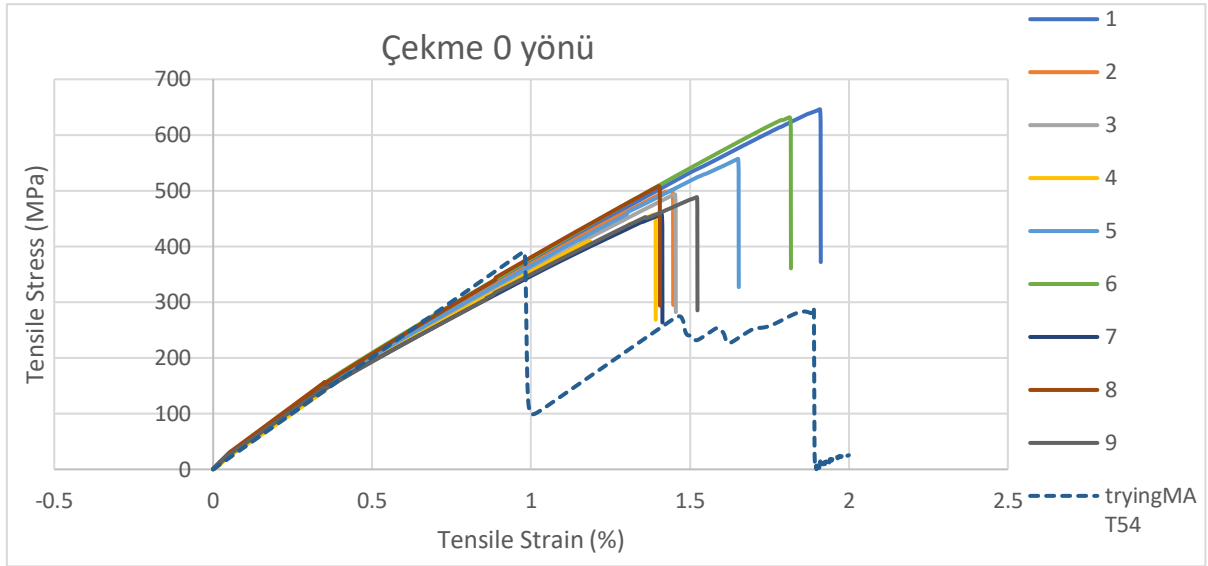
5.2.2.1. Çekme 0° yönü analizi

Bu bölümde, 0° yönünde gerçekleştirilen çekme analizine ait sayısal simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon, mekanik testlerle benzer olarak modellenmiş olup; yükleme koşulları, malzeme tanımlamaları ve sınır şartları test ortamına uygun şekilde LS-DYNA analiz ortamında uygulanmıştır. Elyafların yük yönüne paralel hizalandığı bu konfigürasyonda, çekme kuvveti doğrudan elyaf boyunca iletildiğinden, yüksek dayanım değerleri beklenmektedir. Simülasyon sonuçları, elde edilen mekanik test verileriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.12. Çekme 0° yönü simülasyon sonucu gerilme görseli

Şekil 5.12’de, 0° yönünde gerçekleştirilen çekme analizine ait Von Mises gerilme dağılımı görülmektedir. Elyaf yönüne paralel olarak uygulanan çekme yükü sonucunda, maksimum gerilme 392.425 MPa ile numunenin orta bölgesinde yoğunlaşmış; bu bölgede belirgin bir hasar ve şekil bozulması gözlemlenmiştir. Simülasyon sonucu, deneysel verilerle uyumlu şekilde, elyaf yönünde yüksek taşıma kapasitesine karşılık gelen doğrusal deformasyon ve kırılma davranışı sergilemiştir.

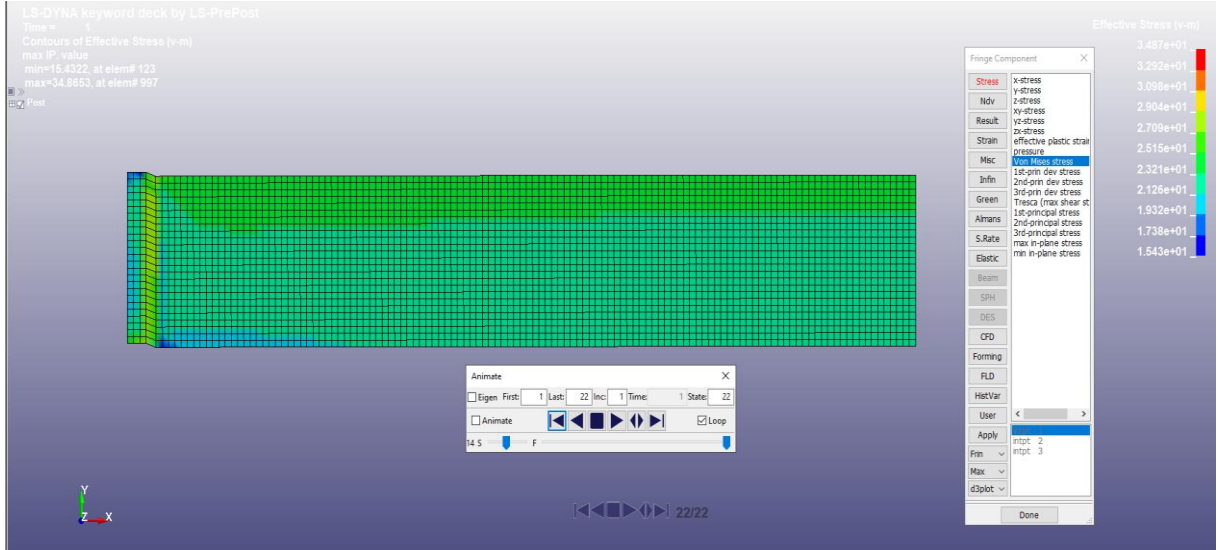


Şekil 5.13. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (çekme 0)

Şekil 5.13’de, 0° yönünde yapılan çekme testlerine ait 9 farklı numunenin gerilme-gerinim eğrileri ile LS-DYNA ortamında elde edilen simülasyon eğrisi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Simülasyon eğrisi (tryingMAT54), genel olarak test sonuçları ile uyumlu bir elastik bölge göstermekte; ancak maksimum gerilme sonrasında gözlemlenen hasar davranışı deneysel verilere kıyasla daha yumuşak bir geçişle modellenmiştir. Simülasyon eğrisinin maksimum gerilme ve kopma noktasındaki sapmaları, hasar yumuşama parametrelerinin ideal seviyede kalibre edilmemesinden kaynaklanabilir.

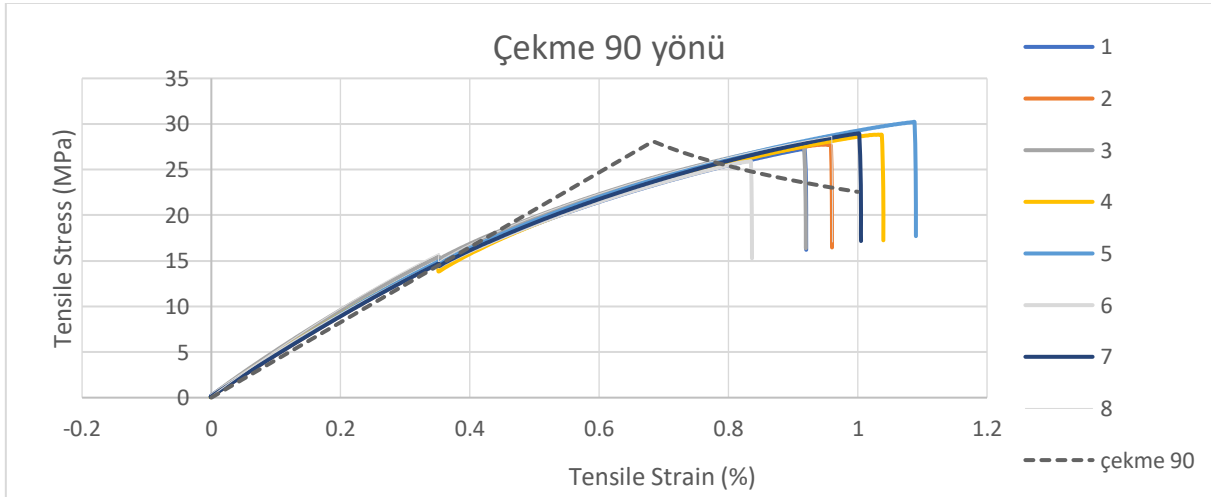
5.2.2.2. Çekme 90° yönü analizi

Bu bölümde, 90° yönünde gerçekleştirilen çekme analizine ait sayısal simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon, mekanik testlerle eş zamanlı olarak modellenmiş olup; yükleme koşulları, malzeme tanımlamaları ve sınır şartları test ortamına uygun şekilde LS-DYNA analiz ortamında uygulanmıştır. Bu konfigürasyonda elyaf yönelimi, çekme yükünün uygulandığı eksene dik olarak yerleştiğinden, yük taşıma kapasitesi esas olarak matriks malzeme tarafından karşılanmaktadır. Bu nedenle simülasyonda düşük dayanım ve deformasyon kapasitesi gözlemlenmesi beklenmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar, mekanik test verileriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.14. Çekme 90° yönü simülasyonu sonucu gerilme görseli

Şekil 5.14'te, 90° yönünde gerçekleştirilen çekme analizine ait Von Mises gerilme dağılımı sunulmuştur. Elyaf yönüne dik olarak uygulanan çekme yükü sonucunda, maksimum gerilme değeri 28.650 MPa olarak tespit edilmiş ve gerilme dağılımı homojen bir şekilde tüm numune boyunca yayılmıştır. Elyafın yük yönüne dik hizalanması nedeniyle yük taşıma kapasitesi esas olarak matris tarafından karşılanmış; bu da düşük gerilme seviyeleri ve sınırlı deformasyon ile sonuçlanmıştır. Simülasyon çıktısı, deneysel bulgularla tutarlı olarak, düşük dayanım ve kırılma öncesi görece daha esnek bir davranış göstermiştir.



Şekil 5.15. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (çekme 90)

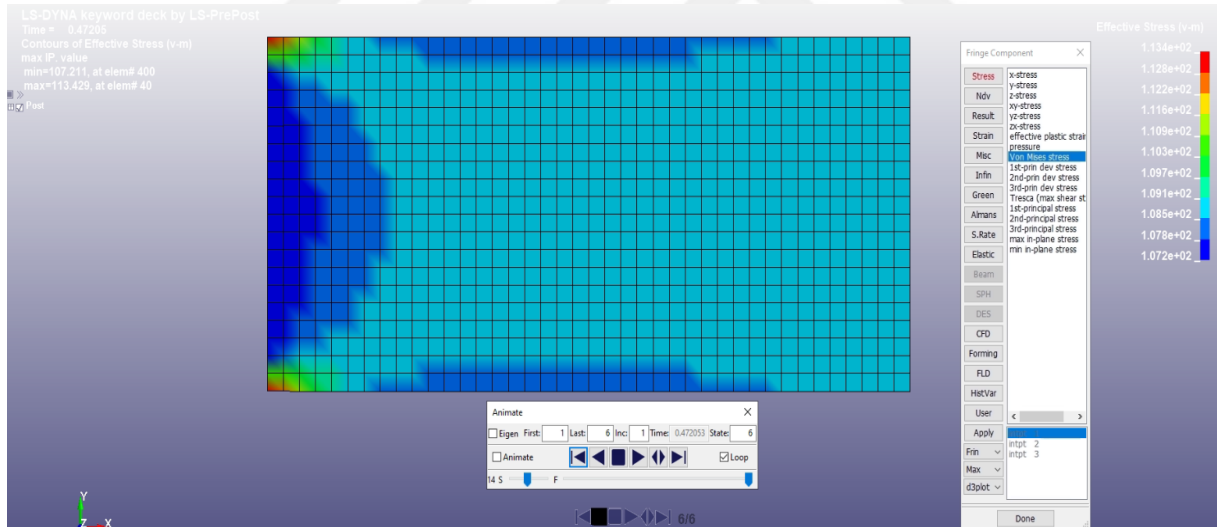
Şekil 5.15'de, 90° yönündeki çekme testlerine ait 8 farklı numunenin gerilme-gerinim eğrileri ile LS-DYNA analizinden elde edilen simülasyon eğrisi birlikte sunulmuştur. Simülasyon eğrisi (çekme 90), elastik bölgede test sonuçlarıyla oldukça benzer bir eğilim göstermiştir. Ancak,

maksimum gerilme değerleri ve kopma noktalarında simülasyon eğrisinin hafif sapma gösterdiği, kopmanın daha ani ve belirgin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, hasar başlangıç kriterlerinin veya yumuşama parametrelerinin 90° konfigürasyon için ideal seviyede kalibre edilmemesinden kaynaklanabilir. Elyaf yönüne dik yüklemenin etkisiyle hem deneysel hem sayısal veriler düşük dayanım ve sınırlı deformasyon karakteri ortaya koymuştur.

5.2.3. Basma analizleri

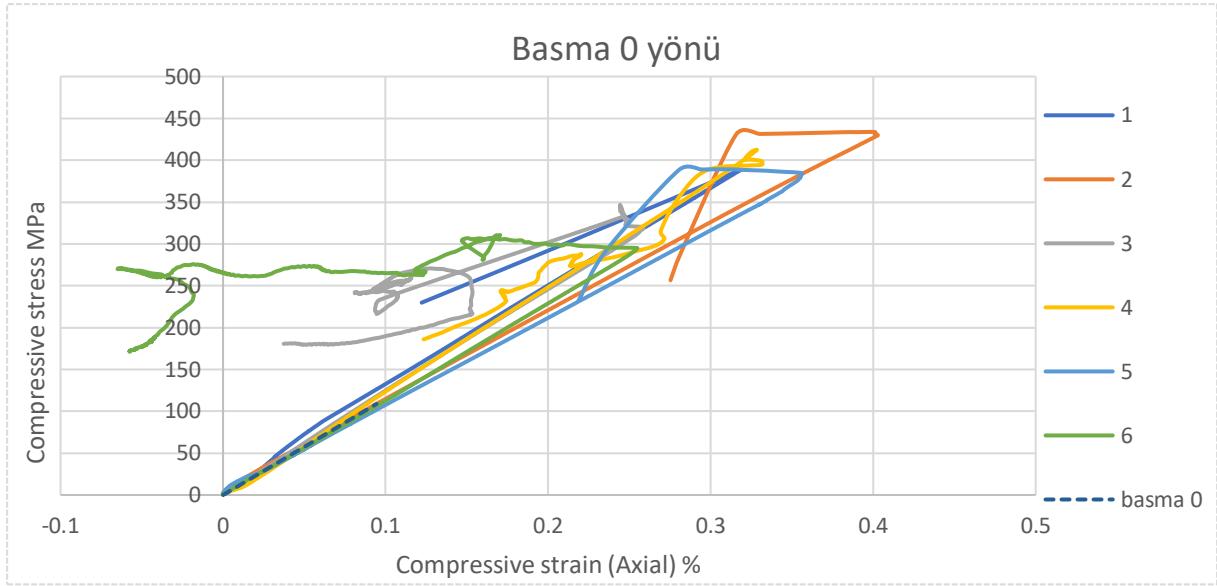
5.2.3.1. Basma 0° yönü analizi

Bu bölümde, 0° yönünde gerçekleştirilen basma analizine ait sayısal simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon, mekanik test süreciyle eş zamanlı olarak modellenmiş olup; yükleme koşulları, sınır şartları ve malzeme tanımlamaları, deneysel koşullarla birebir uyumlu olacak şekilde LS-DYNA ortamında tanımlanmıştır. Elyafların yük yönüne paralel hizalandığı bu konfigürasyonda, uygulanan basma yükü elyaflar boyunca aktarıldığından, yüksek rijitlik ve basma dayanımı beklenmektedir. Simülasyon çıktıları, ilgili mekanik test verileriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar genel uyum düzeyinde analiz edilmiştir.



Şekil 5.16. Basma 0° yönü simülasyon sonucu gerilme görseli

Şekil 5.16’da 0° yönünde gerçekleştirilen basma analizine ait Von Mises gerilme dağılımı sunulmuştur. Elyafların yük yönüyle aynı doğrultuda hizalandığı bu konfigürasyonda, yüksek dayanım ve rijitlik sergilenmiş; maksimum gerilme değeri 113.429 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme yoğunluğu özellikle numunenin her iki uç bölgesinde daha belirgin olup, orta bölgede dengeli bir yük aktarımı gözlemlenmiştir.

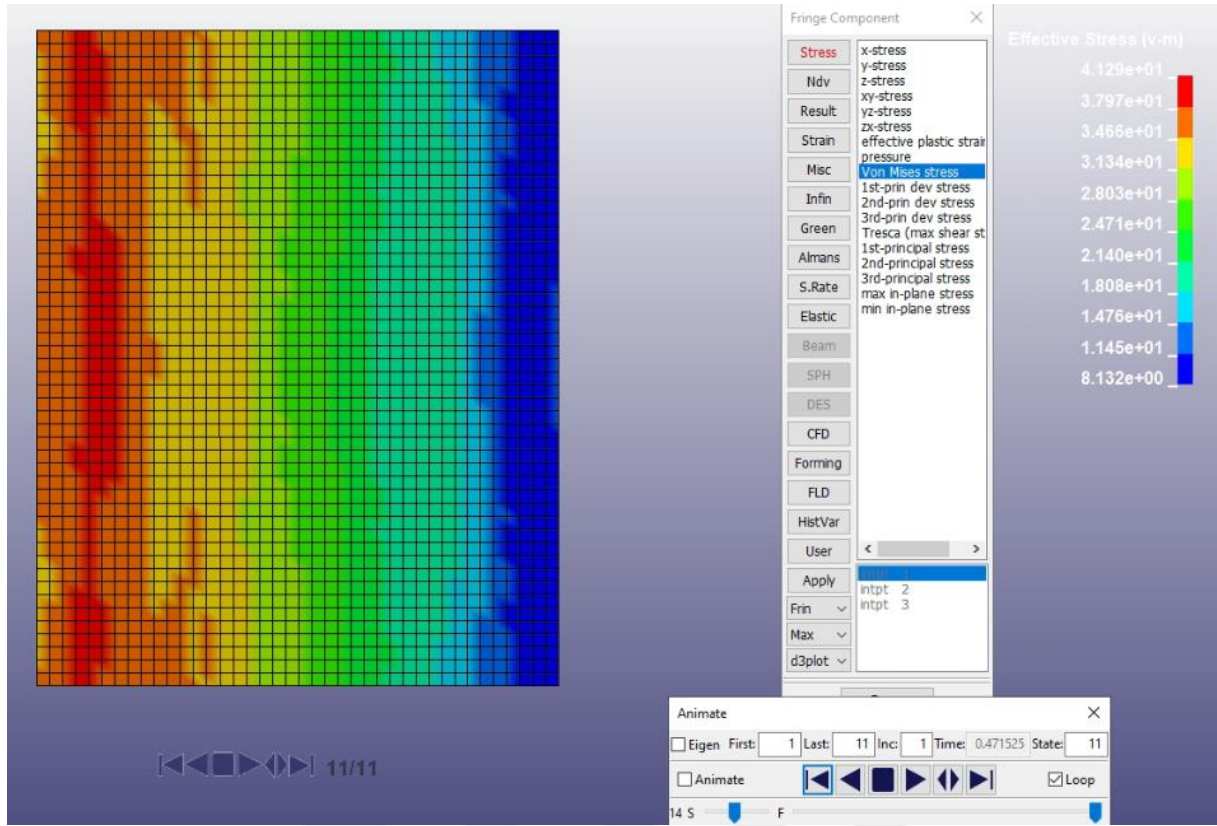


Şekil 5.17. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (basma 0)

Şekil 5.17’de, 0° yönünde gerçekleştirilen basma testlerine ait altı farklı numunenin gerilme-gerinim eğrileri ile LS-DYNA simülasyonundan elde edilen analiz eğrisi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Test sonuçları, özellikle plastik bölgedeki sapmalar ve kırılma sonrası davranışlar açısından belirgin varyasyonlar göstermektedir. Simülasyon eğrisi (basma 0), elastik bölgede deneysel verilerle yüksek oranda uyum sağlamış ve benzer açıda bir doğrusal artış eğilimi sergilemiştir. Ancak simülasyon eğrisi, gerçek numunelere kıyasla oldukça erken hasara uğramış; sonuç olarak malzeme modeli parametrelerinin veya sınır şartlarının basma altında tam anlamıyla fiziksel davranışı yansıtmakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu durum, kompozit malzemelerde basma analizlerinin simülasyon ortamında daha karmaşık olduğunu ve özellikle doğru temas koşullarının, rijit test çenelerinin veya deneysel desteklenme geometrisinin modelleme içerisine dâhil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

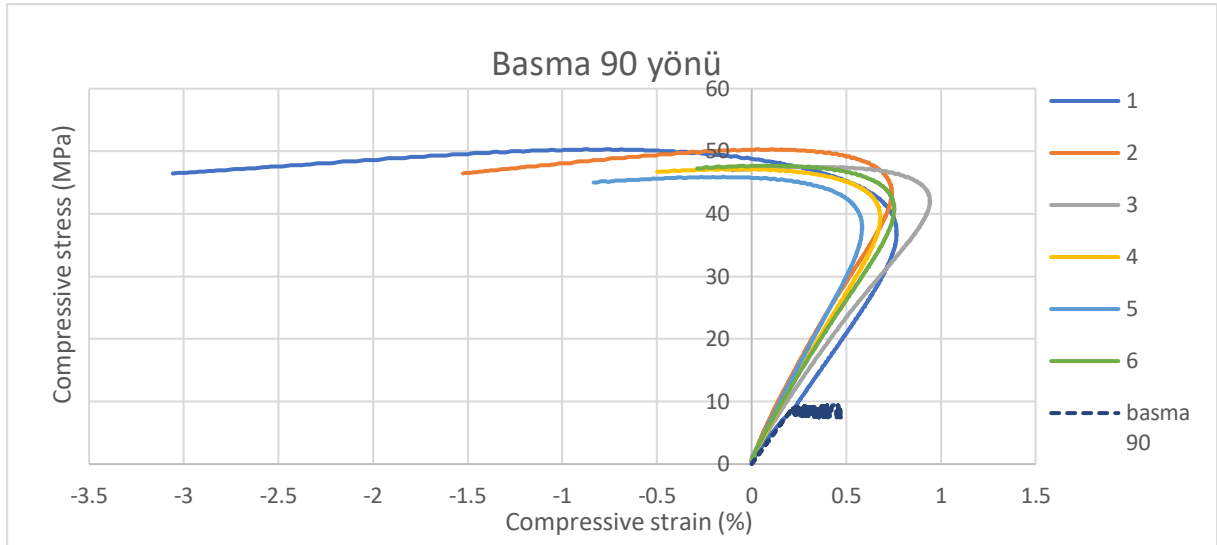
5.2.3.2. Basma 90° yönü analizi

Bu bölümde, 90° yönünde gerçekleştirilen basma analizine ait sayısal simülasyon sonuçları sunulmuştur. Bu konfigürasyonda elyaf yönelimi, uygulanan basma yüküne dik olarak hizalanmıştır. Dolayısıyla, yük taşıma kapasitesinin büyük ölçüde matriks malzeme tarafından karşılandığı ve bu nedenle düşük dayanım değerlerinin gözlemlenmesinin beklendiği bir yapısal davranış öngörülmektedir. LS-DYNA ortamında tanımlanan yükleme koşulları ve sınır şartları, mekanik testlerle uyumlu şekilde modellenmiş; elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.18. Basma 90° yönü simülasyon sonucu gerilme görseli

Şekil 5.18’de, 90° yönünde gerçekleştirilen basma analizine ait Von Mises gerilme dağılımı sunulmuştur. Elyafların yükleme yönüne dik hizalandığı bu konfigürasyonda, yük taşıma kapasitesi esas olarak matriks tarafından karşılanmış ve bu nedenle düşük seviyede gerilme birikimleri gözlemlenmiştir. Maksimum gerilme değeri yaklaşık 41.29 MPa seviyesinde olup, bu gerilme uç bölgelere yayılmak yerine tüm yapı boyunca daha homojen bir dağılım göstermiştir. Simülasyon çıktısında, belirgin bir makro hasar gözlemlenmemiş ve yapı genelinde görece dengeli bir deformasyon profili elde edilmiştir. Bu durum, hem elyaf yönelimiyle ilişkili düşük rijitlik hem de modelde tanımlanan sınır koşullarının etkisiyle açıklanabilir.

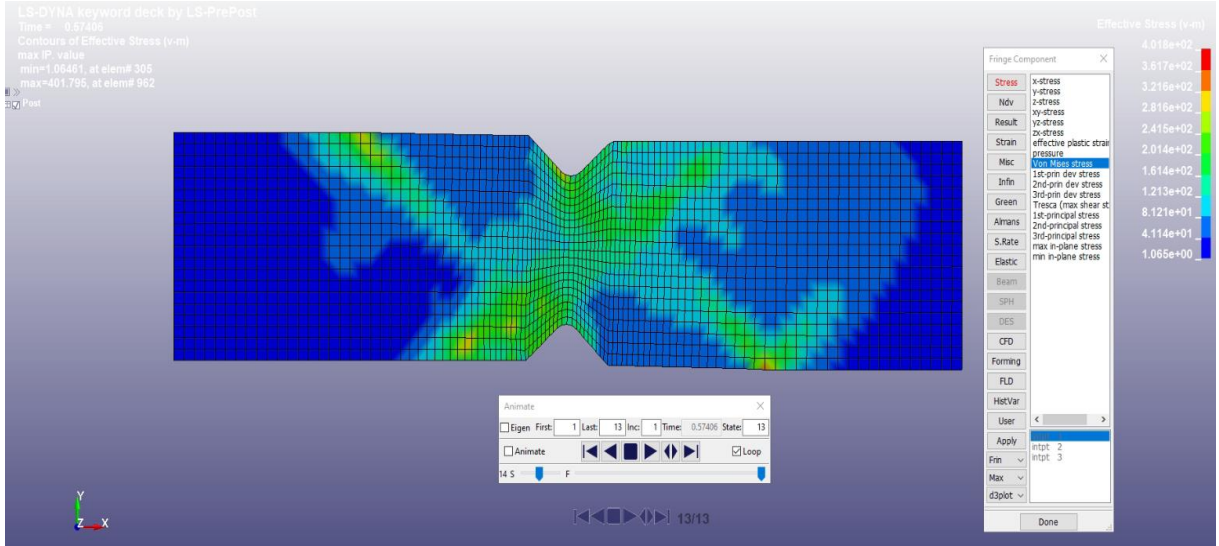


Şekil 5.19. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (basma 90)

Şekil 5.19’da, 90° yönünde yapılan basma testlerine ait altı farklı numunenin gerilme-gerinim eğrileri ile LS-DYNA analizinden elde edilen simülasyon eğrisi (basma 90) karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Test sonuçları, düşük basma dayanımı ve sınırlı deformasyon kapasitesi ile karakterize olup, genel olarak benzer maksimum gerilme seviyelerinde kırılma göstermiştir. Simülasyon eğrisi, elastik bölgede deneysel eğrilerle benzer doğrultuda ilerlemiş olsa da plastik bölgeye geçişte belirgin bir sapma göstermiştir. Özellikle erken deformasyon ve hasar oluşumu nedeniyle simülasyon eğrisinde ani bir kırılma ve düşük akma sonrası dayanım izlenmiştir. Bu durum, elyaf yöneliminin yüke dik olması nedeniyle yapının esas olarak matriks özelliklerine bağlı davranması ve modellemede test çenesi etkileri veya stabilite koşullarının yetersiz temsil edilmesinden kaynaklanıyor olabilir. Dolayısıyla, 90° basma analizlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek adına, temas koşullarının ve kenar sabitleme detaylarının fiziksel test koşullarına daha yakın şekilde modellenmesi gerekmektedir.

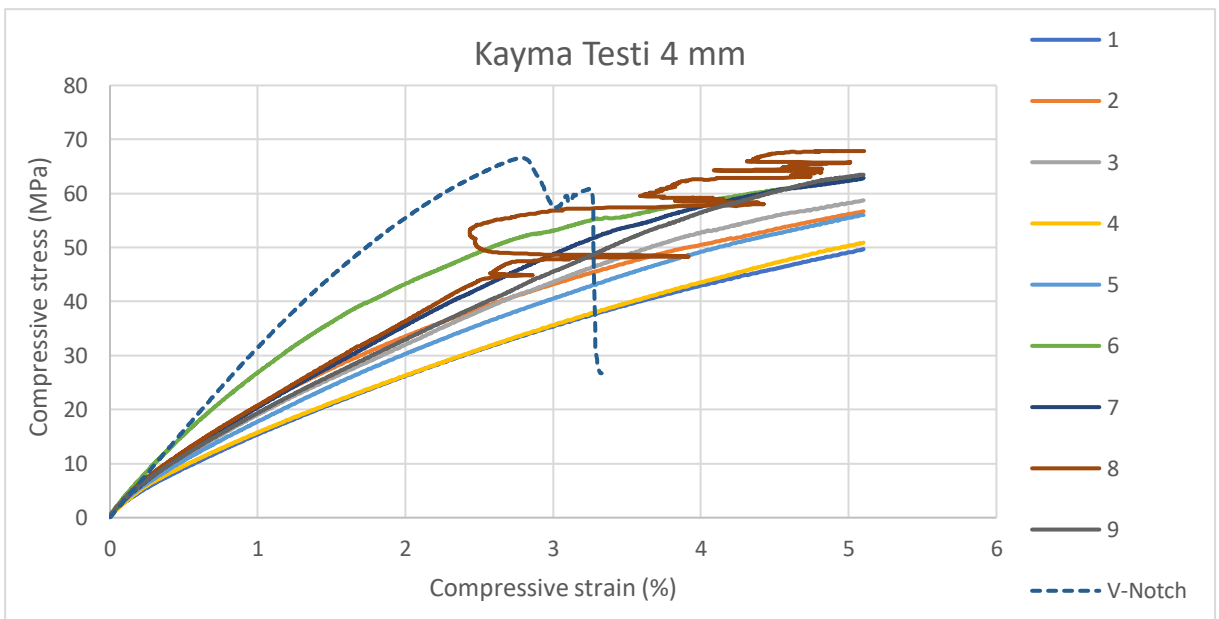
5.2.4. Kayma (kesme) analizi

Bu bölümde, $\pm 45^\circ$ elyaf yönelimine sahip kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen kayma (kesme) analizine ait sayısal simülasyon sonuçları sunulmuştur. ASTM D5379 standardına uygun olarak modellenen V-Notch numuneler hem geometri hem de yükleme koşulları açısından deneysel testlerle eş zamanlı olacak şekilde LS-DYNA analiz ortamında tanımlanmıştır. Simülasyonlarda, özellikle elyaf -matriks ara yüzey davranışları ve kayma deformasyonunun yönetime bağlı etkileri göz önünde bulundurularak, sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.20. Kayma testi simülasyon sonucu gerilme görseli

Şekil 5.20’de, ASTM D5379 standardına uygun olarak modellenmiş V-Notch test numunesi üzerinde gerçekleştirilen kayma analizine ait Von Mises gerilme dağılımı sunulmuştur. Elyafların $\pm 45^\circ$ yönelimiyle yerleştirildiği bu konfigürasyonda, maksimum gerilme değeri 401.795 MPa ve compressive stress değerleri 66 MPa seviyelerinde olup, kayma deformasyonu odaklı olarak özellikle çentik bölgesinde yoğunlaşmıştır. Gerilme dağılımı hem simetrik hem de yönlendirilmiş bir biçimde çentik etrafında yayılım göstermiş ve bu bölgedeki elemanlarda belirgin plastik deformasyon izleri gözlemlenmiştir. Simülasyon çıktısı, gerçek test koşullarına benzer şekilde, ara yüzey kayması ve elyaf-matriks etkileşiminin etkili olduğu bir hasar davranışı ortaya koymuştur.



Şekil 5.21. Mekanik testlerin ve simülasyon sonucunun grafik olarak gösterimi (kayma)

Şekil 5.21’de, 4 mm kalınlığındaki V-Notch numuneler üzerinde gerçekleştirilen kayma testlerine ait dokuz farklı deneysel eğri ile LS-DYNA simülasyonundan elde edilen V-Notch eğrisi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Mekanik test sonuçları genel olarak 40–60 MPa aralığında değişen maksimum gerilme değerleri ve oldukça geniş bir deformasyon aralığı sergilemiştir. Eğriler arasında gözlemlenen dalgalanmalar, elyaf-matriks ayrılması ve numune başına mikroyapısal farklılıklardan kaynaklanan doğal varyasyonları yansıtmaktadır. Simülasyon eğrisi (V-Notch), elastik bölgede deneysel eğrilerle benzer bir eğilim izlese de yaklaşık %3 gerinim seviyesinden sonra ani bir yumuşama ile erken hasar göstermiştir. Bu durum, kesme modunda oluşan hasar mekanizmalarının modellenmesinin zor oluşuna ve ara yüzey davranışlarının hassas tanımlanması gerekliliğine işaret etmektedir. Ayrıca, test düzeneğinde oluşabilecek yerel temas etkilerinin ve çentik geometrisinin, simülasyon modellemesinde daha ayrıntılı temsil edilmesi gerektiği söylenebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında PA6 matrisli, sürekli karbon elyaf takviyeli bir kompozit parçanın mekanik özellikleri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle detaylı biçimde incelenmiştir. Uygulanan çekme, basma ve kayma testleri ile elyaf yöneliminin malzeme davranışları üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmuştur.

Çekme testlerinde, 0° elyaf yöneliminde elyafların yükleme doğrultusunda hizalanmış olması, kompozit yapının en yüksek dayanım ve rijitlik değerlerine ulaşmasını sağlamıştır. 90° yönünde ise, elyaflar yüklemeye dik konumlandığından, matrise dayalı mekanik davranış baskın hale gelmiş ve daha düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları bu davranışları genel hatlarıyla doğrulamakla birlikte; 0° yönü analizinde 392,425 MPa çekme dayanımı öngörülmüştür. Mekanik testlerde ortalama 485 MPa civarında değerler elde edilmiştir. Özellikle 0° yönünde, yüksek dayanım eğilimleri başarıyla yansıtılmıştır.

Basma testlerinde ise, özellikle 90° yönündeki davranışlar dikkat çekmiştir. Elyafların yüklemeye dik yönelimi nedeniyle, matrisin sıkıştırma davranışı ön plana çıkmış; hem testlerde hem de analizlerde düşük ancak kararlı bir gerilme profili elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında 90° yönü için elde edilen ortalama basma dayanımı 41.23 MPa iken, mekanik test sonuçlarının ortalaması 45 MPa civarındadır. 0° basma testlerinde ise, elyafların bükülme ve burkulmaya açık yapısı nedeniyle bazı numunelerde ani deformasyon gözlenmiştir. Bu yönde yapılan simülasyon analizlerinde ise 113.429 MPa'lık bir dayanım değeri tahmin edilmiştir. Bunun aksine, mekanik testlerden elde edilen ortalama değer yaklaşık 350 MPa olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda genel davranış eğilimi benzer şekilde yakalanmış olsa da, erken hasar öngörüsü dikkat çekmiş ve bu durum özellikle 0° yönündeki doğruluğu sınırlamıştır.

Kayma (shear) testlerinde, $\pm 45^\circ$ elyaf yönelimli numuneler üzerinde uygulanan V-Notch yöntemi ile hem mekanik hem de sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Fiberlerin yük yönüne çapraz hizalanmış olması, matriks ve fiber etkileşiminin kayma davranışını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. Simülasyon analizlerinde elde edilen maksimum kayma gerilmesi 401.795 ve bu kaymanın verdiği kayma dayanımı da 66 MPa olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, mekanik test sonuçlarında ortalama kayma dayanımı 58 MPa olarak ölçülmüştür. Simülasyon ve deneysel sonuçlar genel olarak benzer eğilimler göstermiştir; bu da analiz modelinin temel davranışları başarılı bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Bununla

birlikte, küçük sapmalar; test fikstürleri, sınır koşulları ve malzeme parametrelerinin deney ortamına tam uyumlu olmamasından kaynaklanabilir..

Tüm bu bulgular, elde edilen test verilerinin LS-DYNA ortamında modellenmesiyle oluşturulan malzeme kartının genel doğruluğunu ortaya koymakla birlikte; deneysel verilerle birebir örtüşen bir yapı oluşturmanın, yalnızca test sonuçlarını değil aynı zamanda sınır koşullarını, hasar modellerini ve temas etkileşimlerini de doğru şekilde tanımlamaktan geçtiğini göstermiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, incelenen kompozit malzemenin sadece temel mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda tasarlanan parçanın (tunnel bracket) servis yükleri altındaki yönsel davranışlarını da anlamak açısından kritik veriler sunmuştur. Elyaf yöneliminin yapısal dayanım üzerindeki belirleyici etkisi hem deneysel hem sayısal verilerle açıkça ortaya konmuş ve parçanın maksimum yük taşıma kapasitesinin 0° elyaf yönünde olduğu doğrulanmıştır. Sayısal analizler sayesinde, parçanın farklı yükleme senaryolarına karşı performansı sanal ortamda test edilmiş ve hangi yönlerde zayıflık gösterdiği önceden öngörülebilmiştir. Böylece, bu kompozit yapının optimize edilmesi gereken noktaları belirlenmiştir. Elde edilen sayısal değerlendirme ise tasarım sürecine mühendislik açısından yol gösterici bir katkı sağlamıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal bulgular genel olarak uyumlu olsa da analiz sonuçlarının mekanik testlerle birebir örtüşmesi için bazı iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Malzeme modeli kalibrasyonu daha hassas şekilde yapılmalıdır. MAT_054 malzeme modeli, farklı yönlerdeki mekanik davranışları tanımlayabilse de kırılma ve hasar sonrası yumuşama gibi davranışları doğru temsil edebilmek için özellikle SOFT, EPSF, EPSR ve TSMD gibi parametrelerin doğrudan deneysel enerji değerleriyle uyumlu şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir.
- Test sınır şartlarının doğru modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle basma ve kayma analizlerinde kullanılan test çenesi, destek geometrileri ve temas koşulları LS-DYNA ortamına daha fiziksel şekilde aktarılmalıdır. Gerçek test düzeneğinin temas etkileri, analiz sonuçlarının doğruluğunu ciddi şekilde etkilemektedir.
- Delaminasyon, elyaf kırılması ve matriks çatlağı gibi hasar modları simülasyonlara daha detaylı şekilde entegre edilmelidir. Bunun için MAT_261 gibi daha gelişmiş kompozit

malzeme modelleri ya da cohesive zone model (CZM) gibi hasar alt modelleri kullanılabilir.

- Simülasyonlarda mesh boyutu, eleman tipi ve çözüm süresi gibi sayısal parametrelerin hassasiyet çalışmaları yapılmalıdır. Özellikle yüksek deformasyon içeren kayma analizlerinde daha ince mesh ve saat yönlü/karşı yönlü elyaf hizalamalarının ayrı ayrı modellenmesi önerilir.
- Analizlerin geçerliliğini artırmak amacıyla doğrulama testlerinin çeşitlendirilmesi (örneğin darbeli yükleme, çevrimsel yükleme) ve sonuçların farklı koşullarda test edilmesi faydalı olacaktır. Böylece oluşturulan malzeme kartının daha geniş bir uygulama yelpazesinde geçerli olup olmadığı test edilebilir.
- Son olarak, sayısal modellerin tasarıma entegrasyonu sürecinde elde edilen bu çıktılar, gelecekteki optimizasyon çalışmaları ve yapısal tasarım revizyonları için temel veri olarak kullanılabilir. Bu çalışma, özellikle otomotiv ve havacılık gibi yüksek performanslı kompozit parça kullanan sektörlerde benzer uygulamalar için bir referans teşkil edebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çetinkaya, C., Sözer, R. (2021). “Polimer Kompozitlerin Üretiminde Elyaf Oryantasyonunun Etkileri,” *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, Cilt (1), 109-124, 2021.
- [2] Tekyaz, “Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanımı,” *Tekyaz Blog*, May 7, 2021. [Online]. Available: <https://blog.tekyaz.com/kompozit-malzemelerin-genel-ozellikleri-ve-kullanimi>. [Accessed: Mar. 4, 2025].
- [3] Gebel, M. E., Ermurat, M. (2021). *Kompozit Eklemeli İmalat için Polimer Matrisli Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Parça Üretilebilirliğinin Araştırılması*, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 57-67, 2021.
- [4] P. Joyce, “Mechanical Testing of Composites,” *Technical Report*, 2003.
- [5] O. Şentürk, “Kısa Cam Elyaf ve Kalsit Dolgulu Polipropilen Hibrit Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2014.
- [6] M. Motavalli, “Testing Methods Fibre Composites,” *FS18*, 2018.
- [7] M. Helbig, “Material Characterization of Interior Part,” *DYNAmore GmbH*, Technical Report P19-MATA-01, 2019.
- [8] M. J. Wilson, “Finite Element Analysis of Glass Fibre Reinforced Thermoplastic Composites for Structural Automotive Components,” *Ph.D. dissertation, University of Nottingham*, 2003.
- [9] L. A. Carlsson, D. F. Adams, and R. B. Pipes, “Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials,” *Polymer Reviews*, vol. 53, no. 2, pp. 277-302, 2013.
- [10] P. Appelsved, “Investigation of Mechanical Properties of Thermoplastics with Implementations of LS-DYNA Material Models,” *M.S. thesis, Solid Mechanics, KTH Royal Institute of Technology*, 2012.
- [11] A. Arriaga, J. M. Lazkano, R. Pagaldai, A. M. Zaldua, R. Hernandez, R. Atxurra, and A. Chrysostomou, “Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS,” *Polymer Testing*, vol. 25, no. 8, pp. 1003-1015, 2006.
- [12] W. Hufenbach, R. Schirner, and M. Andrich, “Intra- and interlaminar shear behaviour of textile composites tested with V-notched rail shear test method,” *Proc. International Conference on Innovative Technologies*, 2012.
- [13] Shimadzu Corporation, “CFRP Analysis, Testing and Inspection Evaluation Instruments,” *Technical Report C10G-E037*, 2015.
- [14] A. S. Kaddour, M. J. Hinton, P. A. Smith, and S. Li, “Mechanical properties and details of composite laminates for the test cases used in the third world-wide failure exercise,” *Journal of Composite Materials*, vol. 47, no. 20-21, pp. 2427-2442, 2013.

- [15] B. Khaled, L. Shyamsunder, C. Hoffarth, S. D. Rajan, R. K. Goldberg, K. S. Carney, P. DuBois, and G. Blankenhorn, "Experimental characterization of composites to support an orthotropic plasticity material model," *Journal of Composite Materials*, vol. 0, no. 0, pp. 1-26, 2017.
- [16] H. Fahrenholz, "Testing of Advanced Composites," *Zwick Roell*, 2018.
- [17] P. Feraboli, B. Wade, F. Deleo, M. Rassaian, M. Higgins, and A. Byar, "LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen," *Composites: Part A*, vol. 42, no. 10, pp. 1809-1825, 2011.
- [18] F. Karlsson and W. Gradin, "Modelling and Simulation of Composites Crash Tests for Validation of Material Models Using LS-DYNA," *M.S. thesis, Dept. of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology*, 2016.
- [19] N. T. Holt, "Experimental and Simulation Validation Tests for MAT 213," *M.S. thesis, School of Engineering, Arizona State University*, 2018.
- [20] H. Yıldırım, "Değişik Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2009, 237691.
- [21] S. Dubey, Y. K. Sahu, and T. V. Arjunan, "Computational investigation of eco-friendly fiber reinforced composite with the application of Ansys ACP for automobiles," *Journal of Environmental Nanotechnology*, vol. 13, no. 2, pp. 108-114, June 2024.
- [22] A. Memarzadeh, E. C. Onyibo, M. Asmael, and B. Safaei, "Dynamic effect of ply angle and fiber orientation on composite plates," *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, vol. 1, no. 1, pp. 90-110, 2024.
- [23] N. Özsoy, "Polimer Esaslı Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mayıs 2015.
- [24] S. Gülmez, "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler," Yüksek Lisans Projesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye, 2018.
- [25] C.-E. Pelin, G. Pelin, A. Ştefan, E. Andronescu, I. Dincă, A. Ficai, and R. Truşcă, "Mechanical properties of polyamide/carbon-fiber-fabric composites," *Materials and Technologies*, vol. 50, no. 5, pp. 723–728, Oct. 2016.
- [26] M. Taşkiran, "Karbon Elyaf, PTFE ve Yağ Katkılı PA6 Polimer Kompozitlerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Türkiye, 2018.
- [27] J. Liang, Y. Xu, Z. Wei, P. Song, G. Chen, and W. Zhang, "Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 109, no. 6, pp. 3184-3195, 2013.

- [28] D. E. Walrath and D. F. Adams, "Verification and application of the Iosipescu shear test method," Department Report UWME-DR-401-103-1, *NASA-Langley Research Center*, Hampton, VA, USA, June 1984.
- [29] S. M. Semerciöz, "Bor Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2021.
- [30] D. E. Toptaş ve T. Fındık, "Termoplastik Matrisli Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin ANSYS Programı ile Modellenmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, cilt 2, sayı 1, ss. 61-66, 2023.
- [31] M. Zor, "Ortotropik Malzeme Özelliklerinin Teorik Hesabı," *Kompozit Malzeme Mekaniği – Ders Notları*, 23 Ağustos 2024.
- [32] B. Besergil, "Elastiklik Modülü (Elastic Modulus)," *Bilsen Besergil Blogspot*. [Online]. Available: <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/elastiklik-modulu-elastic-modulus.html>. [Accessed: Mar. 4, 2025].
- [33] OMÜ, "Maddenin Fiziksel Özellikleri," Sunum, Maddeler I. GİRİŞ, 2025.
- [34] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering: An Introduction," 10. bs., Hoboken, NJ, ABD: John Wiley & Sons, 2020.
- [35] Belcert, "ASTM Standartları," *Belcert*, 2025. [Online]. Available: <https://www.belcert.com/blog/astm-standartlari/>. [Accessed: Mar. 4, 2025].
- [36] P. K. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design," 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007.
- [37] ResearchGate, "An illustration showing the carbon fibre orientations used in this study," 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/...> [Accessed: Mar. 4, 2025].
- [38] ASTM International, *ASTM D3039/D 3039M – 00: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
- [39] ASTM International, *ASTM D3410/D3410M – 03: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- [40] STM International, *ASTM D5379/D5379M – 05: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [41] M. Zor, Ortotropik Mekanik Özelliklerin Deneysel Tespiti: Kompozit Malzeme Mekaniği Ders Notları, 23 Ağustos 2024.

- [42] LSTC, *LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II: Material Models*, Version R13.0, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, 2023.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Giresun’da tamamladı. 2013 yılında girdiği Cumhuriyet Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden 2018 yılında mezun oldu. Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans öğrenimine 2023 yılında başladı. Ayrıca, 2021 yılında Plascam A.Ş. firmasında Ürün Geliştirme Mühendisi olarak göreve başladı ve halen aynı firmada çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Zıvalı S., Sevim İ., 2025, PA6 Matrisli, Sürekli Karbon Elyafı Malzemenin Mekanik Malzeme Kartının Oluşturulması, *International 14th Marmara Sciences Congress (Imascon Spring 2025)*, 16 – 17 Mayıs 2025.

