



**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN POLİMER  
KOMPOZİTLERİN ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ  
BELİRLENMESİ**

**Abdullah Onur ÖZDEMİR**

**DOKTORA TEZİ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2020**

Abdullah Onur ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN POLİMER KOMPOZİTLERİN ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL

Kimya Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Doç. Dr. Murat DEMİRAL

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 28 / 12 / 2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Cevriye GENCER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım 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, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah Onur ÖZDEMİR

28 / 12 / 2020



# OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN POLİMER KOMPOZİTLERİN ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Abdullah Onur ÖZDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

## ÖZET

Otomotiv endüstrisinde, yakıt sarfiyatının ve buna bağlı olarak karbondioksit emisyonunun azaltılması için, taşıt parçalarının, dayanımdan ödün vermeden, ağırlıklarının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, metal malzemelerin yerini alabilecek, özgül mukavemeti yüksek ve hızlı kalıplanabilme özelliğine sahip termoplastik kompozit parçaların kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, farklı matris/elyaf kombinasyonlarına sahip levha halindeki termoplastik kompozitlerin termoform yöntemiyle kalıpta şekillendirilme sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, öncelikle şekillendirme kusurlarına bağlı olarak en uygun termoform kalıplama parametreleri tespit edilmiştir. Daha sonra, derin çekme deneyleriyle elde edilen uzama verilerine göre şekillendirme sınır diyagramları çizilmiştir. %60 ve %70 cam elyaf oranlarına sahip, polipropilen ve polyamid-6 esaslı kompozit levhaların şekillendirme kabiliyetlerinin incelenmesi için Nakajima test standardı referans alınmıştır. Standartta göre çeşitli gerilme-uzama modları dikkate alınarak, farklı geometrilere numuneler hazırlanmıştır. Uzamaların tespit edilmesi için numune yüzeylerine kare şeklinde markalama yapılmıştır. Şekillendirme zorluğu en fazla olan geometri kullanılarak, numune sıcaklığı, parça derinliği, zımba hızı ve tutma basıncı parametrelerinin, şekillendirme deformasyonuna etkileri tespit edilmiştir. Deformasyonlarla ilişkili elde edilen sınır değerler kullanılarak derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen numunelerin yüzeyindeki ızgara şekillerinde meydana gelen değişimler, uzama durumlarının belirlenmesi için ölçülmüştür. Her kompozit levha için ayrı ayrı kaydedilen bu değerler şekillendirme sınır eğrilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Sonuç olarak, çift yönlü dizilmiş elyaf takviyeli termoplastik kompozit levhaların termoform kalıpta şekillendirilemesinin mümkün olduğu ancak, tek yönlü kompozitlerin derin çekilmesi işleminin başarısız olduğu görülmüştür. İncelenen şekillendirme parametreleri içinde deformasyona en çok parça derinliğinin etki ettiği ve derinlik arttıkça parçada meydana gelen kusurların arttığı belirlenmiştir. Şekillendirme işlemi için en uygun numune sıcaklığının yumuşama sıcaklığı olduğu, sıcaklık azaldıkça şekil vermenin zorlaştığı belirlenmiştir. Tutma basıncı ve zımba hızının yüksek olması, yırtılma ve delaminasyonların artmasına yol açmıştır. Şekillendirme sınır diyagramları incelendiğinde, polipropilen kompozit levhaların polyamid-6 kompozitlerine göre şekillendirme kabiliyetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elyaf yoğunluğunun artmasının şekillendirmeyi zorlaştırdığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Derin çekme, kompozit levha malzemeler, şekillendirme sınır diyagramı, termoform kalıpta şekillendirme.

Sayfa Adedi : 115

Danışman : Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

# DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT DIAGRAMS OF THE POLYMER COMPOSITES USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

(PhD. Thesis)

Abdullah Onur ÖZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

## ABSTRACT

In the automotive industry, it is targeted to reduce the weight of parts used in vehicles without any loss of strength, in order to reduce the fuel consumption and hence the emission of Carbon dioxide. In this context, it is important to use thermoplastic composite parts, that can replace metal materials, with high specific strength and fast moulding ability. In this study, it was aimed to determine the forming limitations by the thermoforming method of the thermoplastic composite laminates with different matrix/fiber combinations. For this, firstly, the optimum thermoforming parameters were determined depending on the forming defects. Then, forming limit diagrams plotted according to the strain data obtained by deep drawing experiments. The Nakajima test standard was taken as a reference to examine the formability of 60% and 70% glass fiber reinforced polypropylene and polyamide-6 composite laminates. Specimens in different geometries were prepared by considering various stress-strain modes according to the standard. In order to determine the strains, square grids were marked on the specimen surfaces. The effects of specimen temperature, part depth, punch speed and holding pressure parameters on forming deformation were determined by using the most difficult formed specimen geometry. Deep drawing experiments were carried out using the limit values obtained in relation to deformations. The changes in the grid shapes on the surface of the formed specimens were measured to determine the strain states. These values, which are recorded separately for each composite laminate, were used in the creation of forming limit curves. As a result, it was observed that it is possible to forming bi-directional fiber reinforced thermoplastic composite laminates in a thermoform mold, but deep drawing of unidirectional composites failed. Among the forming parameters examined, it was established that the depth of the part affected the deformation most and the failures in the part increased as the depth increased. It was established that the most suitable specimen temperature for the forming process is the softening temperature, and formability becomes more difficult as the temperature decreases. The high holding pressure and punch speed led to increased tearing and delaminations. When the forming limit diagrams were examined, it was founded that polypropylene composite laminates have higher forming capabilities than polyamide-6 composites. It was founded that increasing fiber density makes forming difficult.

Science Code : 91417

Key Words : Deep drawing, composite laminate materials, forming limit diagrams, thermoforming.

Page Number : 115

Supervisor : Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, tez çalıőmam sırasında yardımlarını esirgemeyen, değerli vakitlerini ayırarak çalıőmama yön veren, çalıőmamda büyük emeği olan, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim danışman hocam Prof. Dr. etin KARATAŞ'a, Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU, Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL ve Doç. Dr. Murat DEMİRAL hocalarıma önemli katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Kıymetli varlıklarıyla her zaman yanımda olan, desteklerini her an hissettiğim, çalıőmam boyunca sabırlarını esirgemeyen, hayatıma anlam katan sevgili annem, babam, ağabeyim ve kardeőime manevi desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalıőmasında kullanılan kompozit levha malzemelerin tedarik edilmesine 218M194 kodlu proje kapsamında destek olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve deneysel çalışmalarda kullanılan makine-teçhizatları 07/2018-15 kodlu proje kapsamında sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR .....	9
2.1. Teorik İnceleme .....	9
2.1.1. Kompozit teorisi ve kompozit malzeme modelleri .....	9
2.1.2. Polimer esaslı kompozitler .....	12
2.1.3. Polimerler .....	14
2.1.4. Güçlendirme elemanları .....	18
2.1.5. Termoplastik kompozit levha imalat teknikleri .....	21
2.2. Literatür Araştırması .....	34
3. MATERYAL VE METOD .....	43
3.1. Malzeme .....	43
3.2. Malzeme Karakterizasyonu .....	44
3.2.1. Mekanik testler .....	44
3.2.2. Isıl testler .....	47
3.3. Deneysel Çalışma .....	50
3.3.1. Deney tasarımının oluşturulması .....	50
3.3.2. Numunelerin kesilmesi .....	51

3.3.3. Numunelerin markalanması.....	52
3.3.4. Ön ısıtma.....	53
3.3.5. Deney düzeneğinin kurulumu.....	54
3.3.6. Deneylerin yapılması.....	55
3.3.7. Deformasyonların kontrolü.....	56
3.3.8. Şekil değişimlerinin ölçülmesi.....	56
3.3.9. Şekillendirme sınır diyagramlarının çizilmesi.....	59
3.3.10. Kalınlık değişiminin ölçülmesi.....	60
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	61
4.1. Malzeme Karakterizasyonu Sonuçları.....	61
4.1.1. Çekme testi sonuçları.....	61
4.1.2. Basma testi sonuçları.....	63
4.1.3. Darbe testi sonuçları.....	63
4.1.4. Kayma testi sonuçları.....	64
4.1.5. DSC testi sonuçları.....	65
4.1.6. TGA testi sonuçları.....	66
4.1.7. Yumuşama testleri sonuçları.....	67
4.1.8. Isıtma ve soğuma sonuçları.....	68
4.2. Şekillendirme Deformasyonlarının Değerlendirilmesi.....	70
4.2.1. PP-60 kompozit levha malzemenin şekillendirme sonuçları.....	72
4.2.2. Diğer kompozit levhaların deformasyonlarının incelenmesi.....	84
4.2.3. Ölçüm doğrulama.....	87
4.3. Şekillendirme Sınır Diyagramları.....	89
5. SONUÇLAR.....	97
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	115

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Regülasyon şartları .....	2
Çizelge 3.1. Deney malzemeleri .....	43
Çizelge 3.2. Deney tasarımı .....	51
Çizelge 4.1. Kompozit malzemelerin mekanik ve ısı özellikleri .....	70
Çizelge 4.2. Geri gelme sonrası numune yükseklikleri .....	82
Çizelge 4.3. İncelenen şekillendirme parametrelerinin en uygun seviyeleri .....	90



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Ağırlık ile CO <sub>2</sub> emisyonu arasındaki ilişki.....	3
Şekil 1.2. Taşıt üzerinde malzeme dağılımı.....	4
Şekil 1.3. Yoğunluğa karşı gerilme mukavemeti.....	4
Şekil 1.4. Isıtma ve eşli kalıpla şekillendirme .....	5
Şekil 2.1. Monoklinik malzeme yapısı .....	11
Şekil 2.2. Ortotropik malzeme yapısı .....	11
Şekil 2.3. Enine izotropik malzemelerin yapısı .....	12
Şekil 2.4. İzotropik malzeme yapısı.....	12
Şekil 2.5. Çekme özellikleri karşılaştırması .....	13
Şekil 2.6. Takviye tiplerine göre kompozitler .....	18
Şekil 2.7. Takviye elemanı yapıları .....	19
Şekil 2.8. Bazı güçlendirme elemanlarının karşılaştırması.....	21
Şekil 2.9. Vakum torba ile katılaştırma .....	23
Şekil 2.10. Sıkıştırma kalıplama .....	24
Şekil 2.11. Çift bantlı preste katılaştırma.....	25
Şekil 2.12. Film serme .....	25
Şekil 2.13. Sıkıştırma kalıplama .....	26
Şekil 2.14. Kauçuk blokla kalıplama .....	26
Şekil 2.15. Hidroform şekillendirme .....	27
Şekil 2.16. Derin çekme.....	27
Şekil 2.17. Diyafram şekillendirme .....	28
Şekil 2.18. Katlama.....	28
Şekil 2.19. Haddelme .....	29
Şekil 2.20. Profil çekme.....	29
Şekil 2.21. Parça karmaşıklığına göre otomasyon yöntemleri ve şekil verme seviyeleri....	30

**Sayfa**

Şekil 2.22. Termoform süreci .....	31
Şekil 2.23. Kompozit şekillendirme deformasyon mekanizmaları .....	32
Şekil 2.24. Monoklinik malzemelerde şekillendirme deformasyon ve gerilme biçimleri ...	33
Şekil 2.25. Şekillendirme sınır diyagramı ve olası deformasyon bölgeleri .....	33
Şekil 3.1. Tek yönlü ve ortotropik elyaf oryantasyonları .....	43
Şekil 3.2. Kompozit levha imalatı.....	44
Şekil 3.3. Çekme testi numunesi.....	45
Şekil 3.4. Çekme ve basma testinin yapılışı .....	45
Şekil 3.5. Darbe testinin yapılışı .....	46
Şekil 3.6. Kısa kiriş kayma testinin yapılışı.....	47
Şekil 3.7. DSC anali prensibi.....	48
Şekil 3.8. TGA analiz prensibi.....	48
Şekil 3.9. DSC test prensibi .....	49
Şekil 3.10. VST test prensibi .....	49
Şekil 3.11. Derin çekme numuneleri.....	52
Şekil 3.12. Markalama deseni.....	53
Şekil 3.13. Deney yapılışı .....	55
Şekil 3.14. Kulaklanma.....	56
Şekil 3.15. Düzlemsel elemanların izdüşümleri .....	57
Şekil 3.16. Numune yüzeyinden görüntü alma.....	57
Şekil 3.17. Kafes yapısının değişimi ve değişimin ölçülmesi .....	58
Şekil 3.18. Deformasyon modları .....	59
Şekil 3.19. Şekillendirme sınır diyagramı.....	60
Şekil 3.20. Kalınlık ölçümü .....	60
Şekil 4.1. Uzama-çekme diyagramı .....	62
Şekil 4.2. Çekme dayanımı ve elastik modül karşılaştırması .....	62

**Sayfa**

Şekil 4.3. Basma dayanımı karşılaştırması .....	63
Şekil 4.4. Darbe dayanımı karşılaştırması .....	64
Şekil 4.5. Kayma dayanımı karşılaştırması.....	65
Şekil 4.6. DSC termogramı .....	66
Şekil 4.7. TGA termogramı .....	67
Şekil 4.8. HDT ve VST sıcaklıklarının karşılaştırması.....	67
Şekil 4.9. Zamana bağlı soğuma sıcaklıklarının karşılaştırması.....	68
Şekil 4.10. Farklı tutma basıncı ve derinliğe bağlı olarak pres kuvvetindeki değişim .....	72
Şekil 4.11. Derinliğe bağlı olarak farklı zımba hızları ve numune sıcaklıklarına göre pres kuvvetindeki değişim .....	73
Şekil 4.12. Çift yönlü dizilmiş prepreglerin elyaf yönleri .....	74
Şekil 4.13. Derinliğin kulaklanmaya etkisi.....	74
Şekil 4.14. Numune sıcaklığının kulaklanmaya etkisi.....	75
Şekil 4.15. Tutma basıncının kulaklanmaya etkisi .....	75
Şekil 4.16. Zımba hızının kulaklanmaya etkisi.....	76
Şekil 4.17. Tutma basıncının parça kalınlığına etkisi .....	77
Şekil 4.18. Derinliğin parça kalınlığına etkisi .....	78
Şekil 4.19. Numune sıcaklığının parça kalınlığına etkisi .....	78
Şekil 4.20. Zımba hızının parça kalınlığına etkisi .....	79
Şekil 4.21. Farklı tutma basıncına bağlı olarak parça son yükseklikleri .....	80
Şekil 4.22. Farklı zımba hızına bağlı olarak parça son yükseklikleri .....	80
Şekil 4.23. Farklı numune sıcaklığına bağlı olarak parça son yükseklikleri .....	81
Şekil 4.24. Numune üzerindeki deformasyon bölgeleri.....	87
Şekil 4.25. Ölçümlerin karşılaştırılması.....	88
Şekil 4.26. PP-60'a ait ŞSD .....	91
Şekil 4.27. PP-70'e ait ŞSD .....	92
Şekil 4.28. PA6-60'a ait ŞSD .....	92

**Sayfa**

Şekil 4.29. PA6-70'e ait ŞSD .....	93
Şekil 4.30. ŞSD'lerin karşılaştırması .....	95



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit levha .....	44
Resim 3.2. Deney düzeneği .....	54
Resim 4.1. Uzun süre ısıtılan numunede sararma .....	69
Resim 4.2. Derin çekilmiş tek yönlü kompozit malzemeler .....	71
Resim 4.3. Ölçüm eksenleri ve noktaları .....	76
Resim 4.4. Derinlik 30 mm iken PP-60 kompozit levhanın delaminasyon durumu.....	82
Resim 4.5. Farklı derinliklerde ve zımba hızlarında PP-60 kompozit levhada oluşan deformasyonlar.....	83
Resim 4.6. Numune sıcaklığının deformasyona etkisi.....	83
Resim 4.7. Tutma basıncının değişimine göre deformasyon durumu .....	84
Resim 4.8. 0,4 MPa tutma basıncıyla derin çekilmiş PP-70 ve PA6-70 numuneleri .....	85
Resim 4.9. 120 mm/dk zımba hızında şekillendirilmiş PP-70 ve PA6-60 kompozit levhaların deformasyonları .....	86
Resim 4.10. Çekme derinliğinin fazla olması durumunda PA6-60, PP-70 ve PA6-70 kompozit levhaların deformasyonları .....	86
Resim 4.11. CMM ile koordinat ölçme .....	87



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$c$	Bağımsız değişken
$d_0$	İlk çap
$E$	Elastik modül
$e_b$	Büyük birim şekil değiştirme
$e_k$	Küçük birim şekil değiştirme
$F$	Kuvvet
$G$	Kayma modülü
$h$	Şekil verme derinliği
$k$	Köşegen uzunluğu
$l$	Boy uzunluğu
$mW$	miliWatt
$P$	Tutma basıncı
$R, r$	Yarıçap
$T$	Sıcaklık
$t$	Kesit kalınlığı
$t_i$	Numune başlangıç kalınlığı
$t_s$	Numune son kalınlığı
$t_0, t_2, t_4, t_6, t_7$	Kalınlık ölçme kesitleri
$u$	Şekil değiştirme oranı
$V$	Zımba hızı
$\nu$	Poisson oranı
$y$	Düşey yön
$w$	En uzunluğu
$x$	Yatay yön
$\Delta k$	Köşeler arası uzama

**Simgeler****Açıklamalar**

$\Delta l$	Boyda uzama
$\Delta T$	Sıcaklık farkı
$\Delta w$	Ende uzama
$\alpha$	Başlangıç açısı
$\beta$	Deformasyon sonrası açı
$\varphi$	Ölçüm noktalarının açısal konumu
$\gamma$	Kayma açısı
$\sigma$	Normal gerilme
$\tau$	Kayma gerilmesi

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>1B</b>	Bir Boyutlu
<b>2B</b>	İki Boyutlu
<b>3B</b>	Üç Boyutlu
<b>CMM</b>	Koordinat Ölçme Sistemi
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>DSC</b>	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
<b>HDT</b>	Isıl Sapma Sıcaklığı
<b>ISO</b>	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
<b>PA6-60</b>	%60 elyaf takviyeli Polyamid-6 kompozit
<b>PA6-70</b>	%70 elyaf takviyeli Polyamid-6 kompozit
<b>PP-60</b>	%60 elyaf takviyeli Polipropilen kompozit
<b>PP-70</b>	%70 elyaf takviyeli Polipropilen kompozit
<b>ŞSD</b>	Şekillendirme Sınır Diyagramı
<b>TGA</b>	Termal Gravimetrik Analiz
<b>Ud-PP-60</b>	Tek yönlü %60 elyaf takviyeli Polipropilen kompozit
<b>VST</b>	Vicat Yumuşama Sıcaklığı

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artışla birlikte kentleşme oranının hızla yükselmesi, insan gereksinimlerinin artmasıyla ilişkili olarak teknolojiye gelişmeler ve buna bağlı olarak sanayileşmenin giderek artması, beraberinde çevresel sorunların da artmasına yol açmaktadır [1]. Ülkelerin büyümesiyle birlikte ulaşım, toplumların ve bireylerin yaşamlarında temel bir rol oynamaya başlamıştır. Kişisel hareketlilik ve seyahat eğilimlerinin artmasıyla, günümüzde otomobil sahiplik oranı da artmıştır. Yük taşımacılığı ve nakliye hizmetlerinin daha güvenilir ve hızlı olması ihtiyacı da araç sayısını artırmaktadır. Otomobil, otobüs, kamyon vb. taşıtların daha sık kullanılması trafikteki taşıt sayısının da katlanarak artmasına neden olmaktadır [2]. Bir asırdır taşıtların neredeyse tamamı içten yanmalı motorlarla ve petrol türevi yakıtlar ile çalışmaktadır. Fosil kökenli enerji kaynakları arasında yer alan petrol, dünya ölçeğinde en çok kullanılan enerji kaynağıdır. Bununla birlikte, yenilenemez, geri dönüştürülemez ve rezervleri sınırlı miktardadır [3]. Petrolün yanması sonucu açığa çıkan karbondioksit emisyonu, bulunduğu insan sağlığı için ciddi tehdit oluşturmakta, stratosferdeki ozon tabakasının inceltilerek sera etkisine yol açmakta ve küresel ısınma ile iklim değişikliğine neden olmaktadır [4].

Araştırmalara göre otomotiv sektörü, sera gazı emisyonlarında en büyük payı oluşturmaktadır. Kirletici emisyonlar ile taşıtların enerji tüketimi arasında doğrudan bir ilişki de vardır. Enerji verimliliğinin ve çevre güvenliğinin sağlanması için, otomotiv teknolojisi ve süreçlerini geliştirme çalışmaları son zamanlarda hız kazanmıştır [5]. Öyle ki, zararlı egzoz gazlarının salımı konusunda alınan önlemler bu çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. Taşıtlarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarının azaltılması amacıyla Avrupa Parlamentosu tarafından egzoz gazı salımı ile ilgili bazı sınırlamalar getirilmiştir. Taşıt üreticilerine bu sınırlamalara uymamaları halinde büyük cezai yaptırımlar uygulanması planlanmaktadır. Avrupa Parlamentosu'nun 17/12/2008 tarihli toplantısında karar aldığı düzenlemeye ilişkin değerler Çizelge 1.1'de verilmiştir [6].

Çizelge 1.1. Regülasyon şartları

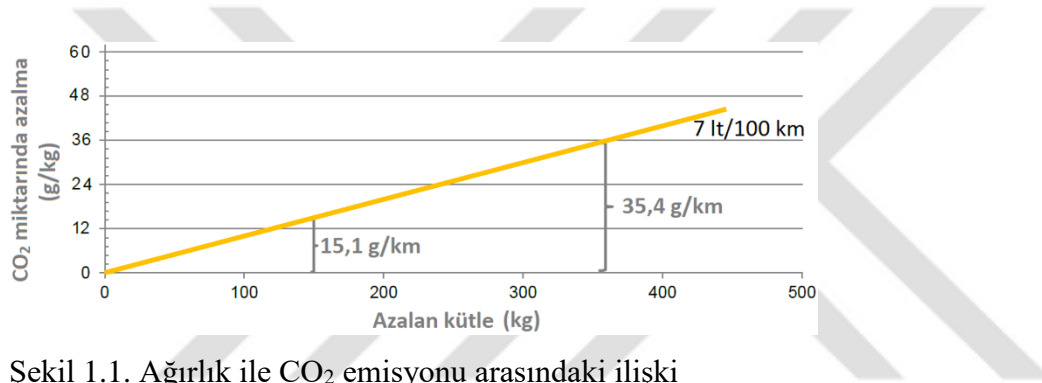
Yıl	2015	2020	2025				
CO <sub>2</sub> (g/km)	130	95	80	+1	+2	+3	>+3
Ceza (Euro)				5	15	25	95

Gerek çevreye olan olumsuz etkilerin azaltılması gerekse enerji verimliliğinin sağlanması amacıyla taşıtlarda yakıt sarfiyatının düşürülmesi istenmektedir. Bu bağlamda, otomotiv sektörü çeşitli araştırma faaliyetleri yürütmektedir. İçten yanmalı motor teknolojilerinin geliştirilmesi ve enerji kullanımının optimize edilmesi için, yeni yanma stratejileri, simülasyonlar, sensörler, kontroller, malzemeler, atık ısı geri kazanımı ve değişken supap zamanlama sistemleri geliştirilmektedir. Motor dışı alanlarda kaybedilen enerjinin azaltılması için, klima gibi yardımcı sistemlerin yük çekmesi düşürülmeye çalışılmaktadır. Aerodinamik (hava direnci) ve harici (frenleme, yuvarlanma vb. dirençleri) kayıpların en aza indirilmesi için uygun tasarımlar geliştirilmektedir. Egzoz gazlarının filtrelenmesi, sürüş şartlarına göre silindir kapama işlevi ve gereksiz rölanti çalışmasının azaltılması için dur-kalk sistemi uygulamaya geçirilmektedir. Yüksek performanslı ve düşük karbonlu alternatif yakıt türleri ile motorların tasarımları uyumlaştırılmaya çalışılmaktadır. Hibrit ve elektrikli araçların güç elektroniği, motorları ve sistem tasarımları geliştirilirken, maliyet ve şarj sürelerini azaltma ihtiyacına yönelik, yeni batarya yönetim sistemleri ile kimyaları üzerine iyileştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar için, maliyet, dayanıklılık ve hidrojen depolama problemlerinin aşılması üzerine kısıtlı da olsa çalışmalar devam etmektedir. Otonom araç teknolojisi için bağlantı ve otomasyon riskleri azaltılmaya çalışılmakta, hesaplama, iletişim ve kontrol destek üniteleri ile yazılımlar geliştirilmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Kara yolu taşıtlarının kullanımını azaltmak için havayolu, demiryolu ve denizyolu ulaşımı büyütülmekte, toplu taşıma giderek daha cazip hale getirilmektedir. Ayrıca, altyapı, bilgi teknolojisi ve insan davranışı arasındaki etkileşimleri içeren akıllı ulaşım sistemlerine de yatırım yapılmaktadır.

Tüm bunların yanı sıra, araştırma faaliyetleri içerisinde hafifletme çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Yüksek mukavemetli çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımları ile birlikte, son yıllarda araştırmalar polimer kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca, maliyet ile performans dikkate alınarak, malzeme teknolojilerinin geliştirilmesiyle, verimlilik ve elektrikli araçlar için menzile artırımına da fırsatlar aranmaktadır. Bu hedefleri yerine getirmede başarılı olunursa ve bu teknolojiler

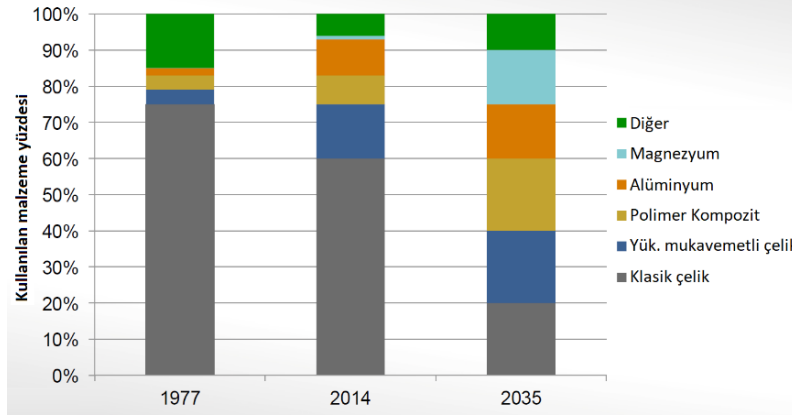
yaygın olarak benimsenirse, petrol kullanımı azalmış olacak, tüketiciler ve işletmeler önemli ölçüde tasarruf etme potansiyeline sahip olacak ve hedeflenen emisyon standartlarına ulaşmaya imkan sağlanacaktır [7].

Şekil 1.1’de verilen grafiğe göre 100 kilometrede ortalama 7 litre yakıt tüketimi olan bir taşıtta; ağırlığın 10 kg düşürülmesiyle CO<sub>2</sub> salımı yaklaşık 1 g/km düşmektedir [8]. Taşıt ağırlığının fazla olması, taşıtın seyir halindeyken karşılaştığı direnç miktarlarının artmasına ve dolayısıyla yakıt tüketiminin yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu yüzden taşıt parçalarının güvenlikten ödün vermeden hafifletilmesi enerji verimliliği ve çevre güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır [9].



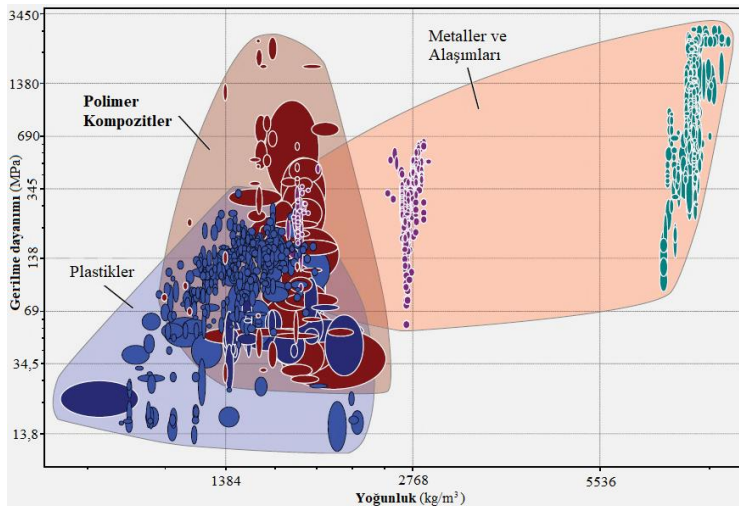
Şekil 1.1. Ağırlık ile CO<sub>2</sub> emisyonu arasındaki ilişki

Yapısal hafifletme, otomobil üreticileri için önde gelen bir stratejidir. Maliyetlerin düşürülmesi, yakıt tüketiminin azaltılması, emisyonların azaltılması, motorun küçültülmesi, süspansiyon gibi ikincil sistemler için kompakt yapıların geliştirilmesi ve malzeme ağırlığının düşürülmesi; otomotiv malzemelerinin ilerlemesinde itici güçler olarak değerlendirilmektedir [10]. Bu nedenle, otomotiv endüstrisi malzeme teknolojileri alanında yenilikçi çözümler arayışını yoğunlaştırmıştır. Bir taşıtta kullanılan malzemelerin yüzde oranları Şekil 1.2’de verilmiştir [11]. Ağırlık azaltma konusunda hafif malzeme olarak öne çıkan polimer kompozit malzemelerdir. Polimerler, işleme şekillerine göre termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yapılarındaki kimyasal bağa bağlı olarak termosetlerde ısıtıldıklarında sürekli bir katılaşma meydana gelirken, termoplastikler ise sıcaklık artışıyla yumuşarlar ve soğutulduklarında tekrar katılaşırlar. Günümüzde termoset esaslı kompozit malzemeler taşıtlarda kullanılmaktadır. Ancak, geri dönüşüm kabiliyetleri bulunmaması, kırılğan olması, seri üretimde zaman alması gibi dezavantajları mevcuttur [12].



Şekil 1.2. Taşıt üzerinde malzeme dağılımı

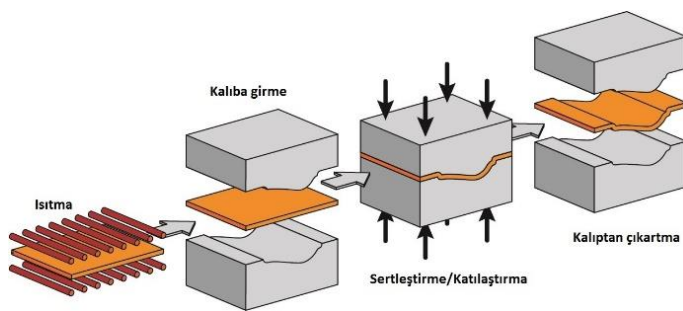
Daha kısa sürede üretim için termoset kompozitlere en yakın alternatif olarak termoplastik kompozitler görülmektedir. Gereksinimleri doğrultusunda otomotiv sektörü ve araştırma merkezleri son zamanlarda termoplastik esaslı kompozitler üzerine bazı teorik çalışmalara başlamışlardır. Termoplastik esaslı polimer kompozit malzemelerin, düşük yoğunluğa, yüksek mukavemete sahip olmalarının yanı sıra korozyona dayanıklı olup, ısı ve ses sönümlenme yetenekleri yüksektir. Çok kısa çevrim sürelerinde nihai ürünün elde edilebilmesi, hasar oluşan bölgelerin ısıtılarak onarılabilmesi ve üretim esnasında elde edilen hurda malzemelerin tamamının geri dönüştürülebilmesi, termoplastik kompozitlerin en büyük avantajları olarak sıralanabilir. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül dayanıma (mukavemet/özgül ağırlık) sahip olmalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı termoplastik kompozitler, ağırlık azaltma çalışmalarında alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımlarıyla rekabet edebilecek, metal malzemelerin yerini alabilecek potansiyel malzeme seçeneğidir [13].



Şekil 1.3. Yoğunluğa karşı gerilme mukavemeti

Metalden kompozit malzemeye geçiş uygulamalarında çeşitli fonksiyonellik, fizibilite ve uyumlaştırma çalışmaları yürütülmektedir. Ham madde temini (bulunabilirlik), yarı-mamül üretimi, parça tasarımı, analiz modelleri, test usulleri, boyut optimizasyonu, işlenebilirlik, birleştirme, prototipleme, seri üretime uyum, dış etkenlere direnç, maliyet düşürme, atık azaltma, ağırlık-performans ilişkisi gibi çalışma başlıklarının yanı sıra şekil verilebilirlik ve imal edilebilirlik araştırmaları oldukça önem içermektedir [14, 15].

Termoplastik kompozit levha imalatı ve şekillendirme işlemleri ekonomik sebeplerden dolayı genellikle ayrı ayrı yapılır. Konvansiyonel kompozit parça üretimi yöntemleriyle (elle yatırma vb.) üretim yapmak, kalıplama sürelerinin uzun olmasına neden olmaktadır. Termoplastik kompozitler, ısıtılarak yeniden şekillendirilebildikleri için termoform yöntemiyle kalıplanması (şekillendirilmesi) mümkündür. Termoform (ısııl şekillendirme) yöntemi levhadan kısa sürede ürün elde etmeyi sağlayan bir kalıplama metodudur. Termoplastik kompozit malzemelerin levha olarak şekillendirilmesi süreci kompozit parçaların daha kısa sürede üretilmesine imkân vermektedir. Termoform şekillendirme süreci Şekil 1.4'te gösterilmiştir [16]. Bu yöntemin ince cidarlı parçalardan büyük boyutlu parçalara kadar geniş bir uygulama alanı vardır. Termoform yöntemi, L/t (boy/kalınlık) oranı yüksek parçaların kolaylıkla şekillendirilmesine imkân sunmaktadır. Termoform işleminde levha, önce ısıtılmakta ve sonrasında eşli kalıpla sıkıştırılarak (veya tekli kalıp / basınçlı hava / vakum yardımıyla) şekillendirilmektedir [17].



Şekil 1.4. Isıtma ve eşli kalıpla şekillendirme

Bu bağlamda, termoplastik kompozit levhaların, otomotiv endüstrisinde kullanımını sağlamak ve yaygınlaştırmak için şekillendirme sırasında olası deformasyon hatalarının (kırışma, incelme, kalınlaşma, boğumlanma, yırtılma, çatlama, kulaklanma, geri gelme) en aza indirilmesini sağlayacak en uygun sıcaklık, pres (zımba) hızı, baskı yastığı kuvveti (tutma basıncı) vb. kalıplama parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir.

Levha halindeki termoplastik kompozitten termoform kalıplama yöntemiyle parça üretimi, sac metal ve termoplastik levhaların kalıpta şekillendirme süreçlerine benzerdir. Sac metal veya termoplastik kompozit levhalardan nihai bir ürün elde etmek için malzemelerin akma dayanımı, sertlik, yüzde uzama gibi mekanik özellikleri ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi yeterli olmamaktadır. Bu özelliklerin yanı sıra üretim süreçlerinde malzemeleri etkin olarak kullanabilmek için şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlenmesi de gerekmektedir.

Günümüzde modern yüksek performanslı bilgisayarlar ve sanal analiz programları, ürün tasarım aşamasındayken, parça ve kalıp geometrisinde oluşabilecek problemlerin üretim öncesinde tespit edilmesine imkân vermektedir. Sanal analiz programlarının gerçeğe yakın sonuç verebilmesi için çalışılan malzemenin özellik ve şekillendirme verilerine ihtiyaç vardır [18]. Otomotiv sanayinin günümüzde henüz yeni çalışmaya başladığı ve deneme yanılma yöntemiyle belirlemeye çalıştığı, termoplastik kompozit levhadan imal edilen parçalar için uygun ürün, kalıp ve süreç tasarımı işlemlerinin zaman ve maliyet açısından ekonomik hale getirilmesi için sanal analiz programlarının ihtiyacı olan şekillendirme verilerinin (şekillendirme ön sıcaklığı, zımba hızı, tutma basıncı ve kalıp geometrisi) bilinmesi gerekmektedir.

Uygun şekillendirme işleminin gelişimi için malzemenin doğru tanımlanması ve deformasyon davranışının doğru belirlenmesi gereklidir. Gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi malzeme karakterizasyonu ile ilgilidir. Bunun yanı sıra uygun test yöntemlerinin seçilmesi ve sonuçların yorumlanması da önemlidir. Bugüne kadar, kompozit malzemelerin şekillendirilmesi, mekanik performans açısından incelenmesi için basitleştirilmiş hasar kriterleri kullanılmış ve kompozit levhalara genellikle homojen muamelede bulunarak makroskobik analiz yöntemleri uygulanmıştır [19]. Termoplastik kompozit levhaların termoform kalıpta şekillendirilme hasarlarının anlaşılması için, bu malzeme sınıfının şekillendirme sınırlarının bilinmesi gerekmektedir. Literatürde yer alan tek lamine özelliklerinin levha kompozitin özelliklerine doğrusal oranlanması yaklaşımı yetersizdir. Teknik-tekstil kompozit levhalar genellikle önceden reçine emdirilmiş prepreg tabakaların kat kat dizilerek kalıplanmasıyla imal edilirler. Sıkıştırma sırasında prepreg kalınlığı ve hacimsel oranı değişime uğrar [20]. Çok katmanlı kompozitlerin şekillendirilmesinde katmanlar arasında kayma (delaminasyon) meydana gelmektedir. Bu durum, nihai ürün kalitesini etkileyen kırılma ve kalınlaşma gibi kusurların oluşmasına yol



açabilmektedir [21]. Bunun gibi şekillendirme kusurlarını belirleyerek süreç optimizasyonunun desteklemesi için termoplastik kompozit levhaların şekillendirme sınır diyagramlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, Kompozit levhanın anizotropik davranışını da içeren derin çekme test prosedürünün incelenmesi önem taşımaktadır.

Öncelikle, termoplastik kompozit levhaların derin çekilerek şekillendirilip şekillendirilemeyeceğinin anlaşılması gerekmektedir. Ayrıca, derin çekme işlemi parametrelerinin katmanlı termoplastik kompozit levhaların şekillendirilebilirliği üzerindeki etkilerini tespit etmek için deneysel bir çalışma yürütülmelidir. Bununla birlikte, termoplastik kompozit levhaların sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak karmaşık deformasyon mekanizmalarının daha doğru modellenmesine olanak sağlayan geometrik haritalar, yani şekillendirme sınır diyagramları elde edilmelidir. Termoform şekillendirme işleminde nihai parça kalınlık dağılımının doğru tahmin edilmesi için bu diyagramlardan yararlanılacak ve şekillendirme sınır eğrileri sayesinde süreç/kalıp tasarımının daha verimli olabilecektir.

Malzemelerin şekil alma sınırlarını, çeşitli şekil değiştirme durumlarına göre, büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranları cinsinden ifade etmek için *Şekillendirme Sınır Diyagramları* (ŞSD) kullanılmaktadır. ŞSD her malzeme için özeldir ve deformasyon şartlarına göre de farklılık göstermektedir. Bu diyagramlar malzemenin şekillendirme sırasında ortaya çıkabilecek problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılırlar.

ŞSD'lerin termoplastik kompozitler için henüz hazırlanmamış olması, termoplastik kompozit levhaların termoform kalıplama özelliklerinin bilinmemesine neden olmakta ve bu nedenle otomotiv endüstrisinde kullanımının yaygınlaşmasına engel teşkil etmektedir.

Bu araştırmada, sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit levhaların derin çekme (üç boyutlu şekillendirme) işleminin deneysel olarak incelenmesi için, hızı ayarlanabilir yarı-küresel zımbaya sahip bir hidrolik pres-kalıp sistemi kullanılmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit levhalar takviye elemanı olarak cam elyaf, matriks elemanı olarak polipropilen ve polyamid içermektedir. Ağırlıkça %60 oranda 0° tek yönlü cam elyaf takviyeli polipropilen, %60 oranda 0/90° yönlü dizilime sahip cam elyaf takviyeli polipropilen, %70 oranda 0/90° yönlü dizilime sahip polipropilen, %60 oranda 0/90° yönlü dizilmiş cam elyaf takviyeli polyamid, %70 oranda 0/90° yönlü dizilmiş polyamid; olmak üzere beş farklı

kompozit levha kullanılmıştır. İlk olarak, kompozit levhaların çekme, basma, darbe ve kayma dayanımları, yeniden kristallenme, yumuşama ve erime sıcaklıkları belirlenmiştir. Daha sonra, kompozit levhalar su jeti yöntemiyle kesilerek Nakajima standardına uygun geometrilerde numuneler oluşturulmuştur. Numuneler öncelikle harici bir ısıtıcıda istenilen sıcaklık değerine kadar ısıtılmış ve ardından derin çekme işlemine tabii tutulmuştur. Derin çekme koşullarının belirlenmesinde kritik öneme sahip; tutma basıncı, zımba hızı, şekillendirme sıcaklığı ve derinlik parametreleri, deformasyon durumlarına göre tespit edilmiş ve bu parametrelerin en uygun seviyelerine bağlı olarak kompozit levhaların şSD'leri oluşturulmuştur. Elyaf oranı ve matriks çeşidine göre termoplastik kompozit levhaların şekillendirme kabiliyetleri karşılaştırılmıştır.



## 2. LİTERATÜR

### 2.1. Teorik İnceleme

Bu çalışmanın kapsamının ve sonuçlarının kavranabilmesi için bu bölümde bazı teorik bilgiler verilmiştir. Bu teorik altyapı, bilimsel yaklaşıma açıklık getirecek içerikte ve bu çalışmanın dışına taşmayan kavramsal bir çerçevede sistematik olarak sunulmuştur.

#### 2.1.1. Kompozit teorisi ve kompozit malzeme modelleri

Kompozit malzemeler; en az iki farklı malzemenin, bileşenlerde tek başına iken mevcut olmayan bazı özellikleri geliştirmek için, makro seviyede bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni bir malzeme sınıfıdır. Çoğu kompozit malzeme, bir takviye elemanı ve onu saran bir de matriks elemanı olmak üzere genellikle iki fazdan oluşur. Uygulamada, büyük ölçüde matriks malzemenin mukavemetini artırmak için takviye elemanı eklenir. Matriks elemanı olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılırken; güçlendirme elemanı olarak genellikle yapay veya doğal elyaflar kullanılmaktadır [22].

Polimer matriksli kompozitler en yaygın kompozit sınıfıdır. Polimer bazlı bir reçine ve cam, karbon, aramid gibi elyaflar içermektedir. Metal matriksli kompozitlerde, matriks olarak diğer elementlere kolayca bağlanma özelliği olan alüminyum gibi bir metal, elyaf olarak silikon karbür gibi oldukça sert parçacıklar ile güçlendirilir. Seramik matriksli kompozitler ise, seramik fazın içerisine bor nitrid gibi elyaf katılarak takviyelendirilir ve sıcaklığın çok yüksek olduğu ortamlarda tercih edilirler [23].

Gerilme ile şekil değiştirme ilişkisi Hooke kanunuyla ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ) ifade edilmektedir. Ancak, simetrik olmayan malzemeler için dayanım ve kinematik durumları biraz karmaşıktır. Kompozit malzemeler genellikle doğrusal elastik davranış sergilerler ve simetrik değildirler. Kompozit malzemelerin makro-mekanik analizi için bazı bağıntılar geliştirilmiştir. En genel gerilim-gerinim ilişkisi kartezyen koordinat sisteminde üç boyutlu bir cisim için Eş. 2.1'de gösterilmiştir. Bu 6x6 matriks sistemi dayanım veya rijitlik matriksi olarak tanımlanmaktadır. Burada,  $\sigma$  normal gerilmeleri,  $\tau$  kayma gerilmelerini,  $\varepsilon$  uzama oranlarını,  $\gamma$  kayma açılarını,  $c$  bağımsız değişkenleri (elastik sabitleri) ve alt

indisler yükleme doğrultularını göstermektedir [24]. 1, 2 ve 3 farklı kaynaklarda sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  olarak da gösterilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

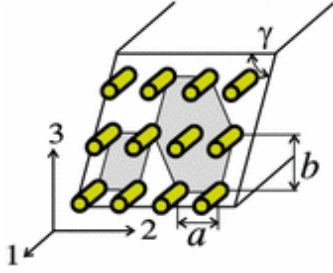
Malzeme parametreleri, belirli bir düzlemde birbirinin ayna görüntüsü olan iki koordinat sistemi için aynı değerlere sahip olduğunda, bu düzleme simetri düzlemi adı verilmektedir. Simetri, konumsal değil (özellikler noktadan noktaya değişebilir), yönsel bir özelliktir. Malzeme özelliklerinin konumsal bağımlılığı, malzemenin homojen olup olmamasıyla adlandırılır. Kompozit malzemeler için takviye elemanlarının yönlendirmelerine bağlı olarak değişen simetri düzlemlerine göre beş çeşit malzeme modeli vardır [25]. Bunlar, anizotropi, monoklini, ortogonal anizotropi, enine izotropi ve izotrop malzeme biçimleridir [26]. Eş. 2.1'de verilen matrisin bazı sabitleri sıfırlanarak veya birbirleriyle ilişkilendirilerek bağımsız değişkenlerin sayısı azaltılır ve bu malzeme modellerinin tanımlanması basitleştirilir.

### Anizotropik malzemeler

Yirmi bir bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeler anizotropik malzemelerdir. Bu sabitlerin deneysel veya analitik olarak bulunması gerekmektedir. Çok yönlü örülmüş elyaf takviyeli kompozitler bu malzeme modeline sahiptir.

### Monoklinik malzemeler

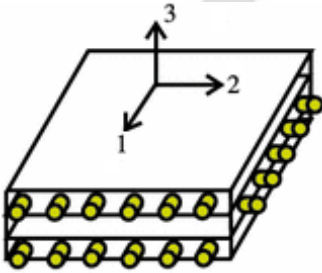
On üç bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeler monoklinik malzemelerdir. Tek yönlü açılı dizilmiş elyaf takviyeli kompozitler bu malzeme modeline sahiptir. Yöne bağımlı özellikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Burada,  $a \neq b$  ve  $a$ ; 2 yönündeki ve  $b$ ; 3 yönündeki elyaf demetlerinin birbirleri arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.  $\gamma$  ise, 2-3 düzlemindeki kayma açısını göstermektedir [26].



Şekil 2.1. Monoklinik malzeme yapısı

### Ortotropik malzemeler

Dokuz bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeler ortotropik malzemelerdir. Tek yönlü birbirine dik dizilmiş veya çift yönlü dokunmuş elyaf takviyeli kompozitler bu malzeme modeline sahiptir. En yaygın kullanılan kompozit mimarisidir. Rijitlik matrisi indirgenerek Eş. 2.2'deki gibi gösterilir ve malzeme sabitleri şunlardır:  $E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{13}, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ . Burada,  $E$  elastik modülü,  $G$  kayma modülünü,  $\nu$  poisson oranını ve alt indislerde yönleri ifade etmektedir. Yöne bağımlı özellikleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir [26].

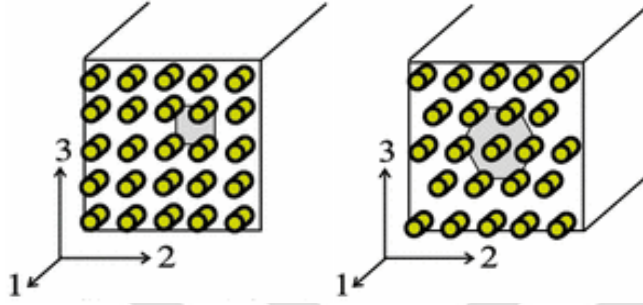


Şekil 2.2. Ortotropik malzeme yapısı

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

### Enine izotropik malzemeler

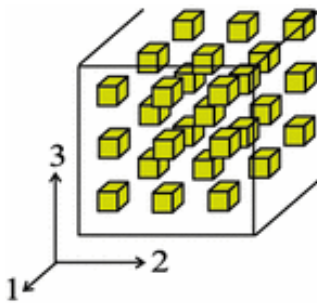
Beş bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeler enine izotropik malzemelerdir. Tek yönlü dizilmiş elyaf takviyeli kompozitler bu malzeme modeline sahiptir. Yöne bağımlı özellikleri Şekil 2.3’de gösterilmiştir [26].



Şekil 2.3. Enine izotropik malzemelerin yapısı

### İzotropik malzemeler

İki bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeler izotropik malzemelerdir. Bu tür bir malzemede metal malzemelerde olduğu gibi tüm yüzeyler özdeştir. Rastgele dizilmiş ve süreksiz (kırılmış veya parçacık) elyaf takviyeli kompozitler bu malzeme modeline sahiptir. Yönden bağımsız özelliği Şekil 2.4’te gösterilmiştir [26].



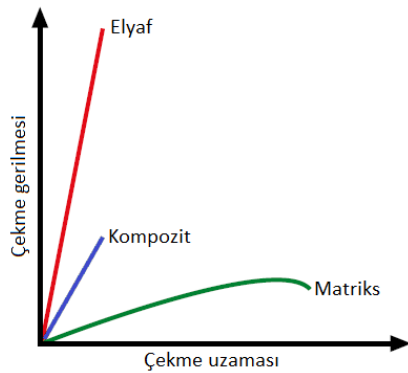
Şekil 2.4. İzotropik malzeme yapısı

#### **2.1.2. Polimer esaslı kompozitler**

Epoksi, polyester gibi polimer reçine sistemleri, endüstriyel parça olarak tek başına üretimleri için sınırlı kullanıma sahiptir. Çünkü mekanik özellikleri metallerle karşılaştırıldıklarında yüksek değildir. Bununla birlikte, karmaşık şekiller haline kolayca getirilme yeteneğine sahiptir [27].

Cam, karbon, aramid gibi malzemeler, son derece yüksek gerilme ve basınç mukavemetine sahiptir. Ancak, bu özellikleri katı haldeyken, rastgele yüzey kusurlarının çatlamaya neden olmasından dolayı, kolayca görülmez. Bu sorunun üstesinden gelmek için, bu malzemeler elyaf şeklinde üretilir. Böylece, elyaf demeti malzemenin en uygun performansını daha doğru yansıtır. Bu durumda, bir kısım lif kırılrsa bile, geri kalanlar mukavemet göstermeye devam eder ve elyaf tek başına sadece lif uzunluğu boyunca gerilme dayanımı sergileyebilir [28].

Reçine sistemleri takviye edici elyaflar ile birleştiğinde istisnai özellikler elde edilebilir. Matriks elemanı olarak reçine, kompozitlere uygulanan yükü her bir life yayar, elyafı aşınma ve darbeden kaynaklanan hasarlardan korur. Karmaşık şekilleri kalıplama kolaylığı, yüksek ortam direnci ve düşük yoğunluk özellikleri; yüksek mukavemet ve sertlik ile birleştiğinde kompozit malzemeleri birçok uygulama için metallerden daha üstün kılar [29]. Şekil 2.5'te kompozit ve bileşenlerinin temel bir karşılaştırması gösterilmiştir [30]. Tek başına elyaf malzeme oldukça kırılabilir davranış sergilerken, matriks (polimer) malzeme tam sünek davranış sergilemekte ve iki bileşen bir aradayken sert ve güçlü davranış göstermektedir. Kompozitin mekanik tepkileri, elyaf ve matriks fazlarının gerilme-gerinim davranışlarına, hacimsel/kütlesel oranlara ve yükün uygulandığı yöne bağlıdır.



Şekil 2.5. Çekme özellikleri karşılaştırması

Genel olarak; elyaf özellikleri, matriks özellikleri, kompozitteki elyaf oranı, elyaf geometrisi ve oryantasyonu, kompozit malzemenin özelliklerini belirler. Elyafın mekanik özellikleri matriksinkinden çok daha yüksek olduğu için, elyaf oranı ne kadar fazla olursa, elde edilen kompozitin mekanik özellikleri de o kadar fazla olur. Pratikte bunun açıklandığı gibi olması için elyafın matriksle tamamen kaplanması gerekir ve genellikle

dairesel kesitli lif, reçine ile en iyi şekilde tutunma sağlar. Ek olarak, elyafın matrisle bir araya getirilmesi için kullanılan üretim süreci, çeşitli kusurlara yol açabilir [31].

Elyafın genişlikleri boyunca oldukça zayıf ve uzunlukları boyunca yüksek mekanik özellik göstermesi, metallerin aksine kompozitlerin anizotropik olmasına yol açar. Bu, kompozitlerin kullanımında uygulanan yükün olduğu kadar yönünde çok önemli olduğu anlamına gelir ve tasarım aşamasında doğrultunun göz önünde bulundurulması gerektiğini gösterir. Bu özellik, doğru bir şekilde değerlendirildiğinde, yerleşim düzeni yüklerin uygulanacağı yönlere göre belirlenirse, fazla malzemenin kaçınılmasıyla avantajlı hale gelebilmektedir [32].

### 2.1.3. Polimerler

Polimerler, alışıktığımız plastikleri ve kauçukları içerir. Kimyasal olarak çoğunlukla karbon, hidrojen ve metalik olmayan elementlerin oluşturduğu organik bileşiklerdir. Polimerler, birçok basit tekrar biriminden oluştuğu ve uzun zincir benzeri moleküllerden meydana geldikleri için önemli ölçüde ortak özellik sergilerler. Tipik olarak, düşük yoğunluğa ve işleme kolaylığına sahip, çoğu son derece sünek, bükülebilir, yalıtkan ve korozyona dayanıklıdır. Sıcaklık şartları bazı durumlarda kullanımını sınırlamaktadır. Polimerler ısıya veya çözücülere karşı gösterdikleri davranışa göre 'termoset' ve 'termoplastik' olmak üzere iki tür altında sınıflandırılırlar. Termosetler, güçlü çapraz kovalent bağlara sahipken, termoplastikler zayıf Van-der-Walls veya hidrojen bağlarına sahiptir [33].

Katı haldeyken atomik yapıları sıvıya benzeyorsa amorf, atomlar belirli mesafelerde düzenli ise kristalin olarak ifade edilirler. Tüm termosetler amorf yapıdadırlar. Termoplastikler, genellikle amorf ya da yarı-kristalin (büyük oranda amorf yapı içinde dağılmış kısmen kristalimsi bölgeler bulunan) moleküllerden oluşurlar. Polimerlerde, ısının etkisiyle molekül zincirleri harekete geçmekte ve zincirler arasında boşluklar meydana gelmektedir. Bu oluşan serbest hacmin, toplam hacme oranı %5'e ulaştığı zamanki sıcaklık camsı geçiş sıcaklığı olarak tanımlanır. Polimerler, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde viskoelastik, altında kırılabilir davranış sergilerler. Termosetler ısıtıldıklarında kimyasal olarak değişikliğe uğrarlar ve erimezler. Termoplastikler ısıtıldıklarında kristal yapıları değişir, erime noktasına ulaşıldığında kristallik tamamen



bozulur ve soğutulduklarında kristalimsi yapı yeniden oluşur. Camsı geçiş sıcaklığından sonra yeteri kadar ısıtılmaya devam edilen termoplastik erime sıcaklığına ulaşır ve termoplastik sıvı faza geçer. Soğutma hızına bağlı olarak enerji seviyesi azalan termoplastik için kristallik açığa çıktığı sıcaklık yeniden kristalleşme/kristallenme sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Termoplastiklerin kristallik derecesi arttıkça mekanik özellikler iyileşmektedir [33].

Termosetler kritik bir sıcaklığın üzerinde kimyasal tepkimeye girerek sertleşirler ve tekrar ısıtıldıklarında eski haline gelmezler. Termoplastikler ise, ısıtıldıklarında yumuşar ve soğuduklarında ise sertleşirler. Her iki durumda malzeme özellikleri üzerinde kayda değer bir etki olmaksızın istenildiği kadar tekrar edilebilir. Termoplastik polimerler, günlük yaşamda oldukça yaygındır ve çeşitli ticari ürünlerde her zaman kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kompozitlerde termoplastiklerin kullanımı, geleneksel olarak kullanılan termosetlere kıyasla daha yeni bir gelişmedir. Termosetler, çözücülere, aşındırıcılara ve sıcaklığa karşı çok iyi dirence ve mükemmel yapışma özelliğine sahiptir. Termoplastikler ise, termoset reçinelere göre daha yüksek darbe direncine ve tokluğa sahiptir. Ayrıca, termoplastikler ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir, tekrar tekrar kalıplanabilir, birleştirilebilir ve dahası geri dönüştürülebilirler. Termoplastiklerin termosetlere göre daha avantajlı olması durumu, polimer zincirleri arasındaki Van-der-Waals bağlarının termoplastiklerde daha zayıf olmasından kaynaklanır. Termosetler oda sıcaklığında genellikle sıvı halde olduklarından elyafa kolaylıkla emdirilmekte, ancak nihai ürün elde etmek için gereken işlemler uzun zaman almaktadır. Termoplastikler ise, oda sıcaklığında katı halde olduğundan kompozit oluşumunda kısmen dezavantaja sahiptir ve termoplastik reçinenin elyafa yeterince dağıtılması için yüksek basınç uygulaması gerekmektedir. Bunların yanı sıra, termoplastik ve kompozitleri ile ilgili olarak, depolama koşulları için soğutma gerekli değildir. Endüstriyel olarak en sık kullanılan termoplastikler; PET (Polietilen tereftalat), HDPE (Yüksek yoğunluklu Polietilen), PVC (Polivinil klorür), LDPE (Alçak yoğunluklu Polietilen), PP (Polipropilen), PS (Polistiren), PA (Polyamid), ABS (Akrilonitril bütadiyen stiren)'dir. Ayrıca, PEEK (Poli(eter eter keton), yüksek ısıya dayanıklı olması nedeniyle karbonla güçlendirilmiş kompozitleri havacılık uygulamalarında tercih edilmektedir [34].

### Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP), bir termoplastik çeşididir ve propilen moleküllerinin polimerize edilmesiyle meydana getirilir. Propilen monomeri, ham petrolün damıtılması sırasında ortaya çıkan naftanın buhar-kırma işleminde ortaya çıkan bir yan üründür. Çoğu polipropilen, %40 ila %60 arasında değişen ara kristallik seviyesine sahiptir. Taktisiteye (moleküllerin polimer zincirlerine diziliş biçimi) ve kristaliteye bağlı olarak mekanik ve ısıl özellikleri değişmektedir [35].

Ambalajlama, laboratuvar ekipmanı, tekstil ve otomobil bileşenleri (fanlar, ön paneller vb.), makine parçaları, ev eşyaları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmasının yanı sıra, kolay bulunabilir, maliyeti düşük ve kompozit imalatı için uygun karaktere sahip olduğundan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastikler arasında en düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra, yüksek ısıl bozunma sıcaklığı, elektriksel yalıtım, alev direnci, kimyasal direnç, darbe dayanımı, şeffaflık, nem koşullarında boyutsal kararlılık gibi faydalı özelliklere sahiptir [36]. Polipropilen ve kompozitleri ekstrüzyonla veya enjeksiyonla kalıplama gibi seri üretim tekniklerine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv endüstrisinde tercih sebebidir. Fonksiyonel katkı maddeleri ile cam elyafına bağlanma performansı geliştirilmeye müsait bir termoplastik çeşididir [37].

### Polyamid (PA)

Polyamid, naylon olarak da anılırlar ve mühendislik uygulamalarında çok yaygın kullanılırlar. Emme manifoldu, yakıt hatları, hortum, burç, yatak gibi otomobil parçalarını yapmak amacıyla ve genellikle enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılır. Naylon-6, naylon-66, naylon-11, naylon-12 gibi farklı mekanik ve fiziksel özellikler sunan çeşitli polyamid türleri vardır. İyi bir yüzey görünümü ve kayganlık sağlarlar. Parça özelliklerini ve boyutsal stabilitesini etkileyebilen nem emme sorununu en aza indirmek için cam elyaf ile takviyelendirilirler [38]. Fiziksel özelliklerinin iyi olmasının bir nedeni, zincirleri çapraz bağlayan hidrojen bağlarının bulunmasıdır. Polyamid'in yanındaki sayılar, amid gruplarının polimerizasyon zincirlerine birleştirilen başlangıç malzemesindeki karbon atomlarının sayısını gösterir [39]. Polyamidler, yüksek sıcaklıklarda düşük viskozite ve yüksek akışkanlık gösterirler. Bu nedenle, enjeksiyon kalıplama kullanılarak ince parçalar halinde kalıplanabilirler [40].

### Polietilen teraftelat (PET)

PET, basitçe polyester olarak adlandırılır ve yün veya pamukla karışımlarda yaygın olarak kullanılır. Birçok endüstriyel, tıbbi ve evsel sıvı şişeleri olarak ve günümüzde en çok içecek şişeleri olarak cam yerine kullanılmaktadır. Camsı geçiş sıcaklığı 185 °C'yi geçmektedir. Yüksek mekanik özelliklere sahiptir [39].

### Polietilen (PE)

PE, farklı basınç ve yüksek sıcaklıklarda etileni polimerize ederek üretilir. Yüksek basınçta yapılan polietilene LDPE (düşük yoğunluklu polietilen); özel katalizörler içeren düşük basınçlı işlenen polietilene HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) denir [39].

### Polivinil klorür (PVC)

PVC, vinil klorürün polimerezasyonu ile yapılır. Borular, pervazlar, oluklar, yalıtım kaplamaları ve yer karoları en yaygın kullanıldıkları yerlerdir. PVC, ortam sıcaklıklarında katı haldedir [39].

### Polistiren (PS)

PS, sert, berrak, renksiz ve nispeten ucuz bir polimerdir ve ambalajlamada yaygın olarak kullanılır. Farklı türde köpük ve ambalaj malzemeleri yapmak için en ucuz kategoridedir [39].

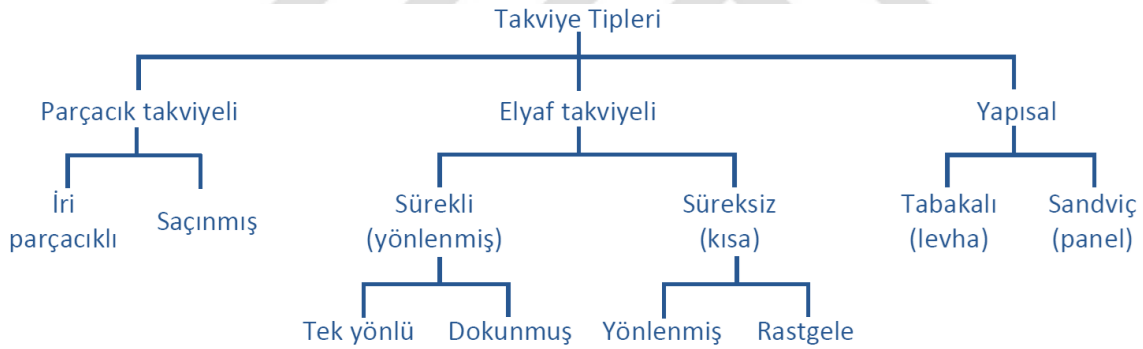
### Poli(akrilonitril bütadiyen stiren) (ABS)

Polimerlere küçük oranlarda kauçuk eklenerek sertleştirilebilir. Akrlonitril, bütadien kauçuk ve stirenden yapılan üç bileşenli bir sistem olan ABS, kauçuk olarak değil, istisnai olarak güçlü, boyutsal olarak kararlı bir polimerdir [39].

#### 2.1.4. Güçlendirme elemanları




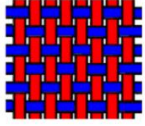
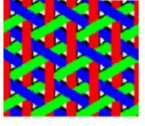
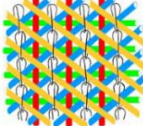


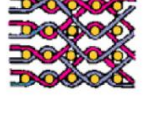
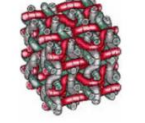
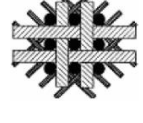




Genellikle elyaf olarak adlandırılan güçlendirme elemanları, küçük çaplara sahip çok lifli malzemelerdir. Lif olarak çoğunlukla seramikler (cam, karbon, bor, silikon karbür, alüminyum oksit vb.) kullanılmakta ve ayrıca polimerler (aramid, polietilen vb.) de kullanılabilir. Bu sentetik inorganik/organik lif çeşitlerinin yanı sıra, doğal (pamuk, ipek, asbest vb.) lif türleri de endüstride kullanılmaktadır [41].

Takviye elemanının performansını yöneten ana faktörler, elyaf türünün temel mekanik özelliği, elyaf ve reçinenin yüzey etkileşimi, kompozitteki elyaf oranı ve elyafın kompozit içindeki yönüdür [42]. Şekil 2.6'da çeşitli takviye tiplerine göre kompozitler gösterilmiştir [41]. Takviye verimliliği, elyaf uzunluğuna bağlıdır, ancak sürekli uzun olma zorunluluğu yoktur. Sürekli elyafın mekanik özellikleri oldukça anizotropik iken, güçlendirme verimliliğinde bazı kısıtları bulunsa da rastgele lif yapısı izotropiktir [43].



Şekil 2.6. Takviye tiplerine göre kompozitler

Kompozit malzemenin özellikleri için çok önemli rol oynayan, matriksten takviyeye yük transferi, lif/elyaf oryantasyonu ile yönetilir. Performans gereksinimlerine göre kompozit tasarımı için sınıflandırılmış tekstil takviye elemanı yapıları Şekil 2.7'de gösterilmiştir [44, 45]. Tekstil yapılar, metal malzemelere kıyasla bazı geliştirilmiş özelliklere sahip olduklarından, otomotiv, inşaat, savunma gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. İki ve üç eksenli tekstil yapılar çoğunlukla tıp alanında, uzay teknolojilerinde ve roket sistemlerinde kullanılırlar [46].

Eksen Boyut		0 Düzensiz	1 Bir Eksenli	2 İki Eksenli	3 Üç Eksenli	4 Çok Eksenli
1B			 Yönlendirilmiş süreksiz fitil			
2B		 Kırılmış elyaf keçesi	 Tek eksenli süreklî şerit	 Çift yönlü düz dokuma	 Üç yönlü dokuma	 Dört yönlü dokuma
3B	Doğrusal	 Doğranmış rastgele lif	 Üç boyutlu örme	 Çok katlı örme	 Kübik örme	 Beş yönlü örme
	Düzlemsel	 Rastgele parçacık	 Levha (çok tabakalı plaka)	 II veya I profil	 Petek panel	

Şekil 2.7. Takviye elemanı yapıları

### Cam elyaf

Kum (silis veya kuvars), kaolin, kireçtaşı, kolemanit, sodyum, kalsiyum, metal oksitler gibi silika bazlı madeni ürünler yüksek sıcaklıklarda (örn.: 1600 °C) karıştırılarak sıvı cam oluşturulur. Sıvı cam mikro ince kanallara sahip nüvelerden geçirilir ve soğutulurken filamentler elde edilir. Filamentler bağlayıcı bir malzeme ile temas ettirilerek kaplanır ve masuraya sarılarak bir elyaf demeti oluşturulur. Bu işlem çeşitlendirilerek yapısal güçlendirme ihtiyacına göre farklı cam elyaf türleri üretilebilir. Dolayısıyla, cam türüne bağlı olarak maliyeti değişebilir. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan en yaygın takviye elemanı E-cam elyafıdır. E tanımı elektrik anlamına gelir, çünkü E-cam iyi mukavemete ve makul bir elastik modülüne sahip olmakla birlikte iyi bir elektrik yalıtkanıdır. C korozyon anlamına gelir ve C-camı kimyasal korozyona karşı diğer camlara göre daha iyi bir dirence sahiptir. S ise, S-camının diğer camlardan daha yüksek sıcaklıklara dayanmasını sağlayan yüksek silika içeriği anlamına gelir [47]. Düşük maliyetleri, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek darbe direnci ve iyi kimyasal dirençleri nedeniyle, cam elyaflar ticari kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikleri, yüksek performanslı kompozit uygulamalardaki karbon elyafların özelliklerine uymamaktadır. Karbon elyaflara kıyasla, nispeten düşük modüle ve düşük yorulma özelliklerine sahiptirler. Cam elyaflar, suyu kütlelerine emmezken, su

moleküllerinin lif yüzeylerinde tutunması durumunda, elyafın sürekli yükleme altında statik yorgunluğa karşı gücünü azaltır.

### Karbon elyaf

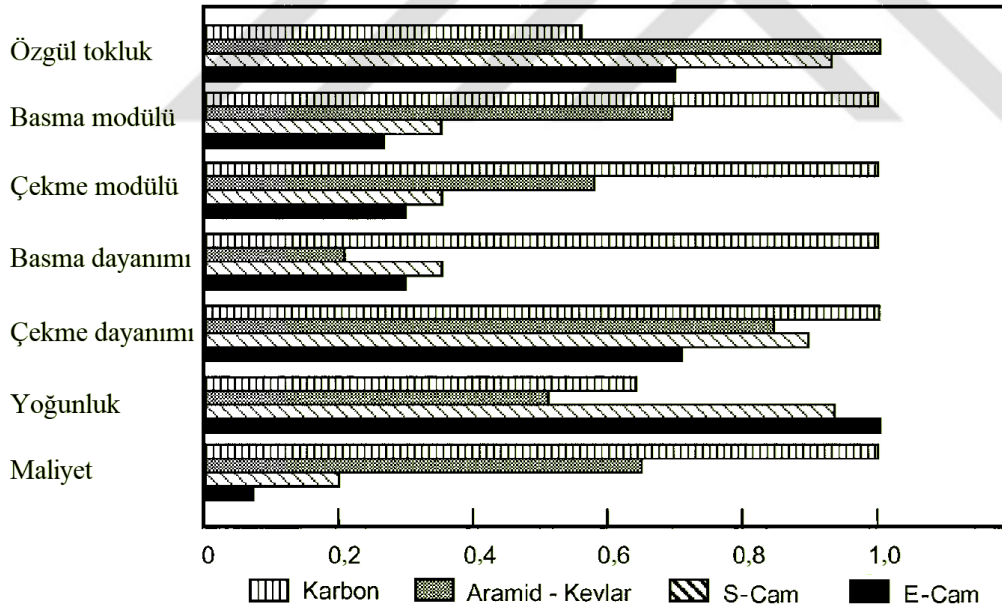
Karbon,  $2.268 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip çok hafif bir elementtir. Karbon, çeşitli kristal formlarda mevcut olabilir. Elyaf imalatında kullanılan biçimi, karbon atomlarının altıgen tabakalar şeklinde düzenlendiği sözde grafitik yapıdır. Grafitik formdaki karbon, oldukça anizotropiktir. Katman düzlemindeki teorik Young (elastik) modülü yaklaşık 1.000 GPa'a kadar çıkarken, bu düzleme dik eksenini boyunca yaklaşık 35 GPa olabilmektedir. Son derece yüksek elastik modüllü karbon lifleri, organik öncül liflerin karbonizasyonu ve ardından yüksek sıcaklıklarda grafitleştirme yoluyla yapılabilir. Organik öncül elyaf, yani karbon elyafın hammaddesi, genellikle erimeden karbonize edilebilen özel bir tekstil polimerik elyaftır. Yaygın olarak kullanılan bir öncü lif, poliakrilonitrildir (PAN). Diğer öncül lifler suni ipek, polivinil alkol, poliimidler ve fenoliklerden elde edilebilir [48]. Karbon elyaf, yüksek performanslı kompozit yapılarda kullanılan en yaygın lif çeşididir. Genellikle üstün çekme ve basınç dayanımı gösterir, aşınmazlar, yüksek modüle ve mükemmel yorulma özelliklerine sahiptirler. Kısmen kırılğan ve darbe direnci düşüktür. Karbon elyaf üretim maliyeti, yüksek ısı işlem sıcaklıkları gerektirdiğinden oldukça yüksektir [38].

### Bor elyaf

Bor, doğası gereği kırılğan bir malzemedir. Bor elementinin çekirdek adı verilen ince bir filamentin üzerinde kimyasal buhar çökeltme işlemiyle kaplanarak bor elyafı imal edilir. Bu yüzden kendisi üretilen haliyle kompozit bir elyaftır. Kimyasal çöktürme işlemi için oldukça yüksek sıcaklıklar gerekli olduğundan dolayı alt çekirdek buna uygun seçilir. Genellikle bu amaçla bir tungsten tel veya karbon kullanılır [48]. Bor fiber takviyeli polimer kompozitler askeri uçak bileşenlerinde ve helikopter rotor kanatlarında tercih edilmektedir.

## Aramid elyaf

Aramid elyaf, aromatik poliamid elyaflar olarak adlandırılan bir sentetik organik elyaf sınıfı için genel bir terimdir. Aramid elyaflarının iyi bilinen ticari isimleri arasında Kevlar, Nomex ve Twaron bulunur. Aramid elyafların temel kimyasal yapısı, yönlendirilmiş aromatik birimlerden oluşur ve bu da onları sert çubuk benzeri polimerler yapar. Bükülmez çubuk benzeri yapı, yüksek bir camsı geçiş sıcaklığı ve zayıf çözünürlüğü sağlar. Bu polimerlerin geleneksel çekme teknikleriyle imal edilmesini zor olduğundan dolayı, sıvı kristalin polimer solüsyonlarından kuru jet - ıslak eğirme yöntemi ile imal edilirler [47]. Aramid elyafların önemli bir avantajı, kırılma sırasında büyük miktarlarda enerjiyi absorbe etme yetenekleridir. Aşırı toklukları nedeniyle balistik koruma için kullanılır. Aramid lifleri, en düşük sıcaklıklarda bile önemli ölçüde kısa süreli sünmeye eğilimlidir, ancak uzun süreli sünme ihmal edilebilir düzeydedir [22]. Bazı yüksek mukavemetli elyafların performans ve maliyet ilişkileri Şekil 2.8’de karşılaştırılmıştır [22].



Şekil 2.8. Bazı güçlendirme elemanlarının karşılaştırması

### 2.1.5. Termoplastik kompozit levha imalat teknikleri

Termoplastik kompozit levhalar, yüksek hacimli üretimler için en uygun kompozit malzeme seçeneğidir. Ayrıca, raf ömürleri neredeyse sınırsız olduğu ve yapışkanlık göstermediği için depolama ve taşıma kolaylığı sağlar. İki boyutlu bir tabaka, levha malzemenin bir katmanını ifade eder ve termoset veya termoplastik reçine içine

yerleştirilmiş elyaftan oluşur. Elyaf, sürekli veya süreksiz; dokuma, tek yönlü, çift yönlü veya rastgele dağıtılmış olabilir [25].

Termoset kompozitlerde yapının kendisinin imal edildiği sırada kompozit parçanın oluşturulması, levha halindeki termoplastik kompozitler ile arasındaki temel ayrımı gösterir ve bu durum seri üretim için termoplastik kompozit levhaları avantajlı hale getirir. Termoplastik kompozit levha imalatı ve şekillendirme işlemi süreç ekonomisi nedeniyle genellikle ayrı ayrı yapılır [49].

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, termoset muadillerine kıyasla mühendislik malzemeleri arasında nispeten yenidirler. Ayrıca, iyi seviyede ısıl kararlılık, yüksek tokluk ve hasar toleransı, sonsuz raf ömrü ve işleme kolaylığı gibi avantajlı özellikleri nedeniyle, çeşitli endüstriyel sektörler için giderek cazip hale gelmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık alanlarındaki uygulamalarda büyük bir potansiyele sahiptir. Termoplastik kompozitten parça imalatında kullanılan ara malzeme formları üst üste serilir ve oluşan yarı mamulden yapısal formda levha elde etmek için kalıplanarak katılaştırılırlar. Bu önceden sertleştirme işlemi için vakum torbalama, eşli kalıpla sıkıştırma ve çift bantlı presle kalıplama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca, pültrüzyon tekniğiyle, sürekli sabit kesitli kalıptan profil elde edilebilmektedir [50]. Yukarıda ifade edilen ara malzeme formları, yani tek kat ince kompozit malzeme, matriksin elyafla bir araya getirilme biçimlerine göre değişmektedir. Önceden reçine emdirilmiş elyaf filmler (prepreg), polimer filmleri arasına serilmiş dokuma elyaf şeritler, polimer filamentleri ile örülmüş elyaf demetleri karışımı, pültrüzyonla çekilmiş bantlar ve kuru polimer tozu ile kaplanmış elyaf filametleri, levha halinde termoplastik kompozit elde etmek için kullanılan ara malzeme formlarıdır [51].

### Elle yatırma yöntemi

Kompozit malzeme oluşturmak için prepreg katmanlarını döşemenin en kolay yolu, prepregleri elle kesmek ve elle kat kat döşemektir. Hazır levhadan malzeme şekillendirme işlemi ile ilgili araştırma ve geliştirme durumları nedeniyle, elle yatırma yöntemi en yaygın prosedür olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem için yarı otomatik sistemler, prepreg tabakalarını otomatik olarak boyutlandırmakta ve daha sonra istenilen tasarıma göre robotik olarak sermektedir. Termoset kompozitler için kullanılan bu sistemler termoplastik

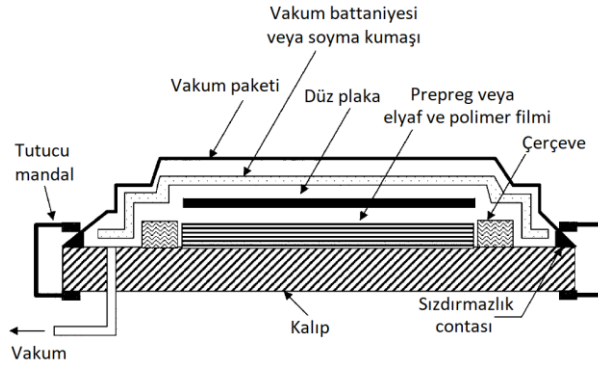


prepreglerle de kullanılabilmesi mümkündür. Bunun finansal olarak anlamlı olması için nispeten büyük üretim hacimleri gerekli olacaktır. Tam otomatik işlemlerde, prepreg filmleri sürekli olarak rulolardan açılarak serilir ve kademeli olarak birleştirilir. Bu katılaştırma yöntemleri aşağıda açıklamıştır.

### Prepreg katılaştırma yöntemleri

#### *Vakum torba ile katılaştırma*

Termoset kompozitlerin imalatında kullanılan otoklav işlemini takiben termoplastik kompozit prepreg yığını vakum torbasında katılaştırmak mümkündür. Şekil 2.9, bir kalıp içerisine yerleştirilmiş prepreglerin vakum torbasıyla kapatılmasını ve atmosferik basınçla sıkıştırılması için torba altından hava çekilmesini göstermektedir. Vakum işlemi ısıtma ve soğutma çevrimi boyunca devam etmektedir. Isıtma adımında kalıp-vakum torba düzeneği bir fırına yerleştirilir. Matriksin tamamen erimesinin ardından düzenek fırından çıkarılır ve soğuması için tekrar açık ortama çıkarılır. Bu yöntem, ekonomik nedenlerden dolayı laboratuvar ölçekli deneyler dışında çok tercih edilmemektedir [22].



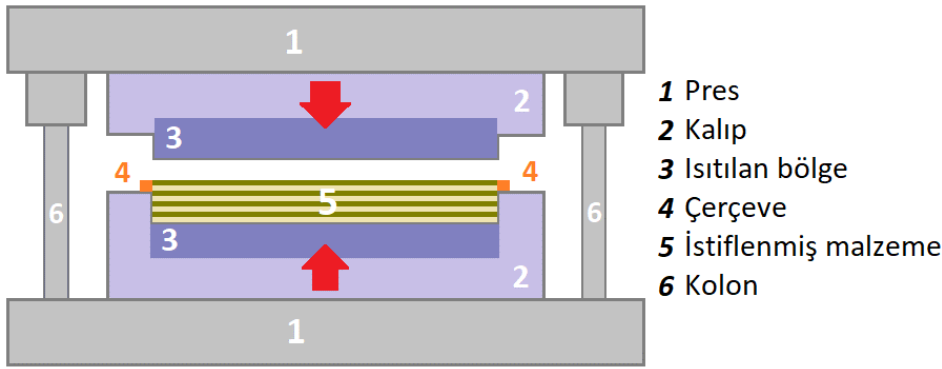
Şekil 2.9. Vakum torba ile katılaştırma

#### *Eşli kalıpla katılaştırma*

Çok yaygın ve oldukça ekonomik bir katılaştırma yöntemidir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, bir hidrolik pres kullanarak, prepreg yığını paralel metal plakalar arasında sıkıştırılır. Sertleştirme sırasında levhanın kenarlarından reçine sızmasının önüne geçmek için bir çerçeve kalıbı da kullanılır. Bu yöntemde prepreg yığını matriksin erime sıcaklığının üzerine ısıtılır. Kalıp, yumuşama noktasının altında bir sıcaklığa geri geldiğinde hızlıca

sıkıştırılır. Soğuma süresi boyunca yeterli sertleştirme basıncı uygulanmaya devam eder. Eriyik reçine ile emprenye edilmemiş kompozit filmleri; toz serpiştirilmiş veya polimer lifi karıştırılmış yapıları, denge sıcaklığına kadar daha uzun bir süre ısıtmak gerekebilir. Bunun için hem ısıtma hem de soğutma kabiliyetine sahip kalıp-pres sistemi kullanılmaktadır.

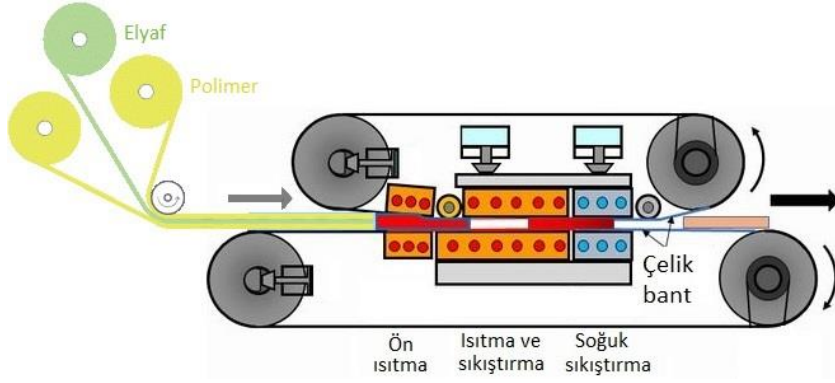
Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin levha haline getirilmesinde en yaygın kullanılan, malzeme israfının en az olduğu ve diğer yöntemlere göre üretim maliyetlerinin nispeten daha az olduğu bir yöntemdir. İki paralel plaka arasında yük uygulamak için bir hidrolik pres kullanılır. Levha kenarlarında reçinenin akmasını önlemek için kullanılan bir çerçeve özellikle prepreglerin paralel bir biçimde yığın haline getirilmesine de yardımcı olur [52].



Şekil 2.10. Sıkıştırma kalıplama

#### *Çift bantlı preste katılaştırma*

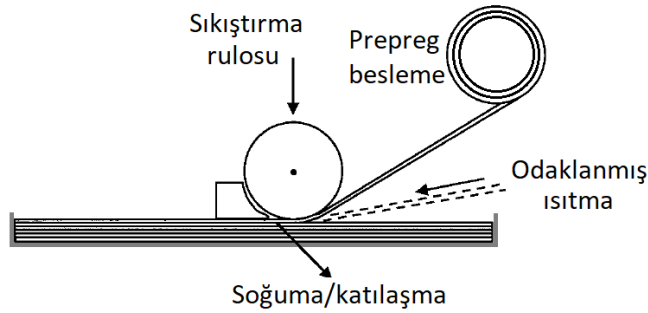
Geniş ölçülerde sürekli levha imal etmek için tek uygun yöntemdir. Prepregler, belirli bir basınç altına girerek matriks eriyene kadar ısıtılır ve ardından katılaşmanın sağlanması için basınç altında soğutulur. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi elyaf şeritler ve polimer filmleri rulolardan açılarak birleştirildiğinden, çift bant sisteminin ileri hareketi ile katılaştırma eş zamanlı gerçekleşmektedir. İşlem hızı eriyik emprenye edilmemiş malzeme biçimi ile doğrudan prepreg malzeme biçimine göre değişkenlik gösterse de, büyük ölçekli levha imalatında en ekonomik yöntemdir [22].



Şekil 2.11. Çift bantlı preste katılaştırma

### Film serme

Açık kalıpta katılaştırma işlemi için nadir de olsa film serme yöntemi kullanılabilir. Prepreg filmi bir makaradan açılarak Şekil 2.12’de görüldüğü gibi bir kalıbın üzerine sürekli olarak serilir. Her iki birleşme yüzeyi de bölgesel olarak sürekli ısıtılır ve basınç rulosuyla sıkıştırılır. Yüzeyler yeterince erimiş olursa ilave bir katılaştırma aşamasına gerek kalmadan, yerleştirme tamamlandıktan sonra levha kalıptan çıkarılmaya hazır hale gelir. Filme serme işlemi düz yüzeylerin yanı sıra kavisli parçalar üretmek için de kullanılabilir. Ancak, söz konusu parçada artık gerilmeler nedeniyle çarpılmalar meydana gelebilir [53].



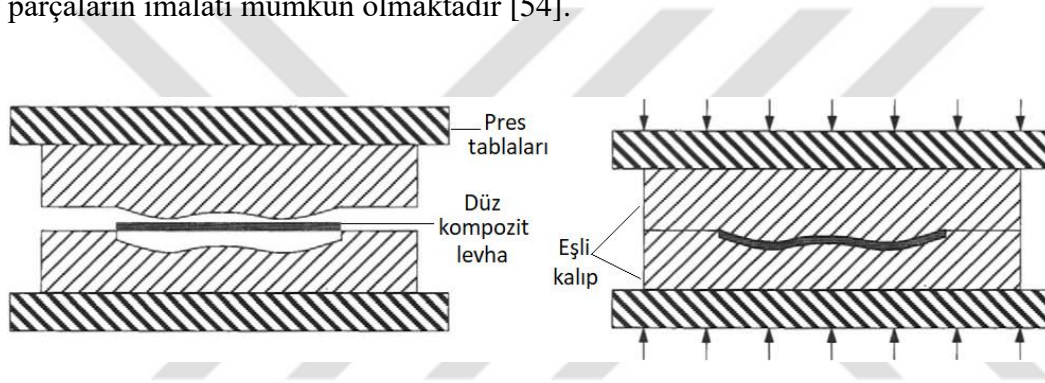
Şekil 2.12. Film serme

### Levha şekillendirme yöntemleri

#### *Sıkıştırma kalıplama*

Sac metallerin preste şekillendirilmesine benzer bir yöntemdir. Şekil 2.13’te görüldüğü gibi iki metal kalıp arasına yerleştirilen yarı-mamül kompozit levhaya basınç uygulanarak

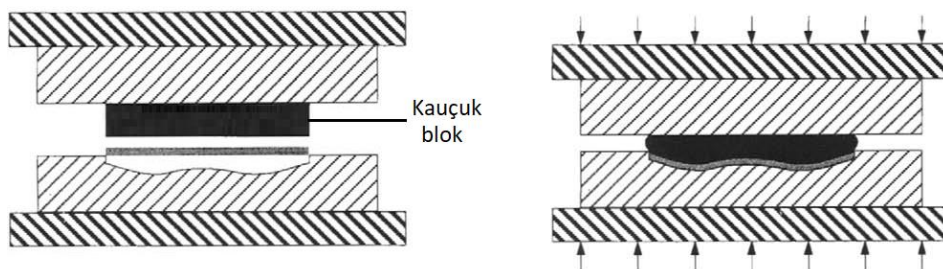
şekil verilir. Genel işlem basamakları, yukarıda tarif edilen eşli kalıpla katılaştırma adımlarına benzerdir ve *Termoform kalıplama* olarak da adlandırılır. Kompozit levha, bir infrared ya da etüv fırında malzemenin yumuşama ve erime noktaları arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Ardından, ısıtılan levha, hızlı bir şekilde, soğuk kalıba veya bazı durumlarda malzemenin kristallenme sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta olan kalıba aktarılır. Daha sonra, kompozit parça soğuyup nihai şeklini alıncaya kadar yeterli basınç uygulanır. Kısa çevrim süreleri sebebiyle otomotiv endüstrisinde oldukça ilgi görmektedir. Bu yöntem, gerekli kalıp sistemlerinin pahalı olması nedeniyle, az sayıda ve büyük boyutlu parçaların şekillendirilmesi için dezavantaj sayılabilir. Yüksek şekillendirme hızlarında, dokunmuş veya hizalanmış sürekli elyaf içeren kompozit levhalardan orta seviye kavislere sahip parçaların imalatı mümkün olmaktadır [54].



Şekil 2.13. Sıkıştırma kalıplama

#### *Kauçuk blokla kalıplama*

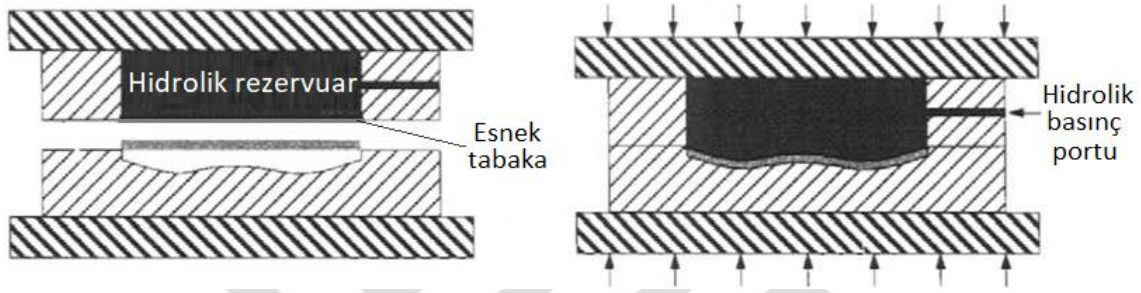
Kauçuk blokla kalıplama yöntemi, Şekil 2.14'te görüldüğü gibi, sıkıştırma kalıplama ile yakından ilişkilidir. Daha az karmaşık geometrilerin kalıplanmasını kolaylaştırabilir. Kauçuk bloğa sahip kalıp sistemi daha eşit basınç uygulayarak parçadaki kırışıklık riskini azaltmaktadır. Kauçuğun ısı transferi karakteristiğinin metal kalıplara göre düşük olması sayesinde, kompozit malzeme daha geç katılaşır ve böylece daha derin parçalar imal edilebilir [54].



Şekil 2.14. Kauçuk blokla kalıplama

### Hidroform şekillendirme

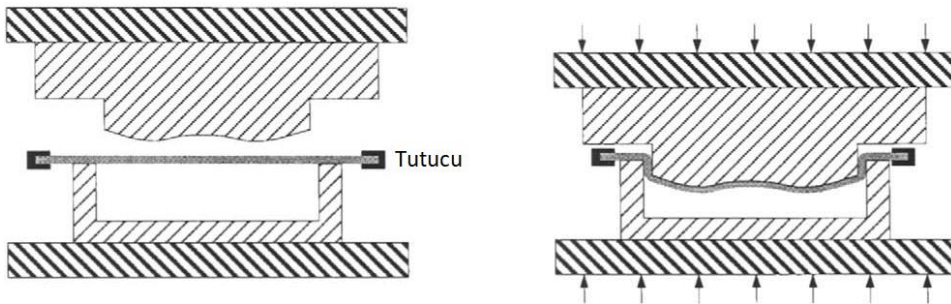
Bu yöntemde, kalıp yarısının şekline uygun esneyebilen bir zar tabakasına, kalıp kapandıktan sonra uygulanan bir sıvı basıncıyla parçaya şekil verilmektedir. Şekil 2.15'te hidroform şekillendirme basitçe gösterilmiştir. Soğuma diğer yöntemlere göre nispeten yavaştır. Bu yüzden, şekillendirme süreleri uzundur. Bununla birlikte, hidrostatik olarak uygulanan basınç yoluyla parçadaki kırışıklık riski azalır [54].



Şekil 2.15. Hidroform şekillendirme

### Derin çekme

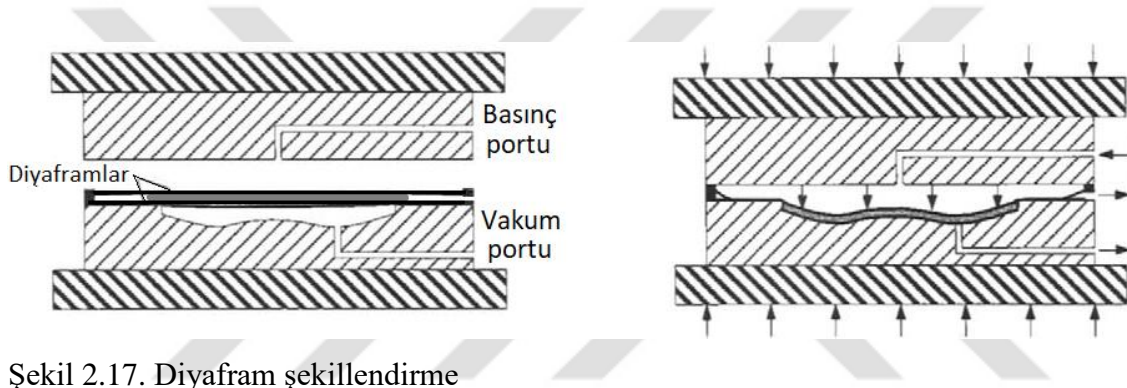
Derin çekme işleminde, şekillendirilecek malzeme, şekil verme süreci tamamlanana kadar hafif gerginlikte tutulur. Önceden ısıtılan levha malzeme matris-kalıp ile tutucu arasına yerleştirilir ve matris-kalıbın deliğine doğru maça-kalıpla belirli bir hızda itilir. Malzemeye şeklini kazandıran maça-kalıptır. Derin çekme işlemi Şekil 2.16'da şematik olarak gösterilmiştir. Kalıplar arasında sıkıştırılmadığından dolayı dış yüzey kalitesi zayıf olabilmektedir [54].



Şekil 2.16. Derin çekme

### *Diyafram şekillendirme*

Yalnızca termoplastik kompozitlerin imalatı için geliştirilmiş bir yöntemdir. Şekil 2.17’de görüldüğü gibi geleneksel otoklav katılaştırma yönteminin gelişmiş bir versiyonu gibidir. Isıtılan malzeme, tek taraflı bir kalıp üzerinde çevresi boyunca kenetlenen iki esnek diyafram arasına yerleştirilir ve diyaframlar arasındaki hava boşaltılır. Alt taraftan kalıp boşluğuna doğru vakumla çekilirken, üst taraftan basınçlı havayla kalıba uymaya zorlanır. Kalıp-diyafram sistemi başlangıçta soğuktur. Şekillendirme tamamlandığında, kalıbı ve diyaframı çevreleyen ısınmış gaz, katılaşmanın sağlanması için soğuk ortam havasıyla yer değiştirir [54].



Şekil 2.17. Diyafram şekillendirme

### *Katlama*

Katlama yöntemi, daha önceki bahsedilen yöntemlerden farklı bir prensibe sahiptir. Sadece bölgesel ısıtma ve şekillendirme işlemidir. Kompozit levha, Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, bir hat boyunca ısıtılır ve daha sonra bu hat boyunca bükülerek katlanabilir. Bükülme merkezinin iç tarafında buruşma sorunu ve sürekli elyafların kırılma ihtimali vardır [54].

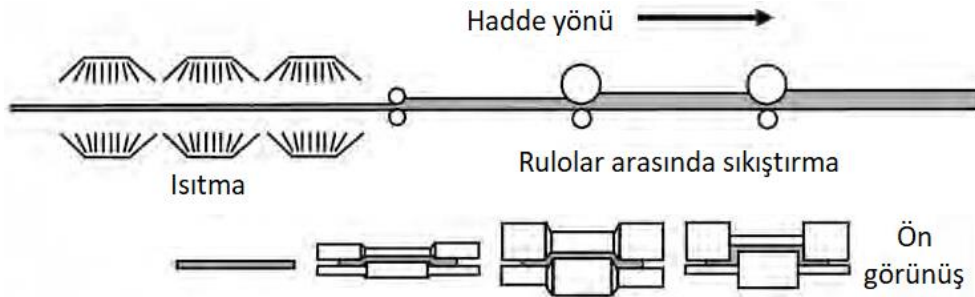


Şekil 2.18. Katlama



## Haddeleme

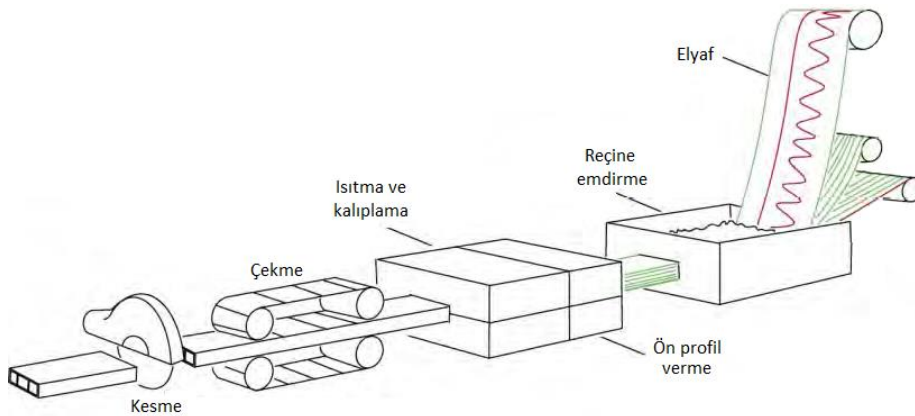
Sac metallerin imalatından alıntı yapılan rulolar arasında şekillendirme, kompozitler için de kullanılmaktadır. Nadir rastlanan bir yöntemdir. Haddeleme yöntemiyle, sabit kesitli geometrilere parçalar imal edilebilir ve gerekliyse parçalar kavisli olarak da şekillendirilebilir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, işlenmemiş kompozit levha, farklı ölçülerde ve boşluklarda ardışık dört veya daha fazla rulo çiftiyle, kademeli olarak istenilen şekle uygun olarak deforme edilir. Levha önceden ısıtılır ve hareket ettirilen rulolar genelde soğuktur [54].



Şekil 2.19. Haddeleme

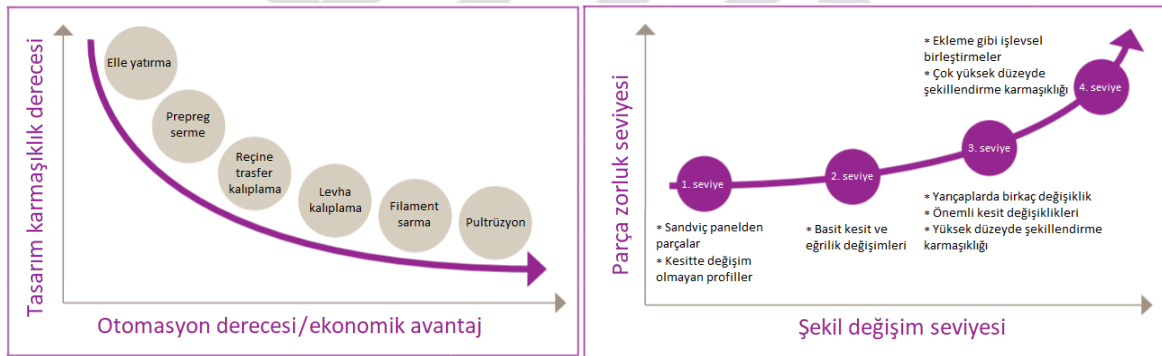
## Profil çekme (Pultrüzyon)

Makaralardan açılan sürekli elyaf filamentleri veya çeşitli yönlenmelere sahip dokuma elyaf, polimer reçinesine daldırılır ve ilk şekillendirmesini yapmak için klavuzlar yardımıyla ön kalıp alanına yönlendirilir. Isıtılarak sabit kesitli bir kalıptan geçirilen kompozite profil kazandırılır ve gerdirme aparatlarıyla sürekli çekilirken soğutularak katılaştırılır [55]. Pultrüzyon süreci Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Profil çekme

Kusursuz parçalar imal etmek için, işlem koşullarının nihai ürün üzerindeki etkileri hakkında temel bir anlayış kazanmak esastır. Malzemenin işlem koşulları altındaki davranışı tam olarak anlaşılırsa, arzu edilen mekanik performansa sahip parça elde edilebilir. Performansı yüksek parçaların imalat tekniğinin verimliliği parça tasarımının zorluğuyla ilişkilidir. Termoform levha kalıplama süreci, farklı kalınlıklarda ve çeşitli basit veya karmaşık geometrilerdeki parçaların hızlı çevrim sürelerinde ve tekrarlanabilir olarak imal edilmesine imkân sağlamaktadır. Ekonomikliğin önem kazandığı yüksek hacimli seri üretimler için uygun olan imalat yöntemleri ile karmaşıklık seviyesi yüksek parçaların şekillendirilmesinde olası deformasyonların aşılması gerekmektedir. Tasarımın karmaşıklık seviyelerine göre ekonomik imalat yöntemleri ve şekil değiştirme seviyeleri Şekil 2.21’de özet olarak sunulmuştur [56]. Parça geometrisi karmaşıklaştıkça şekil verme zorluk seviyesi artmaktadır. Tasarımın zorluk derecesi azaldıkça imalatta otomasyon arttığından ekonomik avantaj sağlanabilmektedir.



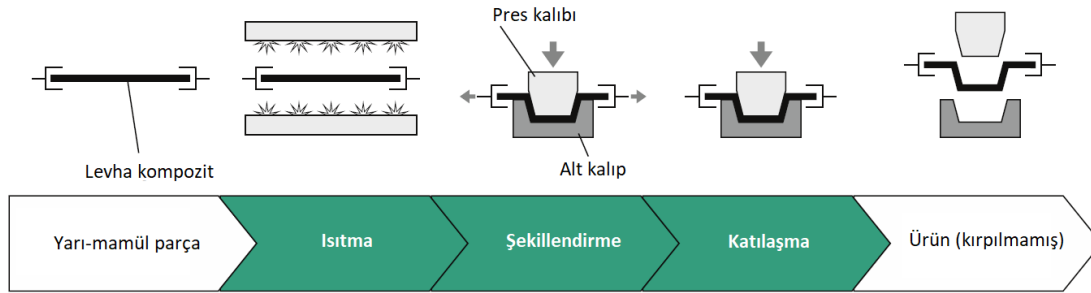
Şekil 2.21. Parça karmaşıklığına göre otomasyon yöntemleri ve şekil verme seviyeleri

### Şekillendirme süreci

Kompozit malzemedan nihai parça imalatı, prepreg yerleşimi, prepreg katılaştırma ve levha şekillendirme olmak üzere üç temel adımdan oluşur. Bazı durumlarda, bu adımların ikisi veya üçü de tek bir işlemde birleştirilebilir, ancak her üç adımında ayrı ayrı olması daha yaygındır. Şekillendirme, düzlemsel bir konstrüksiyonu eğrisel bir komponent haline getirme işlemi için kullanılan bir terimdir [51]. Termoplastik kompozitler, eşli kalıplama, kauçuk blokla kalıplama, hidrolik basınçla kalıplama, diyafram kalıplama, vakum torbalama, otoklav, derin çekme gibi teknikler ile şekillendirilirler [54, 57]. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit levha malzemelerin şekillendirilerek nihai ürün elde edilmesinde yaygın olarak termoform (ısıl şekillendirme) tekniklerinden sıkıştırma



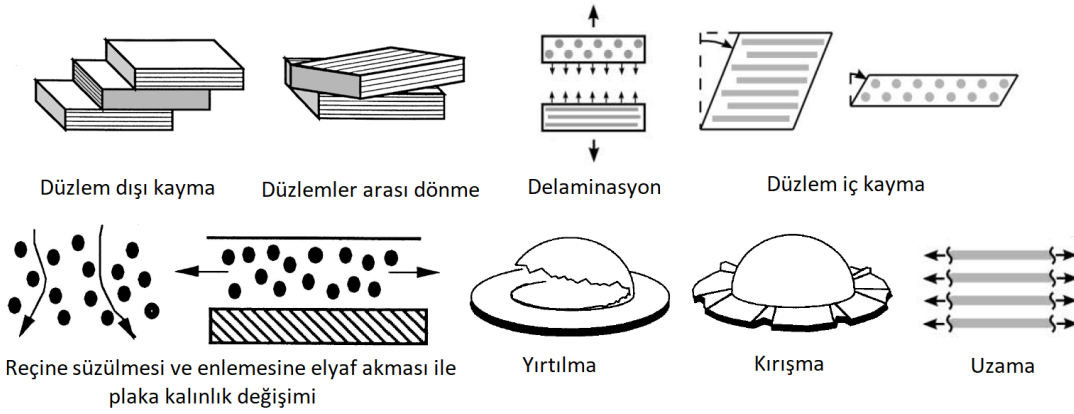
kalıplama yöntemi kullanılmaktadır. Sıkıştırma yöntemi ile kalıplama, operatör becerisine ihtiyacın en az olduğu, yüksek kaliteli ve hızlı üretim için geliştirilmiş bir yöntemdir [58]. Bu yöntemde, Şekil 2.22’de gösterildiği gibi, önceden ısıtılmış düz levha malzeme, kalıplar arasına yerleştirilir ve levha yüzeyi boyunca basınç uygulanarak kalıp içine doğru gerilir. Sıcak plaka takımlara temas ettiğinden hızla soğuyarak katılaşır ve kısa sürede nihai parça elde edilmiş olunur. Şekillendirme için geçen bir çevrim süresi, ön ısıtma, transfer, pres hızı ve kalıpta bekleme ile ilişkili olarak değişmektedir.



Şekil 2.22. Termoform süreci

### Şekillendirme başarısızlıkları

Malzeme gerinme davranışı (uzama ile bölgesel kalınlık değişimi), yüzey kalitesi, kırılma, bükülme, yırtılma, çatlama, tabakaların kayması ve dönmesi kompozit malzemeden nihai ürün imalatında karşılaşılan bazı önemli deformasyonlardır. Bu deformasyonları araştırmak için derin çekme deneyi (üç boyutlu kubbe/kap şekli oluşturma) yapılmaktadır. Bu deney ile malzemenin şekillendirme sınırları pratik olarak belirlenebilmekte ve kusursuz parça imalatı için en uygun şekillendirme parametreleri tahmin edilebilmektedir [59, 60]. Levha halindeki kompozit malzemelere dışardan bir yük uygulandığında meydana gelebilecek çeşitli deformasyonlar Şekil 2.23’te şematik olarak gösterilmiştir [61].



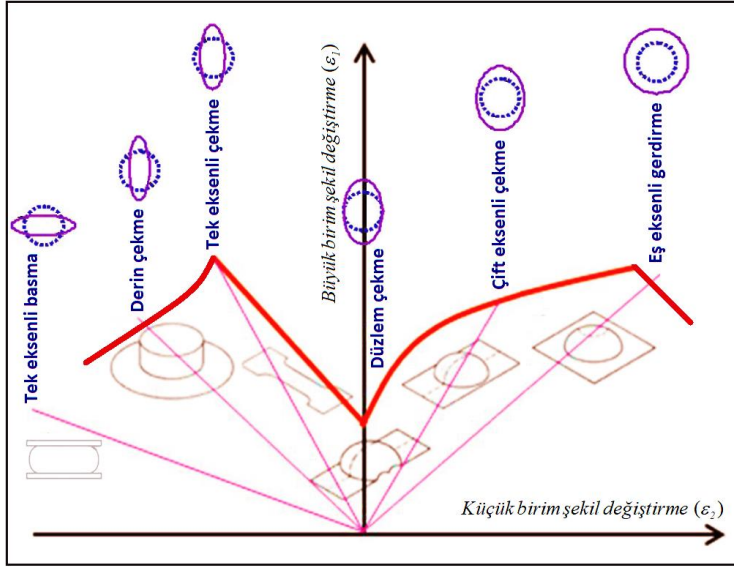
Şekil 2.23. Kompozit şekillendirme deformasyon mekanizmaları

### Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD)

Malzemelerin plastik şekil değiştirmesi için akma dayanımı, sertlik, yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerin veya kimyasal, termal özelliklerin bilinmesi yeterli olmamaktadır. Üretim süreçlerinde malzemeleri etkin olarak kullanabilmek için, şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlendiği tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır.

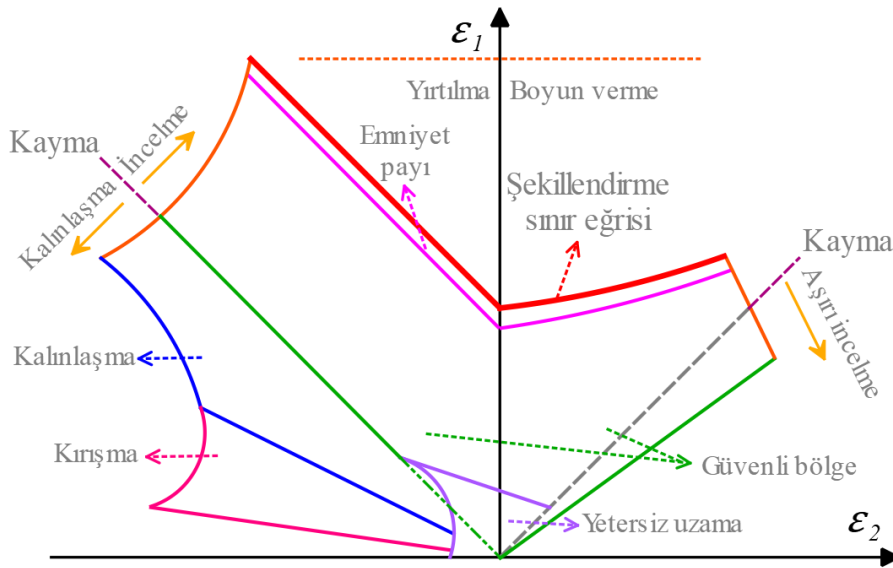
Kırışma, kalınlaşma, kayma, boğumlanma, yırtılma, çatlama, incelme; şekil verme sırasında karşılaşılan başlıca problem tipleridir. Araştırmacılar ve imalatçılar malzemelerin şekillendirilmesi esnasında bu tür problemlerden kaçınmayı amaçlamaktadırlar.

Malzemenin farklı şekil değiştirme durumlarında şekillendirme sınırlarını büyük (major) ve küçük (minor) birim şekil değiştirme (gerinim) oranları cinsinden ifade eden diyagram “Şekillendirme Sınır Diyagramı” (ŞSD), uluslararası literatürde ‘Forming Limit Diyagram’ (FLD) olarak adlandırılmaktadır. ŞSD, şekil verme esnasında ortaya çıkan problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılırlar. Bu diyagramlar sayesinde, kalıp tasarımı (kalıp kavisleri, kalıp boşluğu vb.) ve koşulları (tutma basıncı, pres hızı, pres kuvveti vb.) değiştirilerek şekillendirme işlemi emniyetli bölgeye çekilebilir. Ayrıca, bu koşulların değiştirilmesi yeterli ya da mümkün değilse; daha kaliteli malzeme seçimi yoluna gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda şekillendirme işlemine ait veriler, şekillendirme sınır eğrisinin çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitelere malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanır [62]. Şekil 2.24’te monoklinik yapıları malzemelerin şekillendirilmesinde karşılaşılan deformasyon ve gerilme biçimleri gösterilmiştir [63].



Şekil 2.24. Monoklinik malzemelerde şekillendirme deformasyon ve gerilme biçimleri

ŞSD ve olası deformasyon bölgeleri Şekil 2.25'te gösterilmiştir [62]. Diyagramın sol tarafı tek eksenli sıkıştırmadan, düzlemsel çekmeye kadar olan bölgeyi gösterirken, sağ tarafı ise; düzlemsel gerilmeden, eş eksenli gerdirme halini göstermektedir. Büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının pozitif olduğu kısmı; ŞSD'nin sağ tarafı, küçük birim şekil değiştirme oranının negatif olduğu kısmı ise; ŞSD'nin sol tarafıdır. Eğrinin üstünde kalan deformasyon durumları kusurlu bölgeyi gösterirken, altta kalan şekil değiştirme oranları ise güvenli bölgeyi göstermektedir [63].



Şekil 2.25. Şekillendirme sınır diyagramı ve olası deformasyon bölgeleri

## 2.2. Literatür Araştırması

Literatürde, otomotiv endüstrisinin taşıt gövde elemanları olarak kullandığı çelik sac metallere üzerine, taşıt iç trim parçaları olarak kullandığı polimer malzemeler üzerine, hafifletme çalışmaları kapsamında polimer kompozitler üzerine hem teorik hem de deneysel çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmanın konusu olan termoplastik kompozit levhaların kullanılması ile ilgili olarak yapılan çalışmalar sınırlı olmakla beraber, bu tür malzemedeki parça/aksam imal eden firmalar ve araştırmacılar genellikle yapısal parçaların imalat teknikleri üzerine ve geliştirilen malzeme teknolojilerinin karakterizasyonu üzerine çalışmalar yürütmektedirler. Bu literatürde, ŞSD'lerin sac metallere kullanılması, kompozit bileşenlerinin (termoset, termoplastik ve elyaf) testlerinin yapılması ve analiz programları yardımıyla tasarım geliştirilmesi vb. konulara yer verilmiştir.

Literatürde sac metallere ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmayla ilişkili olarak kalıpta şekillendirilme çalışmaları araştırılmıştır. Literatürde, sac metal malzemelerin ŞSD'lerinin oluşturulmasında Nakajima, Marciniak, Erichsen veya Swift testleri gibi temelde aynı prensibe dayanan derin çekme/çökertme/sıvama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu deneyler neticesinde elde edilen ŞSD'leri sac malzemeler için kullanılan Autoform, Dynaform gibi sanal analiz programlarında kullanılarak imalat öncesi kalıp ve parça tasarım problemleri ortaya çıkarılmakta ve sac metallere kalıplanabilirlikleri tespit edilmektedir [64-66]. Çeşitli alaşımlar, çekme hızı, malzeme kalınlığı, sıcaklık ve yön değiştirilerek malzemelerin şekil verilebilirlik özelliği incelenmiştir [67-69].

Otomotiv, havacılık ve savunma sektörlerinde yaygın olarak termoset plastikler ve termoset içerikli kompozitler kullanılmaktadır. Yeni termoset kompozit malzeme geliştirilmesi, fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ve kalıplama işlemleri üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar termoset matriksli kompozitlerdeki elyaf boyları, yönlendirmeleri ve oranlarının yapısal mukavemete etkileri ve uzun kürlenme süreleri ile ilgili bilgiler sunmaktadır. Genel kompozit malzeme özelliklerinin kapsamlı analiz çalışmaları için yeterli olmadığı, ancak bazı kabullerle veya standartlaşmamış testlerle elde edilen verilerin kullanılmasıyla gerçeğe yakın analiz çalışmalarının sürdüğü görülmüştür [70-72].

Termoplastik kompozit filmlerin iki eksenli çekme testleriyle yöne bağlı uzama, kayma, kulaklanma durumlarının incelenmesi üzerine bazı çalışmalar [73, 74] ve termoplastik kompozit levhaların çekme, darbe, üç nokta eğme, burkulma, birleştirilme, ses izolasyonu, nem ve ultraviyole ışınlarla dirençleri, ısıl davranışları, farklı matriks/lif kombinasyonlarının lif-matriks etkileşimi ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar yürütülmektedir [75-81].

Farklı dokuma biçimlerinde tekstil elyafların temel hacimsel yapılarda kalıplanarak şekil verilmesi sırasında oluşan kayma durumları incelenmektedir [46, 82]. Mohammed vd. yaptıkları çalışmada, dört farklı tipte (gevşek bezayağı, sıkı bezayağı, dimi, saten) iki yönlü olarak dokunmuş cam elyafların kalıplanabilirliğini incelemiştir. Dokuma elyaf yarım kubbe şeklinde bir kalıbın üzerine serilmiş ve elyafın üzerine de kalıp eşi kapatılmıştır. Dökümlü elyafların çevre profilleri, kayma açıları ve kırışıklığın neden olduğu oryantasyon değişimleri karşılaştırılmıştır. Sıkı dokunmuş elyafın örtülebilirliği/serilebilirliği en düşük çıkmıştır. Elyaf hacminin yoğunluğu her bir dokuma çeşidi için bölgesel olarak değişiklik göstermiştir [83].

Doğal, kırılmış, hibrit takviyeli kompozitlerin deformasyonlarının belirlenmesi, nihai parça kalınlık değişiminin incelenmesi ve şekillendirme sınır eğrileri hakkında bazı çalışmalar mevcuttur [84-88]. Fazita vd. yaptıkları çalışmada, öncelikle %34 oranında bambu doğal lif katkılı 1,8 mm kalınlığında poli(laktik asit) termoplastik kompozit levhaları ısıtmalı düz kalıplar arasında presleyerek imal etmişlerdir. Daha sonra, numunelerin termal karakterizasyonu yapılarak camsı geçiş, yeniden kristalleşme ve erime sıcaklıkları belirlenmiştir. Şekil verme sırasında oluşan kırışma probleminin önüne geçebilmek için uygun kalıp tasarım parametreleri araştırılmıştır. Numune yüzeylerine kare şeklinde ızgaralar çizilmiştir. Deneyler sıcak ve soğuk iki farklı kalıpta yapılmıştır. Numuneler yeniden kristalleşme ve erime sıcaklıkları arasında üç farklı değerde (100, 130, 140 °C) test edilmiştir. Flanş bölgesinde sürekli kırışma meydana geldiği, düşük şekillendirme hızlarında kırışmanın azaldığı, dikey doğrultulu elyaf yönünde kırışmaların belirginleştiği ve sıcak kalıp kullanıldığında soğuk kalıba göre sonuçların iyileştiği tespit edilmiştir [89].

Wang vd. yaptıkları bir çalışmada, 0 ve 90 derece yönlenmeli keten lifi takviyeli polipropilen kompozit levhanın derin çekme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Termoform şekillendirme hataları deneysel çalışmanın yanı sıra bir sanal analiz programıyla da tespit

edilmeye çalışılmıştır. Deneysel numuneleri farklı boyutlarda kum saati biçiminde kesilmiş ve yüzeylerindeki hatalar anlık ölçüm yapan bir kamera sistemiyle kaydedilerek gerinim miktarları iki boyutlu olarak ölçülmüştür. Elyaf uzamasının sabit olduğu varsayımıyla şekillendirme uzama oranı grafikleri çıkartılmıştır. Hasar başlangıcını tahmin etmek için geliştirilen analiz modelinin sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir [90].

Conte vd. yaptıkları bir çalışmada, polyamid-6 granüllerine %15 oranında kırılmış cam elyaf takviye ederek ekstrüzyonla plakalar imal etmişlerdir. 1 ve 2 mm kalınlıktaki plakalara, 30 ve 40 derece köşe açısına sahip kalıplarda, 150 ve 200 °C işlem sıcaklıklarında şekil verilerek kalıplanabilirlikleri üzerine bir fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Köşelerdeki kalınlık değişiminin sıcaklıkla değişmediği, 2 mm kalınlık ve 30 derece köşe açılı plakada derinlik değerinin en yüksek olduğu ve sıcaklık artışıyla çökertme yüksekliğinin arttığı tespit edilmiştir [91].

Erdoğan ve Ekşi yaptıkları çalışmada, ekstrüzyon kullanarak takviyelendirilmemiş polistiren plakalar ve kırılmış karbon elyaf takviyeli polipropilen levhalar imal etmişlerdir. Yarı-konik, yarı-silindirik ve yarı-kübik geometrideki kalıplarda termofom şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Levha kalınlığının, kırılmış elyaf konsantrasyonunun ve kalıp geometrisinin parça kalınlık dağılımına etkileri incelenmiştir. %5-15 arasında kırılmış elyaf içeren polipropilen malzemeler arasında ve polistiren plakalar arasında parça kalınlıkları farkı %1'den az çıkmıştır. Elyaf dağılımının homojenliği ve ekstrüzyon yönüne bağlı olarak oluşan anizotropi de parça kalınlık değişimine etki etmiştir [92].

Termoplastik film ve plakaların sıvama tekniğiyle şekil verilmesinde derin çekme oranı sınırları ve kalınlık dağılımı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [93-98]. Morrow vd. yaptıkları çalışmada, önceden katılaştırılmış kendinden takviyeli polipropilen kompozit plakanın oda sıcaklığında şekillendirme sınır eğrisinin çıkarılması üzerine derin çekme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Eş eksenli gerdirme ile tek eksenli çekme yükleri arasında deformasyon davranışının belirlenebilmesi için numuneler beş farklı geometride hazırlanmıştır. Şekillendirme sonrasında numune yüzeylerinden birim uzama değerleri GOM-Aramis sistemi aracılığıyla tespit edilmiştir. Her bir geometri için güvenli şekillendirme bölgeleri ayrı ayrı belirlenmiş ve malzemenin ŞSD'si çizilmiştir [58].

Zanjani vd. yaptıkları çalışmada, farklı yönlenmelere sahip kendinden takviyeli polipropilen kompozit plakaları kalıpta şekillendirerek deformasyon durumlarını incelemişlerdir. Farklı en-boy oranlarında dikdörtgen numunelerin şekillendirme sırasında gerinim miktarları üç-boyutlu fotogrametrik ölçüm sistemi ile belirlenmiştir. Farklı derinliklere göre uzama oranları grafiği oluşturulmuştur. Nakajima standardında yer alan işlem parametreleri dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sekiz farklı geometride numunenin hasar görmüş alanın yakınlarından alınan ölçümlerle  $\dot{\epsilon}$ SD'si oluşturulmuştur [99].

Sainz vd. yaptıkları çalışmada, ekstrüzyonla 1 mm kalınlıkta imal edilmiş polikarbonat plakalara Nakajima derin çekme testi uygulamışlar, boyun verme ve yırtılma koşullarında şekillendirme sınırlarını araştırmışlardır. Deformasyon yolu çevresinden, elastik geri gelmeden dolayı, açıklık/hasar oluşmadan hemen önce, alınan dijital görüntülemeler yardımıyla uzama değerleri ölçülmüştür. Tek eksenli uzama, düzlemsel uzama, iki eksenli uzama ve eş eksenli uzama durumlarına göre şekillendirme sınır eğrileri çıkarılmıştır [100].

Termoplastik kompozit levhaların farklı kesitli zımbalar ile bükülmesi işleminde geri gelme, delaminasyon, yırtılma gibi kusurların araştırılması ile ilgili bazı çalışmalar yürütülmüştür [101-109]. Boucher ve Champagne yaptıkları çalışmada, bir otomobilin çarpışma direği parçasını kademeli bükme kalıbı kullanarak çeşitli termoplastik kompozit levhalardan imal etmişler ve daha sonra eğme testi ile mekanik performanslarını karşılaştırmışlardır. Numune sıcaklığı erime sıcaklığının 50 °C üzerinde, pres kapanma hızı 500 mm/s ve şekillendirme yükü 1000 ton olarak seçilmiştir. Cam/polipropilen, cam/polyamid-6, karbon/polyamid-6 ve karbon/polyamid-66 olmak üzere dört tür kompozit levhadan parça imal edilmiştir. Tek yönlü sürekli elyaf takviyeli prepregler (0/90), (+45/-45) ve (0/90/+45/-45/0/90) oryantasyonlarda hazırlanmıştır. Kademeli bükme işlemi kullanılan kalıp kavisleri 6 mm, taban genişliği 65 mm, derinliği 21 mm ve 25 mm olarak tasarlanmıştır. Üç nokta eğme testi sonucunda  $\pm 45$  dizilime sahip levhaların eğilme dayanımı diğerlerine göre yaklaşık iki kat daha fazla çıkmıştır. Cam elyaf takviyeli polipropilen ve karbon elyaf takviyeli polyamid-66 kompozitlerinin hasar durumunda yer değiştirme miktarları ve yük durumları sebebiyle eğilme performansları yüksek çıkmıştır [110].

Termoplastik kompozitlerin levhalar halinde imal edilmesi, levhaların derin çekilmesinde kırışma, elyaf yönlenmesi gibi bazı deformasyonların belirlenmesi, sıcaklığın şekillendirme kuvveti üzerine etkileri, şekil alma kabiliyetleri ve hataları araştırılmıştır [111-124]. Shirani vd. yaptıkları çalışmada, dokunmuş/tek yönlü cam elyaf takviyeli polipropilen plakaların erime/yumuşama sıcaklıklarına getirilerek, kapalı kalıpta şapka şekline getirilmesi için gereken pres kuvvetini incelemişlerdir. 54 mm zımba ile 150 mm çaptaki numuneler derin çekilmiş ve tutma basıncı 25 bar olarak sabit tutulmuştur. Numuneler 180 °C ön ısıtma sıcaklığında farklı sürelerde bekletilmiş ve parça kalitesi değerlendirilmiştir. Isıtma süresi 80 dakikanın üzerine çıktığında termoplastik malzeme yüzeyinin oksitlendiği, 60 dakikanın altında ise liflerde kısmen kopmanın meydana geldiği tespit edilmiştir [125].

Harrison vd. yaptıkları çalışmada, 0/90° yönelimli iki katmanlı tek yönlü cam elyaftan oluşan 0,7 mm kalınlığındaki polipropilen kompozit plaka, çift eğrili kalıpta ısıyla şekillendirilmiştir. İnce plaka, başlangıçta, köşe ve kenarlarından yaylarla gerdirilmiştir. Farklı hızlarda ve sıcaklıklarda oluşturulan geometri boyunca kayma açıları ölçülmüştür. Kalıp sıcaklığı arttıkça aksenal kuvvet azalmış, kayma açıları artmıştır. Tutucu kullanılmadığı için bölgesel kırışıklıklar meydana gelmiştir. Düşük sıcaklıklarda şekillendirmede kayma profilleri düzenli değişerek daha homojen bir yapı oluşmuştur [126].

Talapatra vd. yaptıkları çalışmada, çapraz katlı ( $\pm 45^\circ$ ) ve enine/boyuna dizilimli (0/90°) sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit levhaların Erichsen çökertme yüksekliğini belirlemek için eş aksenli sıvama testi yapmışlardır. Şekillendirme deneyi öncesinde, farklı kalınlıklardaki kompozit levhalar alçak yoğunluklu polietilenin erime sıcaklığı olan 200 °C'de kısa süreli ısıtılmıştır. Ardından, 20 mm çapındaki Erichsen zımbası ile 0,1 mm/s hızla 10 kN yük uygulanmıştır. Kalınlık arttıkça çökertme yüksekliği artmış ve  $\pm 45^\circ$  oryantasyonuna sahip levhaların Erichsen indeksi %7 daha fazla çıkmıştır [127].

Suresh ve Kumar yaptıkları çalışmada, dokunmuş cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit levhaların şekillendirilebilirliğini araştırmışlardır. 2 mm kalınlıktaki numuneler 108 mm çapta su jetiyle kesilerek hazırlanmıştır. Yarı-küresel zımba 27,5 mm dış yarıçapa ve kalıp 30 mm iç yarıçapa sahiptir. Kalıp sıcaklığı (30, 100, 170 °C), numune sıcaklığı



(170, 200, 230 °C) ve tutucu kuvveti (2, 5, 8 kN) değiştirilerek, çekme oranı ve logaritmik kalınlık değişimi incelenmiştir. Taguchi yöntemine göre deney tasarımı oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Minitab-17 yazılımı ile optimize edilmiştir. En iyi şekillendirme performansı, 170 °C kalıp sıcaklığı, 200 °C numune sıcaklığı, 2 kN tutucu kuvveti şartlarında; çekme derinliği en fazla 29,25 mm olmuş ve parça flanş kalınlığı 1,96 mm olarak belirlenmiştir [128].

Viisainen vd. yaptıkları çalışmada,  $\pm 45^\circ$  iki eksenli dokunmuş karbon elyaf takviyeli polyester kompozit levhanın şekillendirme durumunda oluşan kırılma kusurunu araştırmışlardır. 180 mm ve 287 mm çaplarında numunelerin şekillendirilmesi için 75 mm yarıçapında zımba kullanılmıştır. Dijital görüntü korelasyonu tekniğiyle kırılma genliği hesaplanmış ve farklı tutucu kuvveti değerlerine göre kritik kayma açıları karşılaştırılmıştır. Büyük çaplı numunede kırılma daha fazla gerçekleşmiştir. Tutucu kuvveti arttıkça kayma açısı artmış, ancak kırılma genliği azalmıştır. Zımba ilerleme miktarı yükseldikçe kırılma bölgeleri artmıştır [129].

Termoplastik kompozit şeritlerin üç boyutlu geometriye sahip kalıba yatırılarak diyafram veya sıkıştırma kalıplama yöntemleri ile şekillendirme kusurlarının incelenmesi ve termoplastik kompozit levhadan deneme-yanılma yöntemiyle termoform kalıpta parça imalatı uygulamaları üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır [130-134]. Wakeman vd. yaptıkları çalışmada, farklı tür ve yapılarda elyaf takviyesi içeren 3 mm kalınlığındaki termoplastik kompozit plakalardan çift eğrili kap şeklinde bir parça imalatı için sıkıştırma kalıplama işlemini incelemişlerdir. Tedarik edilen plakaların boşluk alanları optik mikroskop ile belirlenmiş ve başlangıçta aynı oranda boşluğa sahip üç malzemenin şekillendirme sonrasındaki durumları değerlendirilmiştir. Şekillendirme işleminde, farklı uygulama basınçları (5; 17,5; 30 bar), ön ısıtma sıcaklıkları (240→300 °C), kalıp sıcaklıkları (40; 90; 140 °C), pres hızları (10; 88; 166 bar) ve ütüleme sürelerinin (10; 20; 30 s) parça kesitindeki boşluk değişimine etkisi araştırılmıştır. Boşluk alanı ön ısıtma sıcaklığı yükseldikçe artmış, uygulama basıncı ve kalıp sıcaklığı yükseldikçe azalmıştır. Dokunmuş cam elyaf takviyeli Polyamid-6 ve dokunmuş karbon elyaf takviyeli Polyamid-66 kompozit malzemeleri için şekillendirme basıncının baskın parametre olduğu görülmüştür. Dokunmuş karbon elyaf ve kırılmış cam elyaf keçe takviyeli Polyamid-66 kompozit plaka içinse kalıp sıcaklığı önemli etki göstermiştir [135].

Termoplastik kompozit levhadan tasarlanan çeşitli geometrik yapılarda parçaların üç boyutlu şekillendirilmesi ile ilgili olarak literatürde çeşitli sonlu elemanlar analizi çalışmaları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır [136-142]. Chen vd. yaptıkları çalışmada, termoform kalıplama işlemlerinde kompozit malzemelerin düzlem içi kayma davranışı sergilediği prensibinden yola çıkarak, polifenilen sülfür reçinesi emdirilmiş dokunmuş karbon elyafın, farklı çekme-uzama hızlarına ve işlem sıcaklıklarına göre, kayma yer değiştirmesine karşılık kuvvet değişimlerini incelemiştir. Daha sonra, bu verilerden yararlanarak, dokuma takviyeli termoplastik kompozit levhaların şekillendirilmesi üzerine termo-visko-elastik bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Derin çekme ve bükme prensiplerine göre tasarlanan analizlerin kayma deformasyonu sonuçlarının gerçeğe yakın tahmin edebildiği raporlanmıştır [143].

Davey vd. yaptıkları çalışmada, dört prepreg tabakadan oluşan karbon elyaf takviyeli poli(eter eter keton) kompozit levhaların oda sıcaklığında derin çekilmesini simüle etmek için bir sonlu eleman modeli tasarlamışlardır. Analizlerde, farklı tutucu kuvvetleri (2, 7, 14 kN) kullanılmış ve derinlik değişimine göre grid uzamaları ölçülerek deformasyonlar tahmin edilmiştir. 180 mm çapındaki numunenin 50 mm çapta zımba ile derin çekilmesinde hasar başlangıcı, en iyi 2 kN tutma kuvvetiyle 11,5 mm derinlikte meydana gelmiştir [144].

Haanapel vd. yaptıkları çalışmada, iki farklı kompozit malzemenin kayma, sürtünme ve eğilme testleriyle karakterizasyonunun ardından, derin olmayan bükümler içeren bir parça tasarımına uygun şekil verme analiz modeli geliştirmişlerdir. Tek yönlü karbon elyaf takviyeli poli(eter eter keton) ve dokunmuş cam elyaf takviyeli polifenilen sülfür kompozit malzemelerin şekillendirme deformasyonları incelenmiştir. Parça geometrisinde kıvrımların olduğu bölgelerde büyük oranda kırışmalar meydana gelmiştir. Tek yönlü elyafla güçlendirilmiş kompozitin düzlem içi kaymaya karşı daha iyi direnç gösterdiği ve dokunmuş elyafla güçlendirilmiş kompozit malzemenin daha iyi şekillendirildiği belirlenmiştir. Parçada bükümlerin olduğu bölgelerde dalgalanmalar olduğundan şekillendirme için kritik yerler olarak tahmin edilmiştir [145].

Metal saclar ile polimer veya kompozitlerinin tabakalar halinde birleştirilmesiyle elde edilen sandviç kompozit paneller üzerine yapılan çalışmalarda; imalat işlem parametrelerinin karşılaştırılması; çekme, basma, darbe, eğme özelliklerinin belirlenmesi;

bükme ile iki boyutlu şekil verilmesi; çekme oranı, pres kuvveti, tutma basıncı, sıcaklık gibi parametrelerin şekil verme yeteneğine etkisini belirlemek için derin çekilerek üç boyutlu şekillendirilmesi; delaminasyon davranışları ve bu malzeme seçeneğine ait ŞSD'lerin oluşturulması ile ilgili olarak literatürde çeşitli deneysel ve nümerik araştırmalar yer almaktadır [146-152].

Reyes ve Kang yaptıkları çalışmada, 0,3 mm kalınlığa sahip iki alüminyum plaka arasına yerleştirilmiş 0,4 mm kalınlığında kendinden takviyeli polipropilen plaka ve 0,6 mm kalınlıkta cam elyaf takviyeli polipropilen plakalar kalıpta preslenerek iki çeşit sandviç kompozit panel imal etmişlerdir. İmal edilen panellerden çekme, yorulma ve şekillendirme test numuneleri hazırlanmıştır. Şekillendirme deneyi öncesinde 2:1 çekme oranında (numune çapı 200 mm / zımba çapı 101,6 mm) dikdörtgen olarak kesilen numunelerin bir yüzeyine elektrokimyasal dağlama yöntemiyle kenar boyu 2,5 mm olan kare deseninde markalama yapılmıştır. Zımba 150 mm/dak hızla hareket ederek numuneler yırtılıncaya kadar derin çekilmiştir. İki tür sandviç kompozit panelde de ara yüzey ayrışmaları (tabakalar arası delaminasyon) benzer şekilde gerçekleşmiştir. Derin çekme deneyinden sonra yırtılmanın gerçekleştiği bölgenin yakın çevresinde optik ölçüm cihazıyla kare desenlerindeki uzamalar belirlenmiş ve şekillendirme sınır eğrileri oluşturulmuştur. Aynı kalınlıkta alüminyum sac malzeme ile karşılaştırıldıklarında, polimer kompozit plakaların alüminyum malzemenin şekillendirilme kabiliyetine katkı sunduğu görülmüştür. İmal edilen iki tür sandviç panelin ŞSD'leri incelendiğinde, cam elyafla güçlendirilmiş olanın kendinden takviyeliye göre daha üstün özellik sergilediği tespit edilmiştir [153].

Sexton vd. yaptıkları çalışmada, her iki yüzeyine de yapıştırıcı film bulunan kendinden takviyeli polipropilen plakanın alüminyum plakalar arasına yerleştirilmesiyle 2,2 mm kalınlığında sandviç kompozit paneller imal etmişlerdir. Oda sıcaklığında şekillendirme testleri için genişliği 25 ile 200 mm arasında değişen dairesel numuneler hazırlanmıştır. Yarı küresel bir zımba ile derin çekilen numunelerin yüzey uzamaları, deney sırasında eş zamanlı üç boyutlu fotogrametrik ölçüm sistemi ile takip edilerek ŞSD'leri elde edilmiştir. Sandviç kompozit panelin ŞSD'sindeki güvenli bölgesi yalnız alüminyumun güvenli şekillendirme bölgesinde daha büyük çıkmıştır. Ayrıca, yüzey gerinim dağılımının daha homojen olduğu belirlenmiştir. Bu gelişmiş hafif malzeme seçeneğinin kalıpta şekillendirilmesiyle seri üretime uygun olduğu görülmüştür [148].

Saadatfard vd. yaptıkları çalışmada, alt/üst tabakalarda ince alüminyum plakalar yer alan ve iki poliüretan film arasına yerleştirilmiş dokunmuş cam elyaftan oluşan 0,5 mm kalınlığa sahip sandviç panellerin, hidrodinamik çekme tekniği altında, şekillendirme sınırlarını incelemişlerdir. 50 mm çapta yarı küresel bir zımba ile şekillendirilmek üzere 90, 100, 110 ve 112 mm çaplarda numuneler hazırlanmıştır. Çekme oranı (1,8 ile 2,25 arası), şekillendirme basıncı (15 ile 65 bar arası) ve tutma basıncının (60 ile 150 bar arası), yırtılma, kırılma, delaminasyon gibi şekillendirme deformasyonlarına etkileri incelenmiştir. Çizilen ŞSD'lerden ve deforme olmuş numune görüntülerinden yararlanarak, en kusursuz şekillendirmenin gerçekleştiği işlem parametrelerinin; çekme oranı için 2, şekillendirme basıncı için 35 bar ve tutma basıncı için 80 bar olduğu tespit edilmiştir [154].

Birçok araştırmacı, doğal kırılmış elyaf veya kendinden takviyeli polimer plakaların ve metal-termoplastik sandviç panellerin şekillendirilmesi üzerine; kalıp geometrisi, takım kavisleri, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme, iş parçası boyutları, hız, kuvvet ve sıcaklık parametrelerinin etkisini incelemiş, geri gelme, boyunlaşma, kayma gibi deformasyonları azaltarak nihai ürünün kalitesini artırmak için ve enerji tüketimi ile maliyetleri en aza indirmek için bu parametrelerin optimizasyonu üzerine çeşitli analiz çalışmaları yürütmüşlerdir. Termoplastik kompozit levha özellikleri ve şekillendirilebilirliklerini konu alan çalışmalara rağmen, henüz levha halindeki termoplastik kompozitlerin termoform kalıpta şekillendirilmeleri sırasındaki oluşan hatalar, oluşma mekanizmaları ve bunları tetikleyen kalıplama parametreleri üzerine detaylı bir çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada, kompozit levhaların şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlenmesi için bir sac metal şekillendirme prosedürü olan Nakajima testi (deformasyon oluşuncaya kadar düz levhaların derin çekilmesi yöntemi) gözden geçirilerek kompozit levhalara uyarlanmıştır. Bu çalışma ile farklı matriks/elyaf kombinasyonlarına sahip termoplastik kompozitlerin termoform yönteminde kalıplama parametrelerinin ve sıcaklığın deformasyon hatalarına etkisinin deneysel olarak araştırılması, ŞSD'lerin oluşturulmasıyla ilgili malzemelerin şekillendirme işlemi sırasında göstereceği davranışların incelenmesi amaçlanmıştır.

### 3. MATERYAL VE METOD

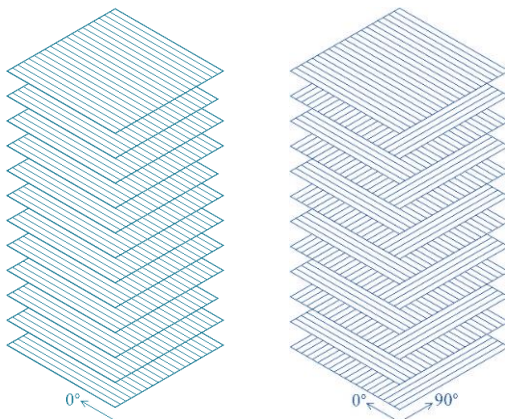
Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan malzemeler, deneysel yöntemler ve araç-gereçler açıklanmış, malzeme testleri, deneysel çalışma tasarımı, seçim kriterleri ve verilerin analizi hakkında bilgiler sunulmuştur.

#### 3.1. Malzeme

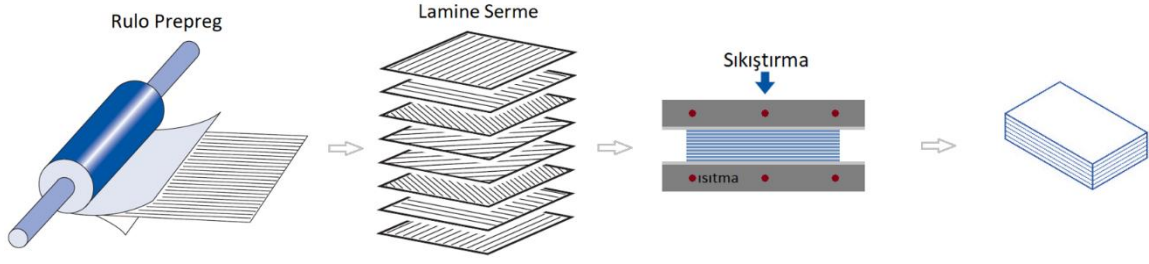
Bu çalışmada kullanılan malzemeler sıkıştırma-kalıplama yöntemi ile 475x475 mm<sup>2</sup> boyutlarında düz plaka şeklinde imal ettirilmiştir. 0,25 mm kalınlığa sahip, tek yönlü sürekli elyaf takviyeli, önceden reçine emdirilmiş (prepreg) şerit kompozitlerin 12 kat üst üste dizilmesiyle levha haline getirilmiştir. Laminasyon için herhangi bir yapıştırıcı, renklendirici vb. katkı maddesi kullanılmamıştır. Prepreg yapısında güçlendirme elemanı olarak bulunan E tipi cam elyaf yaklaşık 430 g/m<sup>2</sup> alansal ağırlığa sahiptir. Deneylerde kullanılan kompozit malzeme çeşitleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de takviye elemanı yapıları, Şekil 3.2’de kompozit levha imalatı ve Resim 3.1’de kompozit levha malzemelere örnek gösterilmiştir [22].

Çizelge 3.1. Deney malzemeleri

Malzeme çeşidi	Matriks türü	Elyaf oranı	Oryantasyon
PP-60	Polipropilen	%60	(0/90°) ortotropik
PP-70	Polipropilen	%70	(0/90°) ortotropik
Ud-PP-60	Polipropilen	%60	(0°) tek yönlü
PA6-60	Polyamid-6	%60	(0/90°) ortotropik
PA6-70	Polyamid-6	%70	(0/90°) ortotropik



Şekil 3.1. Tek yönlü ve ortotropik elyaf oryantasyonları



Şekil 3.2. Kompozit levha imalatı



Resim 3.1. Cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit levha

### 3.2. Malzeme Karakterizasyonu

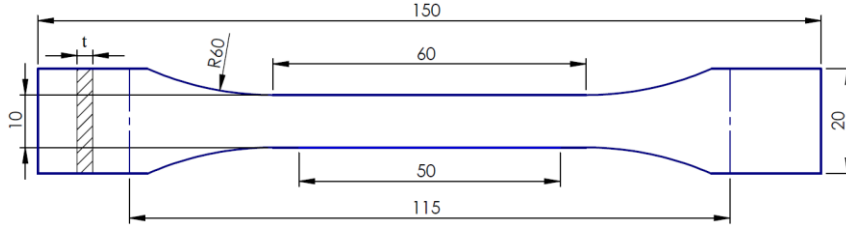
Malzeme testi, bir ürün veya uygulama için en uygun malzemeyi seçmeye yardımcı olmak için kullanılır. Çoğu imalat süreci, malzemelerin plastik (kalıcı) deformasyonla şekillendirilmesini içerir ve şekillendirme kabiliyetinin değerlendirilmesinde malzeme mukavemet özelliklerinin bilinmesi önemli bir faktördür. Otomotiv endüstrisinde ticari olarak yeni kullanılmaya başlanılan termoplastik kompozit levhalar, yerli bir firmadan (Durfom) satın alma yoluyla tedarik edilmiştir. Tedarikçiden satın alınan malzemelerin bazı mekanik ve ısıl özellikleri Gazi Üniversitesi laboratuvarlarında yapılan testlerle belirlenmiştir. Yapılan testler ile ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur.

#### 3.2.1. Mekanik testler

##### Çekme testi

Malzemelerin dayanım, tokluk, elastik modül gibi mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın metot çekme testidir. Metaller için genellikle dairesel kesitli numuneler kullanılırken, kompozit malzemeler için dikdörtgen kesitli numuneler

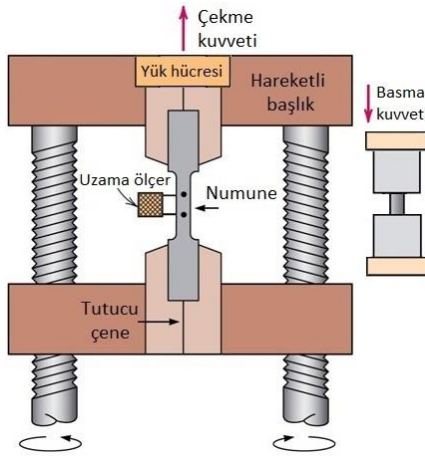
kullanılmaktadır. Bu çalışmada, numuneler ISO-527/4 standardında yer alan B1 tipine göre hazırlanmıştır [155]. Numuneye ait ölçüler Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Çekme testleri Instron-3369 üniversal test makinasında ve 1 mm/dk sabit hız oranında gerçekleştirilmiştir. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Çekme testi numunesi

### Basma testi

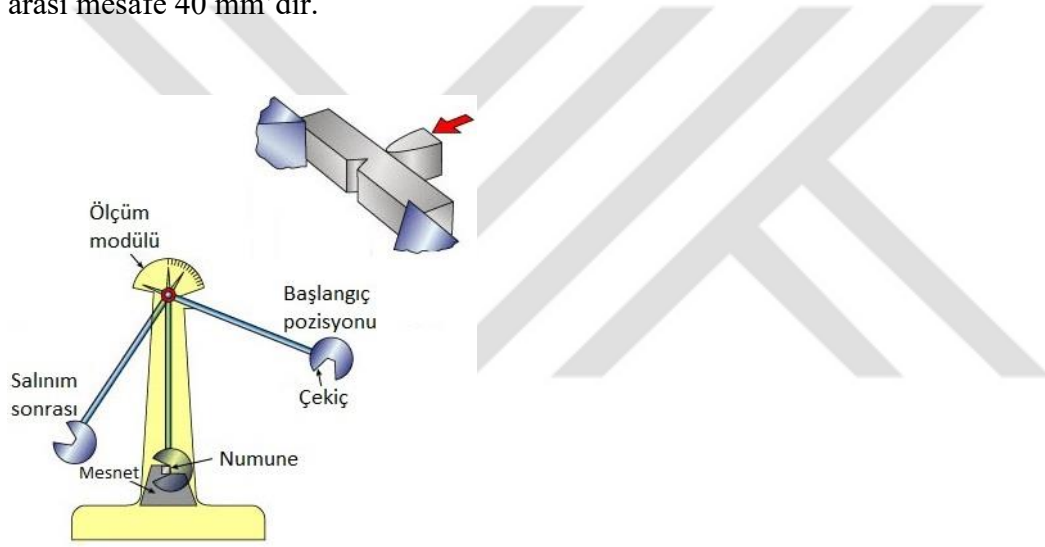
Dövme, haddeleme, ekstrüzyon gibi imalat işlemlerinde, iş parçası basınç gerilmelerine maruz bırakılarak gerçekleştirilir. Basma testi, bu işlemlerdeki basma kuvvetlerini ve güç gereksinimlerini tahmin etmek için yararlı bilgiler verir. Basma testi için numuneler ISO-14126 standardındaki B1 tipine göre hazırlanmıştır [156]. Numune genişliği 10 mm'dir. Test cihazının tutma çeneleri yük uygulandığında numune yüzeyinden kaymaması için yeterince uzun tutma payı (iki uçta da 50 mm) bırakılmış ve basma yüküne maruz kalan bölge burkulmaya neden olmaması için mümkün olduğunca kısa (10 mm) tutulmuştur. Şekil 3.4'te çekme ve basma testlerinin yapılışı gösterilmiştir [157].



Şekil 3.4. Çekme ve basma testinin yapılışı

### Darbe testi

Birçok imalat işleminde malzemeler ve makine bileşenleri darbeye maruz kalmaktadırlar. Tipik bir darbe testi, çentikli bir numunenin darbe test cihazına yerleştirilmesi ve numunenin sallanan bir sarkaç ile kırılması şeklinde gerçekleştirilir. Sünek davranış göstermeyen malzemelerde çentik oluşturulması zorunlu değildir. Sarkacın salınım miktarından numuneyi kırarken harcanan enerji hesaplanır ve bu enerji malzemenin darbe tokluğunu verir. Charpy prensibine göre darbe testi için ISO-179/1 standardı referans alınmış ve numuneler 'fn' darbe yönüne göre iki destek karşısına yerleştirilmiştir [158]. Numune ölçüleri  $10 \times 80 \text{ mm}^2$ 'dir. Testin yapılışı Şekil 3.5'te gösterilmiştir [157]. Destekler arası mesafe 40 mm'dir.

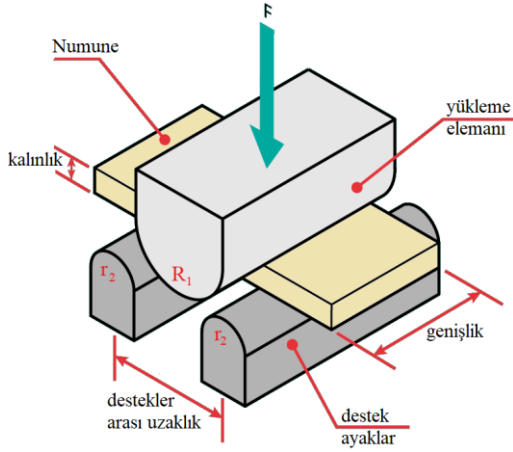


Şekil 3.5. Darbe testinin yapılışı

### Kayma testi

Üç notadan temas ile gerçekleştirilen bu test, tabakalar arası kayma dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eğme testinden farklı olarak, mesnetler arasındaki mesafe daha kısa ve numune genişliği daha fazladır. Kısa kiriş kayma metoduna göre yapılan eğilme işlemi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. ISO-14130 standardına göre numuneler  $50 \times 25 \text{ mm}^2$  ölçüsünde hazırlanmış ve test hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir [159]. Yükleme elemanı yarıçapı  $R_1=5 \text{ mm}$ , destek ayakların yarıçapı  $r_2=2 \text{ mm}$  ve destekler arası uzaklık 15 mm olarak ayarlanmıştır. Testler, Instron-3369 universal test makinasında yapılmıştır.



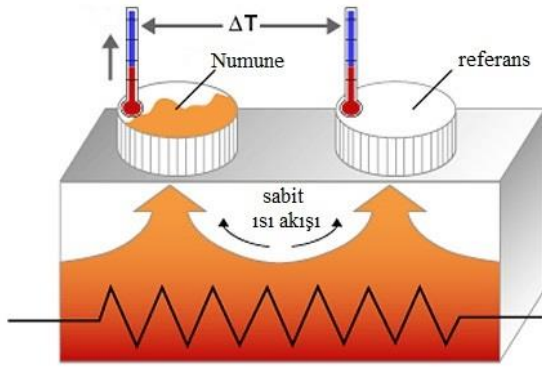


Şekil 3.6. Kısa kiriş kayma testinin yapılışı

### 3.2.2. Isıl testler

#### Diferansiyel taramalı kalorimetre testi (DSC)

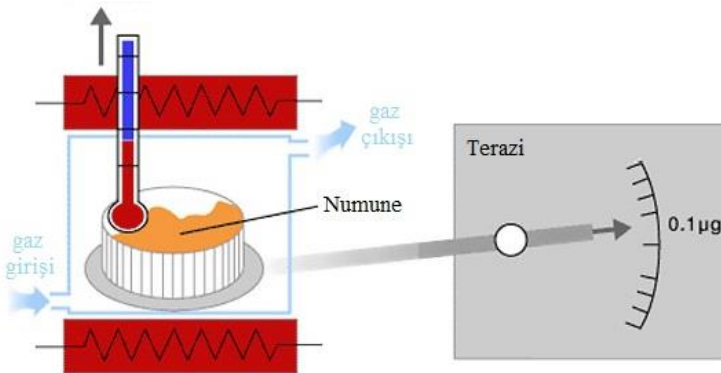
Bu analizde, ısıtılan, sabit sıcaklıkta bekletilen veya soğutulan numunenin enerji değişim miktarı ölçülür. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, referans bir madde ile numune arasındaki ısı farkı, zaman veya sıcaklık değişime bağlı olarak kaydedilir [160]. DSC analizinde, polimer ve türevi malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı, kristallenme sıcaklığı ve bu hal değişimindeki entalpi değerleri tespit edilmektedir. Numunelerin küçük parçalara ayrılması için özel trimleme bıçağı kullanılmış ve alüminyum kaplara koyularak ağırlıkları tartılmıştır. Kabın darası alınarak, numune kütleleri 5-10 mg arasında ayarlanmıştır. Isıtma sırasında gaz çıkışı ihtimaline karşılık kapların kapaklarına toplu iğne ile delik açılmıştır. Analizler, ISO-11357 standardına uygun Hitachi-DSC/7020 test cihazında gerçekleştirilmiştir [161]. Cihaza yerleştirilen numune, önce 0 °C’den 300 °C’ye kadar ısıtılmış, ardından 5 dk sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve daha sonra 70 °C’ye kadar soğutulmuştur. Isıtma ve soğutma işlemi 10 °C/dk’lık oranla kontrollü bir şekilde yapılmıştır. Analizler, numunelerin yükseltgenerek bozunmasını engellemek için Argon ortamında yapılmıştır.



Şekil 3.7. DSC anali prensibi

### Termal gravimetrik analiz testi (TGA)

TGA analizinde, malzemelerin ağırlık değişimi, zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Analiz prensibi Şekil 3.8’de gösterilmiştir [160]. Bu analiz, genellikle malzemelerin elyaf oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Analizler, ISO-11358 standardına uygun olarak STA/7300 cihazında gerçekleştirilmiştir [162]. DSC testinde tarif edildiği gibi numuneler hazırlandıktan sonra TGA analiz cihazına yerleştirilmiştir. Numune 0 °C’den 650 °C’ye kadar 10 °C/dk’lık lineer bir artış ile ısıtılmıştır. Analizler, 20 ml/dk akış oranıyla ve Argon ortamında yapılmıştır.

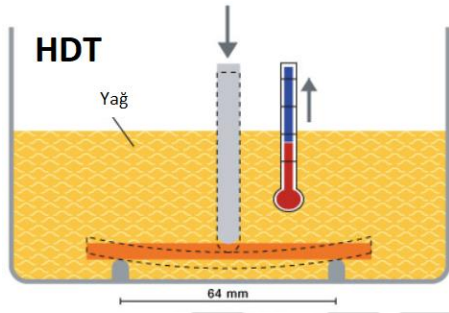


Şekil 3.8. TGA analiz prensibi

### Isıl sapma sıcaklığı testi (HDT)

Termoplastikler, sert kauçuklar ve termoplastik kompozit malzemelerin, işlem ve kullanım sıcaklıklarının sınırını belirlemek için iki teknik kullanılmaktadır. Bunlardan biri HDT testi, yani ısıl sapma sıcaklığı testidir. Bu testte, kontrollü olarak ısıtılan bir yağ banyosunda, iki destek ayak üzerine yerleştirilmiş numune orta noktasından eğilme yüküne

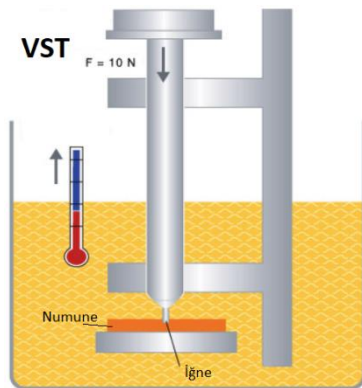
maruz bırakılır. ISO-75 standardına göre yağın sıcaklık artış oranı  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  olarak seçilmiş ve (3 mm) numune kalınlığına göre itici çubuğa 68 g ağırlık takılarak 1,8 MPa eğme gerilmesi altında tutulmuştur [163]. Standartta belirtildiği gibi numuneler  $80 \times 10\text{ mm}^2$  olarak hazırlanmıştır. Numunenin yumuşamasıyla meydana gelen (3 mm numune kalınlığı için hesaplanmış) yer değiştirme miktarı 0,455 mm olduğundaki sıcaklık değeri, ısıl sapma sıcaklığı olarak kaydedilmiştir. Testin yapılışı Şekil 3.9’da gösterilmiştir [164].



Şekil 3.9. DSC test prensibi

#### Vicat yumuşama sıcaklığı testi (VST)

Termoplastik ve türevi malzemelerin kullanım sıcaklıklarının tespitinde kullanılan bir diğer yöntem de Vicat yumuşama sıcaklığı testidir. Bu yöntemde, HDT testinde olduğu gibi yağ banyosu  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  artış oranıyla kontrollü bir şekilde ısıtılır. ISO-306 standardına göre numuneler  $10 \times 10\text{ mm}^2$  olarak hazırlanmıştır [165]. Bu testte, düz bir yüzeyde bulunan numune 1 mm çaplı bir iğne ucu ile 10 N yük altında bırakılmış ve batma derinliği 1 mm olduğundaki sıcaklık değeri Vicat yumuşama sıcaklığı olarak kaydedilmiştir. HDT ve VST testlerinde Gotech-Hv/2000/m3w cihazı kullanılmıştır. Testin yapılışı Şekil 3.10’da gösterilmiştir [164].



Şekil 3.10. VST test prensibi

### 3.3. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, farklı matris/elyaf konfigürasyonlarına sahip termoplastik kompozit levhaların şekil alma kabiliyetlerinin belirlenmesi için ŞSD'leri oluşturulmuştur. Bu bağlamda, deneysel çalışmanın işlem basamakları aşağıda sıralanmış ve açıklanmıştır.

- 1- Deneysel tasarımın oluşturulması
- 2- Numunelerin kesilmesi
- 3- Numunelerin markalanması
- 4- Ön ısıtma
- 5- Deneysel düzeneğin kurulumu
- 6- Deneylerin yapılması
- 7- Şekil değişimlerinin ölçülmesi
- 8- ŞSD'lerin çizilmesi
- 9- Kalınlık değişiminin ölçülmesi

#### 3.3.1. Deneysel tasarımın oluşturulması

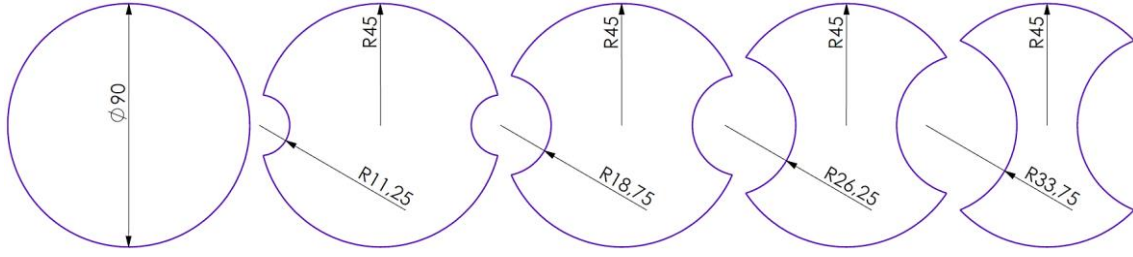
Malzeme karakterizasyonu ve yapılan ön deneyler neticesinde oluşturulan deneysel tasarımı Çizelge 3.2'de verilmiştir. 3'er seviyeli 4 deneysel parametresi tam faktöriyel olarak uygulanmıştır. En az tutma basıncını ve seviyelerini belirleyebilmek için, 0,1 MPa'tan itibaren ön denemeler yapılmış ve en az tutma basıncı olarak 0,4 MPa tespit edilmiştir. PP-60 için farklı sıcaklıklar diğer parametrelerde değiştirilerek deneyimlenmiş ve yumuşama sıcaklığının en uygun olduğu belirlendiği için diğer malzeme türleri için numune sıcaklıkları çeşitlendirilmemiştir. Nakajima standardına göre 90 mm/dk zımba hızı başlangıç seviyesi olarak referans alınmış ve ısıtılan numunenin daha düşük hızlarda soğuma durumu dikkate alınarak hız seviyeleri yükseltilmiştir. Ön deneylerde derinlik alt ve üst sınırları tespit edilmiş ve 5 farklı numune geometrisine göre çeşitli derinlikler çalışılmıştır.

Çizelge 3.2. Deney tasarımı

Parametre	Seviye			
Malzeme çeşidi	PP-60	PP-70	PA6-60	PA6-70
Numune Sıcaklığı (°C)	124			
	159	159	211	211
	169			
Zımba Hızı (mm/dk)	90	90	90	90
	120	120	120	120
	150	150	150	150
Tutma Basıncı (Mpa)	0,4	0,4	0,4	0,4
	0,6	0,6	0,6	0,6
	0,8	0,8	0,8	0,8
Çekme Derinliği (mm)	20-30 arası	20-30 arası	20-30 arası	20-30 arası

### 3.3.2. Numunelerin kesilmesi

Kompozit levha malzemeler su jeti tezgâhında (CT-2016) kesilerek uygun geometrilere numuneler oluşturulmuştur. Kesim işleminde 0,9 mm ( $\pm 0,1$ ) uç çapına sahip nozul kullanılmıştır. Hız-basınç ilişkisi en uygun 1000 mm/s ve 6000 bar olarak belirlenmiştir. Malzemenin ani su basıncıyla şişerek zarar görmemesi için püskürtme düşük basınçla başlatılmış ve tezgâh basıncı kontrollü olarak artırılmıştır. Derin çekme numuneleri, sac metaller için kullanılan ISO-12004 Nakajima test standardı dikkate alınarak hazırlanmıştır [166]. Malzemeler şekil verme sırasında çeşitli yük durumları ile karşılaşır ve bölgesel olarak farklı uzamalara maruz kalırlar. Şekillendirme sınır eğrilerinin elde edilmesi için standartta, çeşitli gerilme-gerinim oranlarının etkisini görmeyi sağladığından dolayı farklı geometrilere numunelerin kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada kullanılan 5 farklı geometri Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Numuneler tam daireden kum saati biçimine benzer bir şekle kadar hazırlanmış, bir yöndeki çap sabit kalmış ve diğer eksendeki çap git gide daralmıştır. Böylece, literatürde açıklanan şekil değiştirme oranının deformasyon modunu nasıl etkilediği de tespit edilmiştir [167].



Şekil 3.11. Derin çekme numuneleri

### 3.3.3. Numunelerin markalanması

Şekil verme sırasında malzemede meydana gelen deformasyonların tespit edilmesi için ‘ızgara şekil değiştirme analizi’ tekniğinden yararlanılmış ve ISO-12004 standardında önerilen ızgara desenlerinden biri seçilmiştir. Sac metaller için elektro-kimyasal dağlama yöntemiyle bu ızgaralar oluşturulurken, bu yöntem polimer türevi malzemelere zarar vereceğinden kullanılmamıştır.

İlk olarak, lazer markalama denenmiş ve hız-hassasiyet açısından oldukça pratik olduğu görülmüştür. Ancak, lazer şiddeti ile hızı uygun şekilde ayarlanmaz ise, numune yüzeyinde polimerin erimesi/yanması gibi bazı kusurlara neden olabilmektedir.

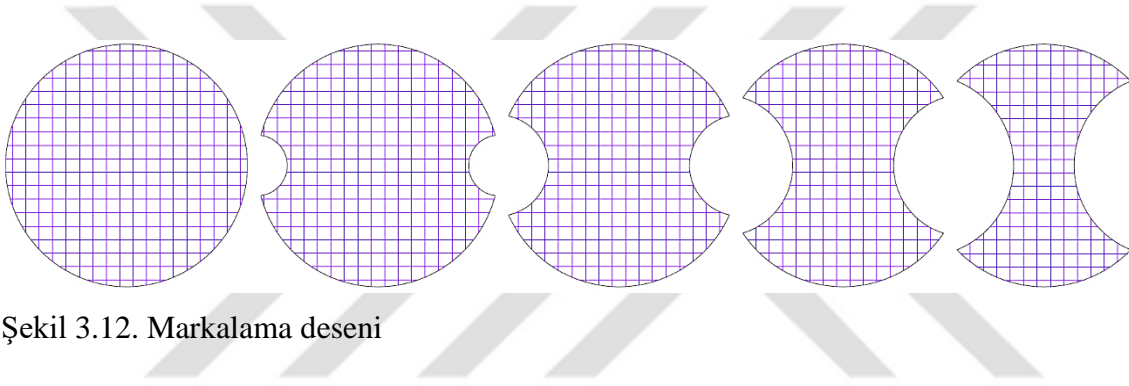
Daha sonra, ısıya dayanıklı, hızlı kuruyabilen vb. özelliklere sahip çeşitli sprey boyalarla önceden hazırlanmış ızgara kalıpları yardımıyla elle markalama denemeleri yapılmıştır. Lazere göre daha uzun zaman alan bu teknikte ızgaraların çevrelerinde saçılmalar meydana geldiğinden ilk ölçü hassasiyetinin düşük olduğu görülmüştür.

Alternatif olarak, sert zemin üzerine dijital baskı teknolojisiyle numune yüzeylerine kare şeklinde ızgaralar oluşturulmuş ve solvent bazlı boyanın polimerik yüzeyde tutunması için ultraviyole teknolojisiyle anlık kuruma sağlanarak numunelerin markalanması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem de, lazer kadar hızlı ve hassastır. Ancak, kuvvet uygulandığında cihaz boyasının polimerik yüzeyden kalktığı veya küçük bir temasla döküldüğü görülmüştür.

Bu yüzden, lazer tekniği üzerine yoğunlaşılması ve en uygun hız-güç değerleri tespit edilerek tahribatsız bir şekilde markalama gerçekleştirilmiştir. CO<sub>2</sub> tüplü CMA-1610-T lazer tezgâhında güç en az seviyeye ayarlanmış ve %14’te (maksimum güç 80 W)

çalıştırılarak, 60 mm/s hızla işlem yapılmıştır. Markalı ve markasız kompozit levhalardan hazırlanan çekme numuneleri karşılaştırılmış ve mukavemet değişikliği tekrarlardan oluşan standart sapma değeri (%2) içerisinde kalmıştır.

Suresh ve Kumar, dokunmuş cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit levhaların kesilmesini, su jeti yardımıyla sorunsuz bir şekilde yaptıklarını ve numune yüzeylerine içi boş kare desenli markalama yaptıklarını raporlamışlardır [128]. Bu çalışmada da Nakajima standardında verilmiş kare desenli ızgara modeli kullanılmıştır. Numune yüzeyindeki ızgaraların yerleşimine ait çizim Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Kenar ölçüsü 5 mm olan karelerin yerleşim planı için numune merkezi ile sabit çap yönü referans alınmıştır.



Şekil 3.12. Markalama deseni

### 3.3.4. Ön ısıtma

Termoplastik kompozit levhaların istenilen sıcaklığa ısıtılması için infrared ısıtıcı veya etüv fırın teknolojileri kullanılabilir. Etüv fırında malzeme kapalı ortamda hava sirkülasyonu ile ısıtılırken, infrared sistemde açık veya kapalı olarak ısıtma yapılabilir [128, 153]. Infrared sistemde ısıtma süresinin oldukça kısa olmasına rağmen, etüv fırında daha homojen bir ısıtma sağlanabilir [168]. Isıtma süresinin önemli olduğu kadar soğuma süresi de oldukça önem içermektedir. Çünkü malzemeler yumuşama sıcaklıklarına ısıtılırken, deneyler oda sıcaklığında gerçekleşmektedir. Bu durum, ısıtılan malzemenin hızlı bir soğuma göstermesine neden olabilmektedir. Bu yüzden, ısıtma işlemi sonrası numune sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi tespit edilmiştir. 1 mm çapa sahip J-tipi (ölçüm aralığı 0 °C - 300 °C) bir termokupl, numune merkezine yatay olarak açılan bir deliğe yerleştirilmiştir. Numune yumuşama sıcaklığına yakın bir değere kadar ısıtıldıktan sonra ısıtma durdurulmuş ve süre tutularak sıcaklık düşüşü kaydedilmiştir.



### 3.3.5. Deney düzeneğinin kurulumu

Deney düzeneği oluşturulurken bir etüv fırın, bir sıcaklık kontrol ünitesi, bir kompresör ve bir derin çekme test makinası kullanılmıştır. Etüv fırın (Nüve FN400), levha halindeki termoplastik kompozit numunelerinin derin çekilmeden önce deney tasarımında verilen sıcaklıklarda ısıtılması için kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol ünitesi (Elimko-6000), ısıtma kelepçesi ile indüksiyonlu ısıtılan kalıp arasına yerleştirilmiş bir termokupl aracılığıyla anlık sıcaklığın takip edilmesi için kullanılmıştır. Taşınabilir bir kompresör, derin çekme test makinasında düşük tutma basıncı değerlerinin (0,3 MPa'a kadar) daha hassas ayarlanabilmesi için ve üst plakanın konumunu değiştirebilmek için kullanılmıştır. Hidrolik aktüatörler ile kontrol edilen derin çekme makinası, Nakajima testi prensibine göre tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Anlık mesafenin ölçülmesi için düşey olarak konumlandırılmış yer değiştirme sensörünün sıcaklıktan etkilenmemesi için makine gövdesine yerleştirilmiş küçük bir fanla soğutulması sağlanmıştır. Bir set basınç transdüseri ile tutma basıncı ayarlanabilmiş ve yük hücresi ile kuvvet değişimleri takip edilmiştir. Deney düzeneği Resim 3.2'de gösterilmiştir. Deneylere başlanmadan önce, derin çekme test makinasının deplasman sıfırlaması, hız doğrulaması, kuvvet ve basınç ölçümlerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon için Esit-Pwi kontrol cihazı ile Flintec-RC3 yük ölçer kullanılmıştır.



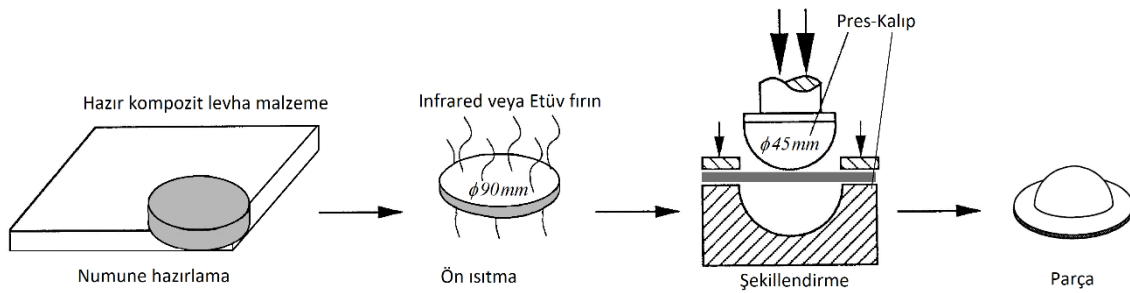
Resim 3.2. Deney düzeneği



### 3.3.6. Deneylerin yapılması

Numune, kalıp ile tutucu arasında yerleştirilmeden önce ısıtma işlemine tabii tutulmuştur. Numunelerin ısıtılması sıcaklık-süre ayarlı bir etüv fırın ile gerçekleştirilmiştir. Fırının istenilen sıcaklığa ve dengeye ulaşması için yaklaşık olarak 1 saat süre beklenmiştir. Numune, fırın içine yerleştirilerek deney tasarımında belirtilen sıcaklıklarda belirli bir süre ısıtılmıştır. Levha imalatı aşmasında uygulanan ısıl işlemde sonra erime noktasında tekrarlanan ısıl işlemler malzemede bölgesel yanıklara sebep olmaktadır. Ön deneylerde PP kompozitlerin 5 dk, PA6 kompozitlerin 3 dk ısıtılmasının yeterli olduğu belirlenmiştir. Belirtilen sürelerin aşılmasıyla birlikte numunelerde sararmalar meydana gelmiştir. Isıtma işleminin ardından, numune bir maşa yardımıyla fırından alındıktan sonra hızlıca derin çekme makinasına taşınmıştır. Numune merkezi ile zımba-kalıp çalışma ekseninin aynı olması için bir merkezleme aparatından yararlanılmıştır.

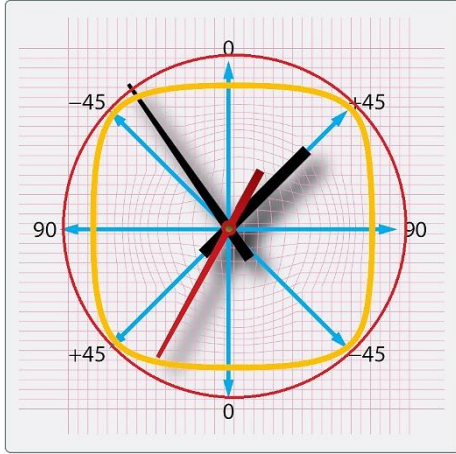
Kontrol panelinden başlama komutu verildiğinde, önceden ayarlanmış tutma basıncı cihaz tarafından (+/- 0,05 MPa toleransla) otomatik olarak ayarlanmış, girilmiş hız değerine göre zımba hareketi başlamış ve zımba istenilen derinliğe kadar ilerlediğinde deney sonlandırılmıştır. Bu sırada numuneyi derin çekmek için uygulanan kuvvet ve yer değiştirme ( $\pm 0,05$  kN ve  $\pm 0,05$  mm hassasiyetle) kaydedilmiştir. Zımba kuvveti ortadan kalktıktan sonra, anlık ölçülen mesafe sabit kalıncaya kadar bir süre beklenmiş ve yükseklik kaydedilmiştir. Şekil almış numune kalıptan çıkartılarak bir sonraki deney yapılmıştır. Deneyler, Nakajima standartındaki prensip dikkate alınarak yapılmış ve şematik olarak Şekil 3.13'te gösterilmiştir [132]. Bu standartta çekme oranı (D/d); numune çapının zımba çapına oranı 2:1'dir. Buna bağlı olarak, yarı küresel zımba çapı 45 mm olarak ve numunenin geniş eksenini üzerindeki çapı 90 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.13. Deney yapılışı

### 3.3.7. Deformasyonların kontrolü

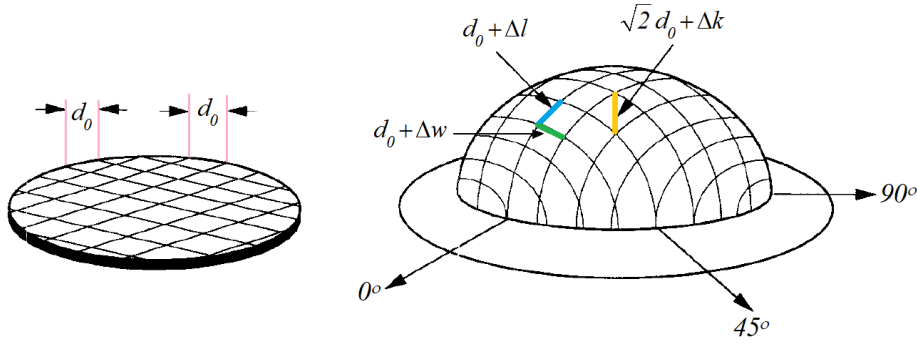
Kompozit levhaların derin çekilmesinden sonra yarı küresel kap şeklini almış parçalar, gözle muayene edilmiştir. Şekillendirme parametrelerinin parça kalitesine etkisi incelenmiştir. Yırtılma, çatlama, tabakaların ayrılması gibi başarısızlıklar değerlendirilmiştir. Ayrıca, kulaklanma ve geri gelme deformasyonları ölçülmüştür. Şekillendirme sonrası son çap ölçümleri, Şekil 3.14'te gösterildiği gibi,  $\pm 0$  veya  $\pm 90$  eksenlerinden ve  $\pm 45$  eksenleri üzerinden dijital bir kumpas ile ölçülmüştür [169]. Burada kırmızı çember numunenin deney önceki tam dairesel çapını göstermektedir. Geri gelme ise, deney sonrası cihazın mesafe ölçer sensörü ile ölçülmüştür. Zımba kuvveti sonlandırıldıktan sonra, anlık ölçülen mesafe sabit kalıncaya kadar bir süre beklenmiş ve yükseklik kaydedilmiştir.



Şekil 3.14. Kulaklanma

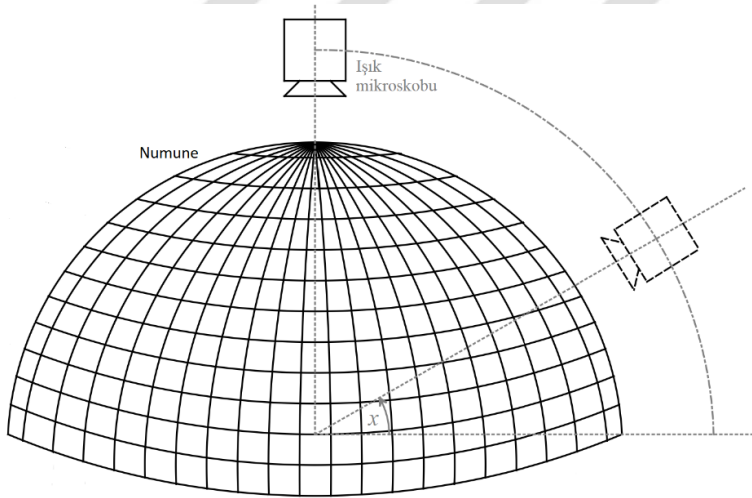
### 3.3.8. Şekil değişimlerinin ölçülmesi

Numunelerin şekillendirilmesinden sonra üç boyutlu bir geometrik parça oluşmuştur. Numune üzerinde yapılan düzlemsel işaretlemelerin derin çekme sonrası oluşan yarı-küresel parçanın yüzeyindeki iz düşümleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



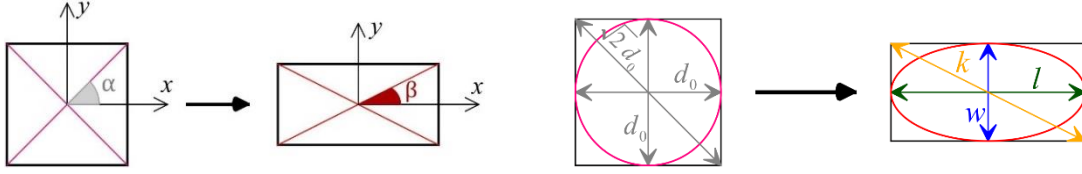
Şekil 3.15. Düzlemsel elemanların izdüşümleri

Şekillendirilmiş numuneler yarı-küresel forma uygun açılarda ışık mikroskopunda fotoğraflanmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Numune görüntüleri Autocad çizim programı ile açılmış, fotoğraflama çözünürlüğüne uygun bir ölçek oluşturduktan sonra dörtgen ızgaraların kenar ve köşegen uzunlukları ölçülmüştür. Şekil 3.16'da gösterildiği gibi en az üç açıdan (90, 60 ve 30 derece) görüntüleme yapılmıştır. Deformasyonun yoğun olduğu bölgeye mümkün olduğunca paralel görüntü almak hedeflendiğinden dolayı gerek görülen farklı açılarda da görüntüleme yapılmıştır.



Şekil 3.16. Numune yüzeyinden görüntü alma

Izgara deseni başlangıçta kartezyen (iki boyutlu) koordinat sistemi üzerinde ortogonal (köşegen vektörleri birbirine dik) durumdadır. Şekillendirmeyle birlikte desen yapısı eğrisel koordinat üzerinde değişime uğramıştır. Kompozit levha numunelerde meydana gelen deformasyonların ölçülmesi için konformal (açıları korunur) olmayan bu değişimler Şekil 3.17'de gösterildiği gibi basitleştirilmiştir [170].



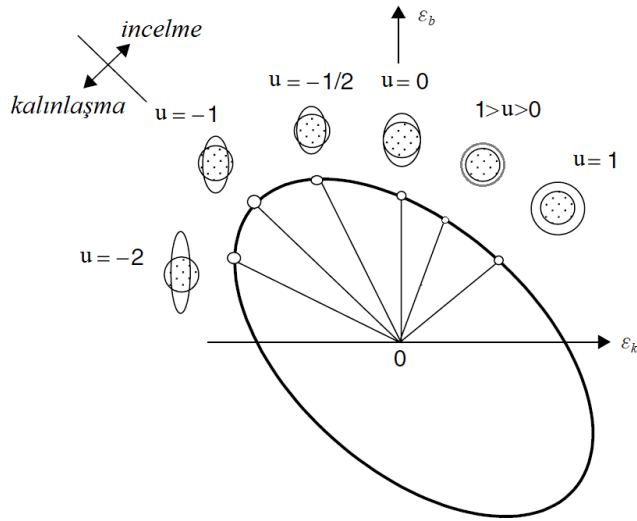
Şekil 3.17. Kafes yapısının değişimi ve değişimin ölçülmesi

Her bir ızgara deseninden üç değer ölçülmüş, Eş. 3.1 kullanılarak büyük birim şekil değiştirme ve küçük birim şekil değiştirme hesaplanmıştır. Şekil değiştirmiş dörtgenin uzun kenarından ölçülen oran ' $e_b$ ' ile, küçük kenarından ölçülen oran ' $e_k$ ' ile gösterilmiştir.

$$e_b = \ln \left( \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right) , \quad e_k = \ln \left( \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'de,  $\alpha = 45^\circ$ 'dir ve  $\cos \beta = \frac{l}{k}$ ,  $\sin \beta = \frac{w}{k}$  şeklinde hesaplanır. Şekil değişikliğini daha iyi ifade etmek için, ızgara desenin başlangıçta daire olduğunu kabul edersek, deformasyon sonrası elips şekline dönüşür ve bu durumda Eş. 3.2 kullanılabilir. Elipsin büyük çapından elde edilen uzama büyük uzama, küçük çapından elde edilen uzama küçük uzamayı verir [167]. Küçük uzamanın büyük uzamaya oranı ( $e_k/e_b$ ) bir noktadaki deformasyonun modunu ( $u$ ) ifade eder. Deformasyon biçimleri uzama oranlarına göre; eş eksenli gerdirme ( $u=1$ ), iki eksenli çekme ( $1 > u > 0$ ), düzlemsel çekme ( $u=0$ ), tek eksenli çekme ( $u=-1/2$ ), saf kayma ( $u=-1$ ), sıkıştırma ( $u > -2$ ) olarak sıralanır [171]. Farklı deformasyon biçimlerinin karakterini inceleyebilmek için Şekil 3.18'de ana/esas uzama oranları ile ilgili bir diyagram gösterilmiştir. Bu diyagram, deformasyon modlarını tartışmak için kullanılmıştır [172].

$$e_b = \ln \left( \frac{l}{d_0} \right) , \quad e_k = \ln \left( \frac{w}{d_0} \right) \quad (3.2)$$



Şekil 3.18. Deformasyon modları

Başlangıç kalınlığı bilinen numunelerin kalınlık değişimi Eş. 3.3 ile sabit hacim teorisinden yararlanarak hesaplanabilir [100].

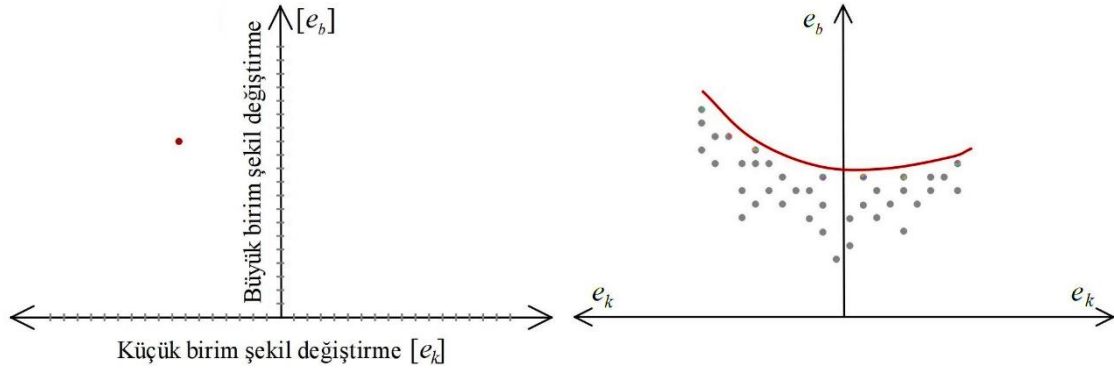
$$e_b + e_k + \ln \left( \frac{t_s}{t_i} \right) = 0 \quad (3.3)$$

Eşitlik düzenlendiğinde son kalınlık Eş. 3.4 ile hesaplanır.

$$t_s = t_i \cdot \exp \left\{ - \left[ 1 + \left( \frac{e_b}{e_k} \right) \right] e_k \right\} \quad (3.4)$$

### 3.3.9. Şekillendirme sınır diyagramlarının çizilmesi

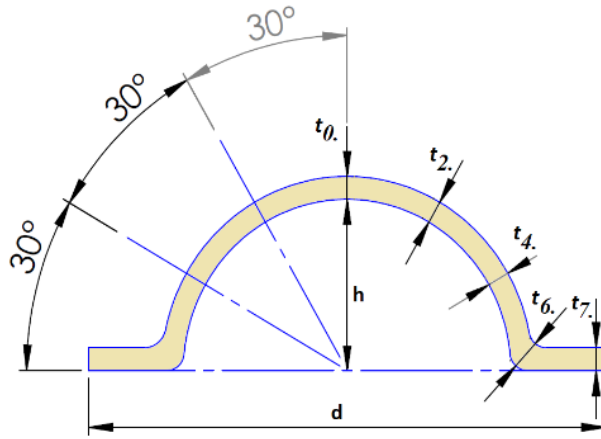
Izgara desenlerinin şekil değişimlerinin ölçülmesiyle hesaplanan iki değer, numune yüzeyindeki her bir eleman için kaydedilmiştir. Bu iki değer Şekil 3.19'da gösterilen koordinat sistemi üzerinde düşey ve yatay eksen değerleri olarak kullanılmış ve düzlemde bir nokta olarak işaretlenmiştir. Numune üzerinde şekil değişimine uğramış her bir eleman için bu değerler diyagrama işaretlenmiştir. İşaretlemelerin ardından oluşan nokta bulutunun üzerinden geçecek şekilde parabolik bir eğri çizilerek şekillendirme sınır eğrisi oluşturulmuştur. Deformasyonun başladığı parametre ve seviye dikkate alınarak her malzeme için bir tane şekillendirme sınır eğrisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.19. Şekillendirme sınır diyagramı

### 3.3.10. Kalınlık değişiminin ölçülmesi

Derin çekilmiş numunelerden kesitler alınarak, belirli bölgelerden dijital bir mikrometre (hassasiyeti  $\pm 0,01$  mm) vasıtasıyla kalınlık değişimi ölçülmüştür. Numunenin simetrik şekil değiştirmesi sebebiyle 1/8'lik kısmi kesit olarak kesilmesi yeterli olmuştur. 0 derece ve 45 derece yönlerden kesilen numunelerin bu iki eksen üzerinden beşer ölçü alınmıştır. Ölçü alınan noktaların kıyaslanabilir olması için bir açı mastarı kullanılmış ve Şekil 3.20'de gösterildiği gibi 0/30/60/90 derecelik bölgeler ile kavis merkezinden ölçme yapılmıştır.



Şekil 3.20. Kalınlık ölçümü

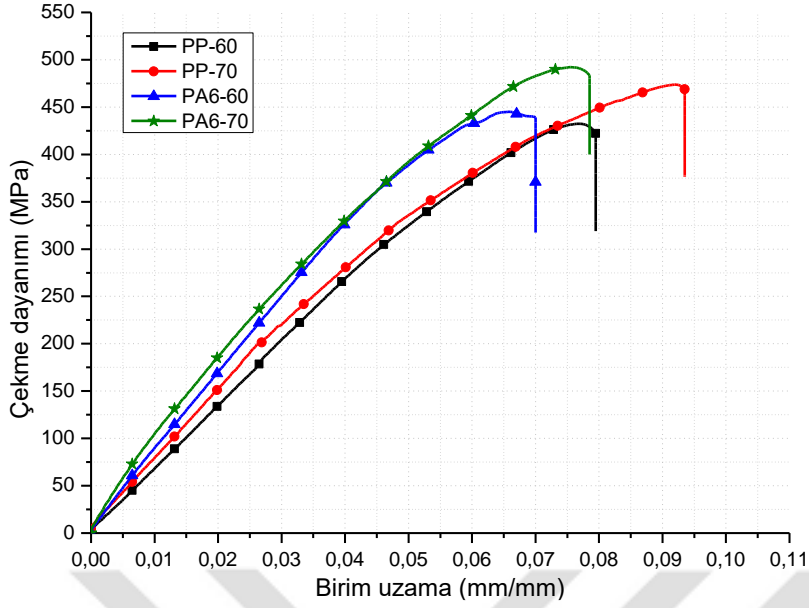
## 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

### 4.1. Malzeme Karakterizasyonu Sonuçları

Kompozit malzemeler, tek bir malzemedenden daha fazla özgül mukavemet elde etmek için farklı türden malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Yeni malzemeler için temel mekanik ve ısıl özelliklerin değerlendirilmesi önemlidir.

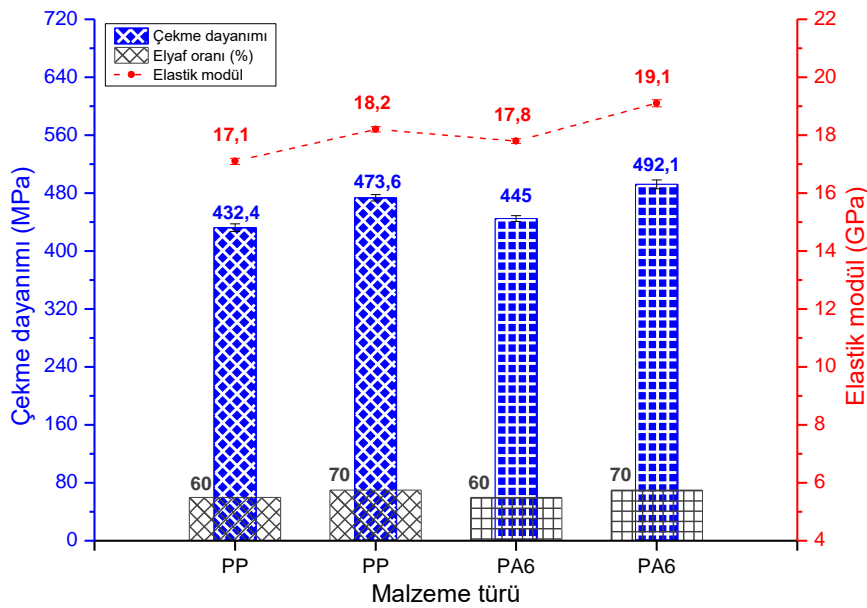
#### 4.1.1. Çekme testi sonuçları

Mekanik özellikler, bir malzemenin harici bir kuvvete nasıl tepki verdiği ile ilişkilidir. Çekme dayanımı, sündürme veya çekme kuvvetlerine (gerilme) direnme yeteneğini gösterir. Bu çalışmada kullanılan kompozit levhaların çekme-uzama eğrileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Matriks sünek olarak esnerken, elyafın gerilme dayanımı matriksin akma dayanımından önemli ölçüde daha yüksek olduğu için, elyaf elastik olarak gerilmeye devam etmiş ve matriks esneyerek deforme olmuştur. Bu süreç, başlangıçta neredeyse doğrusal olarak ilerleyen eğrinin, daha sonra azalmış bir eğimle devam etmiş ve kopma gerçekleşmiştir. Kompozit malzemenin deformasyon başlangıcı, liflerin kırılmasına başlamış ve tüm lifler aynı anda kırılmadığından dolayı kopma uzaması artmaya devam etmiştir. Çünkü ilk lif kırılmasından sonra polimer hala sağlam kalmış ve polimer deforme olmaya devam ettikçe, uygulanan yüke karşı tepki azalsa bile, polimer içerisinde yerleşik olan elyaf da yükü taşımaya devam etmiştir. PP-60, PP-70, PA6-60 ve PA6-70 kompozitlerinin kopma birim uzamaları sırasıyla, 0,079; 0,093; 0,070 ve 0,078 (mm/mm) olarak ölçülmüştür. PA6 kompozitlerin dayanıklılığı, PP kompozitlerin ise uzama kapasitesinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elyaf oranının artmasıyla, uygulanan yükün lifler tarafından taşınan oranı da artmış ve çekme dayanımı yükselmiştir.



Şekil 4.1. Uzama-çekme diyagramı

Şekil 4.2’de malzeme çeşidine göre maksimum çekme dayanımları ile elastik modül değerleri gösterilmiştir. PA6 kompozitleri, PP kompozitlerden daha yüksek dayanım göstermiştir. Çekme dayanımının artışıyla birlikte elastik modülün de aynı eğilimde arttığı görülmektedir. %70 cam elyaf oranına sahip PP kompozit, %60 elyaf oranlı PP kompozite göre %9,5 daha fazla çekme dayanımı göstermiştir. PA kompozitler için aradaki fark %10,5 olarak hesaplanmıştır. PP ve PA kompozitleri için elyaf oranının artışı elastik modülde sırasıyla %6 ve %7’lik bir gelişme sağlamıştır.

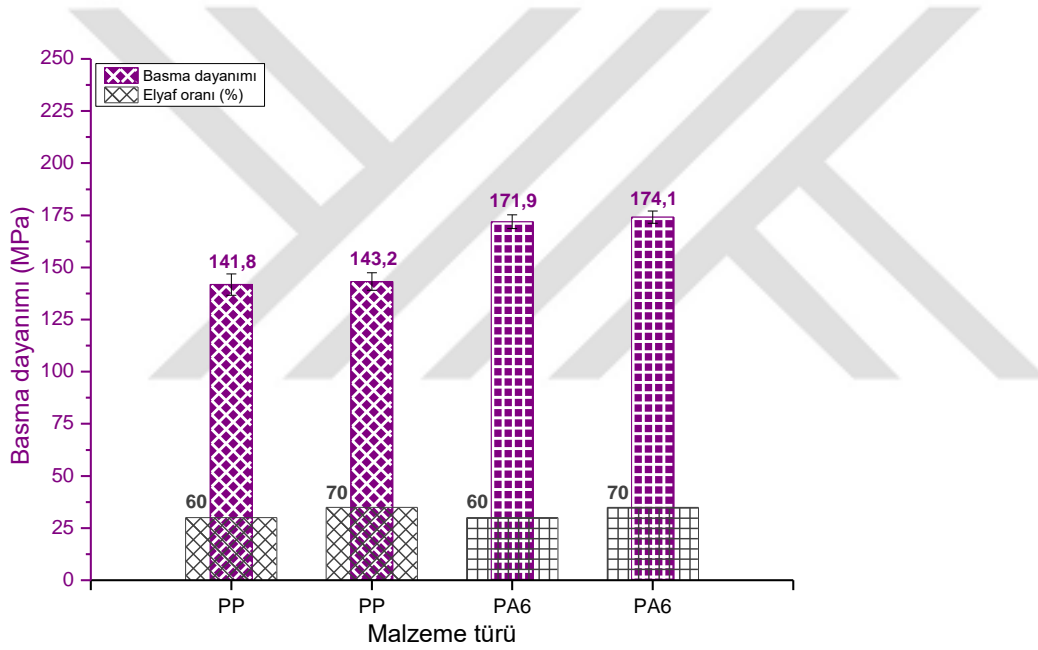


Şekil 4.2. Çekme dayanımı ve elastik modül karşılaştırması



#### 4.1.2. Basma testi sonuçları

Basma dayanımı, itme kuvvetleri (sıkıştırma) ile ezilmeye veya kısaltılmaya dayanma yeteneğini gösterir. Şekil 4.3'te malzeme çeşidine göre basma dayanımları verilmiştir. PA kompozitlerin sıkıştırma gerilmesine karşı gösterdikleri dayanım PP kompozitlerden yaklaşık %21 daha fazla çıkmıştır. Elyaf oranının %60'tan %70'e çıkması basma dayanımlarında belirgin bir fark oluşturmamıştır. Maksimum basma kuvvetlerinin meydana geldiği birim daralma miktarları, çekme-uzama grafiğinde olduğu gibi cihazın ekstansometresi vasıtasıyla, malzeme çeşidine göre (PP-60; PP-70; PA6-60; PA6-70) sırasıyla 0,061; 0,064; 0,083 ve 0,087 (mm/mm) olarak belirlenmiştir.

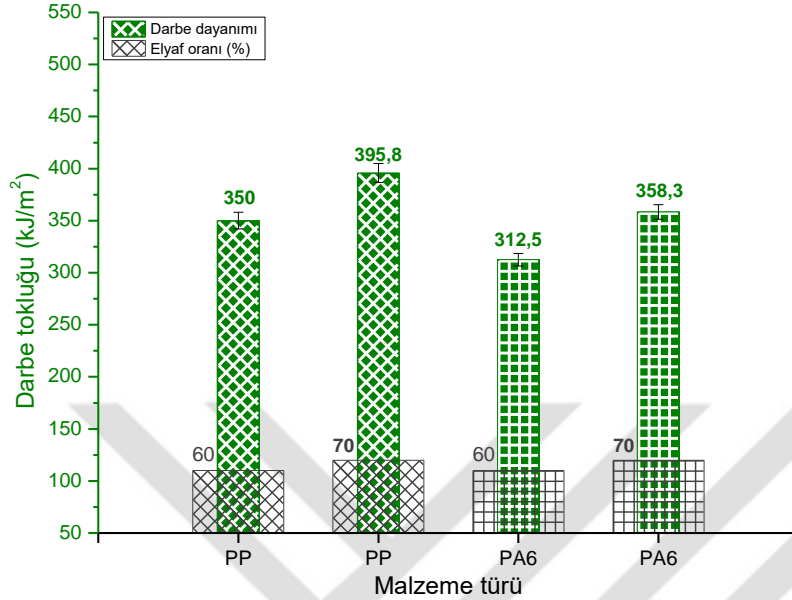


Şekil 4.3. Basma dayanımı karşılaştırması

#### 4.1.3. Darbe testi sonuçları

Darbe tokluğu, kırılma olana kadar darbe kuvvetini absorbe etme yeteneğidir. Şekil 4.4'te malzeme çeşidine göre darbe tokluğu karşılaştırması yapılmıştır. %60 elyaf oranına sahip malzemeler karşılaştırıldığında PP kompozitin darbe direnci, PA6 kompozite göre %12, %70 elyaf oranlı kompozitler karşılaştırıldığında ise %10 daha yüksek çıkmıştır. Elyaf oranının %10 artmasıyla birlikte, PP kompozit %13, PA kompozit %15 daha fazla tokluk göstermiştir. Buna sürekli elyafın darbe enerjisini üzerinde toplayarak enerjinin kompozitin bütününe yayması katkı sağlamıştır. Darbe testi sırasında sönmölenen enerji değerleri malzeme çeşidine göre sırasıyla, 14,6 J; 16,5 J; 13,0 J ve 14,9 J olarak tespit

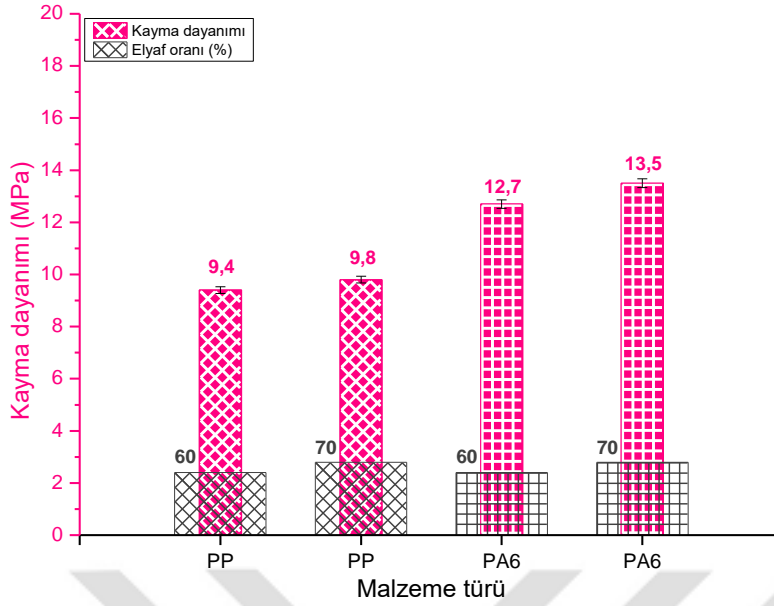
edilmiştir. Şekilde görülen tokluk değerleri darbeye dik numune kesitine göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Darbe dayanımı karşılaştırması

#### 4.1.4. Kayma testi sonuçları

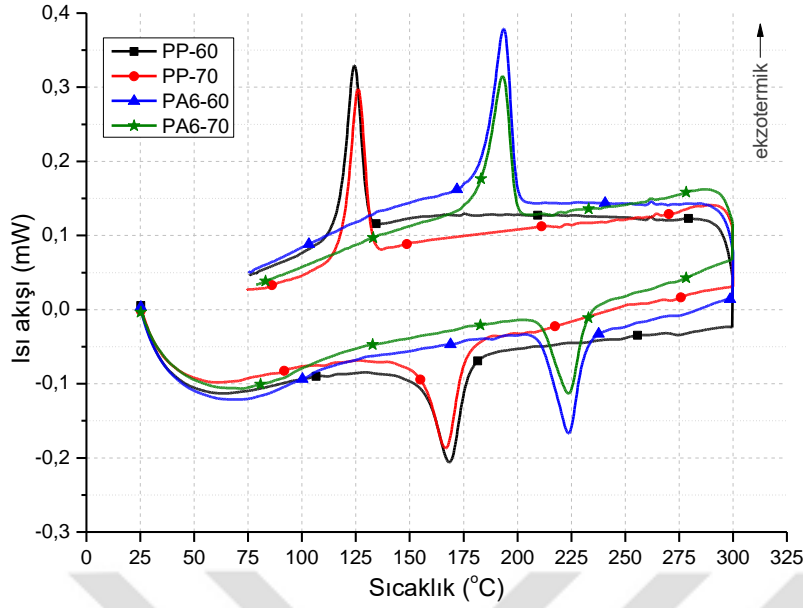
Kayma dayanımı, paralel bir düzlemde kayma kuvvetlerine direnme yeteneğini ifade eder ve malzemeye uygulanana eğilme kuvvetleriyle de ilişkilidir. Şekil 4.5'te malzeme çeşidine göre kayma dayanımları gösterilmektedir. Üç noktadan temasla eğilme testine tabii tutulan numunede tabakalar arası kayma en fazla, kiriş teorisine göre, yüklenen numunenin merkezinde meydana gelmektedir ve numune genişliği ve kalınlığı ile ilişkilidir. Malzeme çeşidine göre maksimum kayma dayanımının gerçekleştiği sehim miktarları, PP-60; PP-70; PA6-60 ve PA6-70 için sırasıyla, 0,050 mm; 0,058 mm; 0,068 mm ve 0,080 mm olarak ölçülmüştür. PP kompozitlerin kayma dayanımı PA6 kompozitlerden belirgin bir şekilde düşük çıkmıştır. Bu durum, PA6 prepreglerin yüzeyler arası etkileşimlerinin daha kuvvetli olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.5. Kayma dayanımı karşılaştırması

#### 4.1.5. DSC testi sonuçları

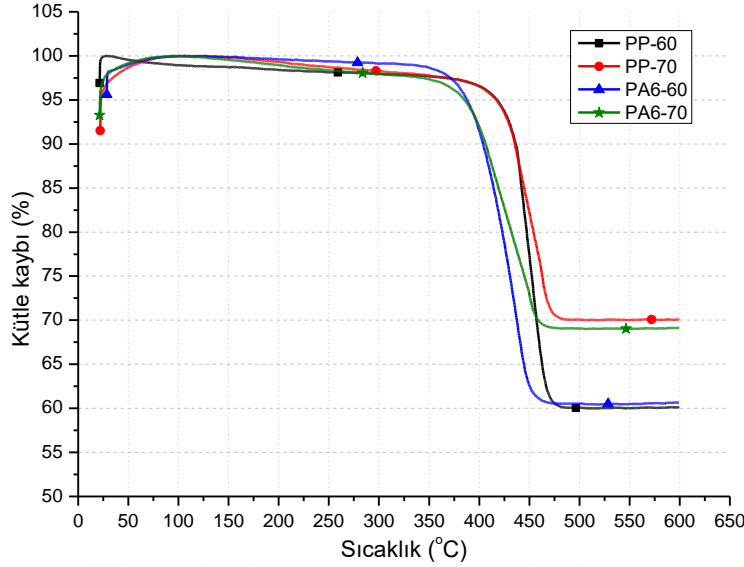
Şekil 4.6'da diferansiyel taramalı kalorimetricde yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Çevreden ısı alan tepkimelerde maddenin enerjisi artar ve endotermik tepkime olarak tanımlanır. Tepkimenin yönü dışa doğru yani madde çevreye ısı veren durumdaysa ekzotermik tepkime olarak anılır. Erime reaksiyonu endotermik ve kristallenme reaksiyonu ise ekzotermik bir olaydır. PP ve PA6 kompozitleri yarı-kristalin oldukları için kısmen dalgalı kısmen keskin hal değişimleri göstermişlerdir. Isı değişim eğrilerinin önce omuz vermesi, ardından orta noktasına ulaşması ve sonra da benzer eğimle tekrar toparlanması; hal değişimi için başlangıç, tepe ve bitiş sıcaklık değerlerini verirken; bu eğrinin altında kalan alan ise, hal değişimine ait entalpi değerini verir. PP-60, PP-70, PA6-60 ve PA6-70 kompozit malzemeleri için erime bitiş noktası sıcaklıkları sırasıyla, 168,4 °C; 168,2 °C; 223,8 °C ve 223,6 °C olarak belirlenmiş ve kristallenme başlangıç sıcaklıkları ise, 124,7 °C; 124,2 °C; 195,6 °C ve 195,1 °C olarak tespit edilmiştir. PA6 kompozitlerin reaksiyon sıcaklıkları PP kompozitlerden daha yüksek çıkmıştır. Elyaf oranının artması, erime ve kristallenme sıcaklıklarının az bir farkla düşmesine neden olmuştur. Polimerik malzemelerin temel ayırt edici özelliklerinden biri olan camsı geçiş sıcaklığı, ilgili kompozitlere ait termogramlarda gözlenmemiştir.



Şekil 4.6. DSC termogramı

#### 4.1.6. TGA testi sonuçları

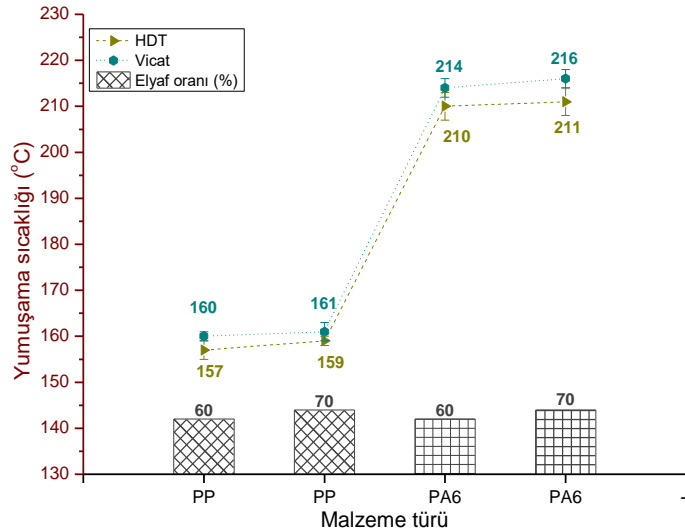
Deneyleerde kullanılan kompozit malzemelerin imalattan önce bilinen kütlece elyaf oranlarının doğrulanması için termogravimetrik analizler yapılmıştır. Şekil 4.7’de kompozit malzemelere ait termal bozunma eğrileri verilmiştir. Katalizör, artık nem, çözücü gibi uçucu maddelerin buharlaşmasıyla başlangıçta bir miktar kütle kaybı gözlenmiştir. Belirli bir sıcaklıktan sonra polimerin yapısındaki kimyasal bağlar kırılarak bozunma başlamış ve kütle aniden azalmıştır. Geriye kalan kütle, daha yüksek sıcaklıklarda kaybolan elyaf bileşene aittir. Arta kalan kütleler, PP-60, PP-70, PA6-60 ve PA6-70 kompozitleri için sırasıyla, %60,12; %70,10; %60,64 ve %69,13 olarak kaydedilmiştir. Ash (aljinat, silika, çinko oksit) gibi katkı maddeleri ihmal edilebilir farklılıklara sebep olmuştur. Kütlenin zamana göre türevi alındığında kütle değişiminin maksimum olduğu sıcaklık değeri malzemenin maksimum bozunma sıcaklığını verir. PP-60, PP-70, PA6-60 ve PA6-70 kompozitleri için bozunma sıcaklıkları sırasıyla, 455 °C, 463 °C, 437 °C ve 449 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. TGA termogramı

#### 4.1.7. Yumuşama testleri sonuçları

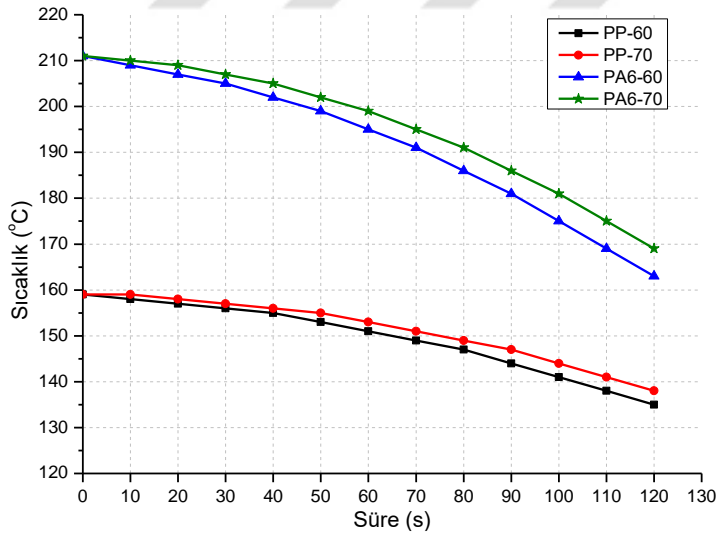
Şekil 4.8’de kompozit malzemelere ait ısıl sapma ve vicat yumuşama sıcaklıkları verilmiştir. Her iki termoplastik kompozit için de elyaf oranının artmasıyla yumuşama sıcaklıkları 1 °C farkla artış göstermiştir. Isıl sapma sıcaklıkları, vicat yumuşama sıcaklıklarından daha düşük çıkmıştır. Vicat sıcaklıklarının kompozit malzemelerin erime sıcaklıkları civarında olduğu görülmüştür. PA6 kompozitlerin yumuşama sıcaklıkları, diğer ısıl özelliklerde de olduğu gibi PP kompozitlere göre oldukça yüksek çıkmıştır. Bu farklılıklar, PP malzemede yalnızca dispersiyon kuvvetlerinin bulunmasından ve PA6 malzemelerin ise bunlara ilave olarak Hidrojen bağı yapabilmelerinden kaynaklanmıştır.



Şekil 4.8. HDT ve VST sıcaklıklarının karşılaştırması

#### 4.1.8. Isıtma ve soğuma sonuçları

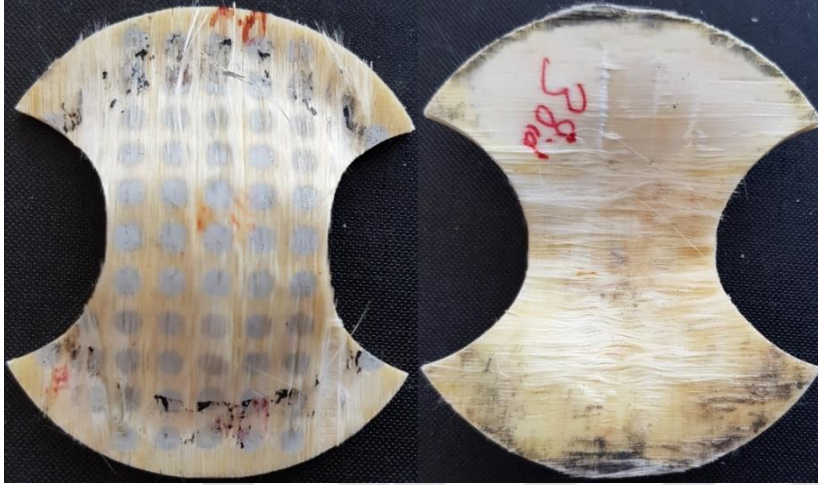
Yumuşama sıcaklıklarına kadar ısıtılan ve daha sonra oda koşullarında soğumaya bırakılan kompozit levhaların zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. PA6 kompozitler, PP kompozitlere göre daha hızlı bir eğimle sıcaklık düşüşü göstermişlerdir. Elyaf oranının %60'tan %70'e çıkması, soğuma başlangıcında çok az fark göstermiş, süre ilerledikçe aradaki fark artarak elyaf oranı yüksek olan malzemelerin sıcaklıklarını daha iyi koruduğu görülmüştür. Kompozit malzemelerin yeniden kristallenme sıcaklıkları dikkate alındığında, PP kompozitlerin 124 °C'den önce ve PA6 kompozitlerin ise 195 °C'den önce şekillendirme işleminin başlamış olması gerekir. Buna göre, PA6 kompozitlerin en geç 60 s içerisinde şekillendirme işleminin başlaması gerekirken, bu süre PP kompozitler için 120 s'nin üzerine çıkabilir. Bu çalışmada, ön ısıtılan numunenin derin çekme test cihazına yerleştirilmesi 3 ila 5 s kadar sürmüş ve şekillendirme süresini esas olarak zımba hızı etkilemiştir. Zımba hızının asgari 90 mm/dk ve derinliğin azami 30 mm olduğu dikkate alındığında, şekillendirme süresi, en fazla 25 saniye olmuştur. Dolayısıyla, oldukça düşük bir farkla yumuşama sıcaklığı civarında derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Zamana bağlı soğuma sıcaklıklarının karşılaştırması

Ön ısıtma, şekillendirme kolaylığı açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, ısıtma süresinin de hem homojen sıcaklık dağılımı hem de parça kalitesi için önemli olduğu görülmüştür. 15 dakika boyunca yumuşama sıcaklığında bekletilen PA6 kompozit malzemesinin rengindeki sararma ve deney sonrası elyafın tekdüze yapısında bozulma Resim 4.1'de gösterilmiştir. Benzer sonuca Suresh ve Kumar'ın yaptıkları çalışmada da karşılaşılmış,

uzun süre yüksek sıcaklıkta bekletilen kompozitin oksidasyonu ile bozunmaya maruz kaldığı, matriks malzemenin viskozitesinde düşme meydana geldiğinden kalıp yüzeyine yapışma ve yüzey kalitesinde düşüşe neden olduğu belirlenmiştir [128].



Resim 4.1. Uzun süre ısıtılan numunede sararma

Çekme testi, ürün ve süreç tasarımı çalışmalarında malzemelerin mekanik özelliklerinin tanımlanması için temel nitelik taşımaktadır. Ayrıca, çekme mukavemeti değeri, sac metal malzemelerin derin çekilmesi işlemlerinde zımba kuvveti ve tutma basıncının yaklaşık olarak hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tutma basıncı kademelerinin belirlenmesi ve malzeme karakterinin bilinmesi için kompozit levhalara çekme testi uygulanmıştır. Çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastik modül değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Termoform işleminde ya kalıbın belirli bir sıcaklığa şartlandırılması ya da numunenin kalıba yerleştirilmeden önce uygun sıcaklık değerine ısıtılması gerekmektedir. Sadece kalıbın ısıtılmasıyla özellikle kalınlığı fazla olan levha malzemelerin istenilen sıcaklığa homojen olarak ulaşması mümkün değildir. Ayrıca, şekil verme sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşan kalıbın, parçanın nihai şeklini alabilmesi için soğutulması gerekmektedir. Bu da, ciddi bir zaman kaybına yol açmaktadır. Bu yüzden, numune genellikle kalıba yerleştirilmeden önce ısıtılır. Bu çalışmada, numune derin çekme işleminden önce istenilen sıcaklığa ısıtılmıştır. Numune sıcaklığının şekillendirmeye etkisinin incelenmesi için kompozit malzemelerin bazı ısıl özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan termoplastik kompozit levhaların yumuşa, erime ve yeniden kristallenme sıcaklıklarının belirlenmesi için yapılan HDT/VST ve DSC testlerinin

sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Önceden ısıtılan numunenin, numuneye göre oldukça soğuk olan kalıba yerleştirilmesi, kalıptan çıkan parça da çarpımlara neden olabilir. Ektrüzyon ve enjeksiyon gibi parça imalatı süreçlerinde kalıp sıcaklığı genellikle malzeme erime sıcaklığının yaklaşık 1/3’ü değerine şartlandırılırlar [173-175]. Bu olası kusurun önüne geçebilmek için kalıp, PP kompozitler için 55 °C ve PA6 kompozitler için 70 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. Ayrıca, bu sayede ortam sıcaklığının değişimi de tolere edilmiştir.

Çizelge 4.1. Kompozit malzemelerin mekanik ve ısıl özellikleri

	PP-60	PP-70	PA6-60	PA6-70
Çekme dayanımı (MPa)	432,4	473,6	445	492,1
Çekme birim uzaması (mm/mm)	0,079	0,093	0,07	0,078
Elastik modül (GPa)	17,1	18,2	17,8	19,1
Basma dayanımı (MPa)	141,8	143,2	171,9	174,1
Darbe tokluğu (kJ/m <sup>2</sup> )	350	395,8	312,5	358,3
Kayma dayanımı (MPa)	9,4	9,8	12,7	13,5
HDT sıcaklığı (°C)	157	159	210	211
VST sıcaklığı (°C)	160	161	214	216
Erime sıcaklığı (°C)	168,4	168,2	223,8	223,6
Kristallenme sıcaklığı (°C)	124,7	124,2	195,6	195,1
Bozunma sıcaklığı (°C)	455	463	437	449

#### 4.2. Şekillendirme Deformasyonlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, 3 mm levha kalınlığındaki elyaf takviyeli termoplastik kompozitlere deney tasarımına göre uygulanan deneylerin sonuçları karşılaştırmalı olarak grafikler ile numune resimleri üzerinden açıklanmıştır. Deney tasarımında listelendiği gibi PP-60 için numune sıcaklığı (124, 159, 169 °C), zımba hızı (90, 120, 150 mm/dk), tutma basıncı (0,4; 0,6; 0,8 MPa) ve derinlik (20-30 mm) parametrelerinin; pres kuvvetine, parça kalınlaşmasına, kulak oluşumuna ve delaminasyon davranışlarına etkileri değerlendirilmiştir.

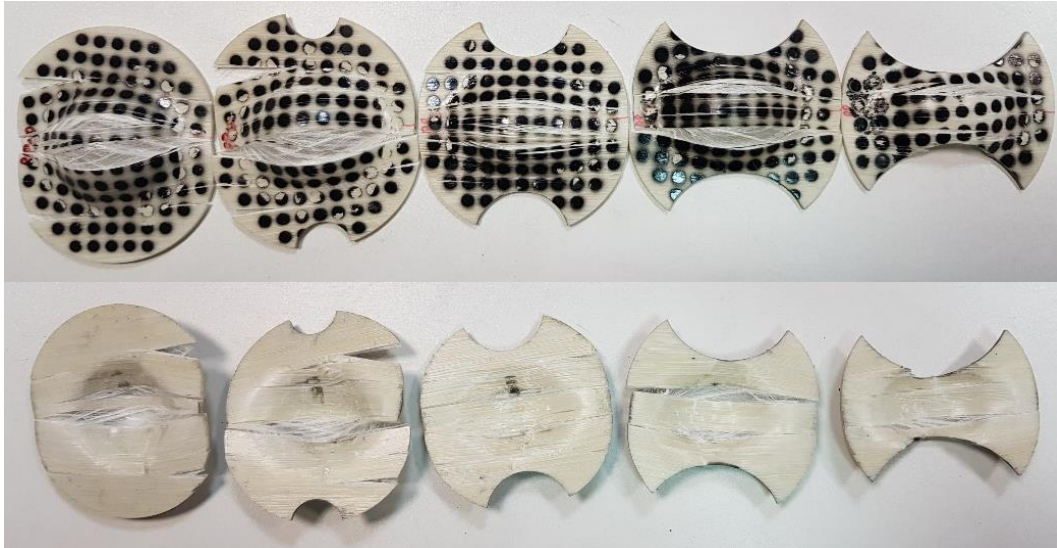
Fazita vd. yaptıkları çalışmada, elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin şekillendirme sıcaklık aralığının, erime noktasının altında ve kristalleşme derecesinin üzerinde bir değerde en uygun olduğunu açıklamışlardır [89]. Bu çalışmada da, DSC testi ile belirlenen bu sıcaklık aralığı dikkate alınmıştır. Nakajima test standardına göre şekillendirme hızının



90 mm/dak ( $\pm 30$  mm/dak) olarak alınması önerilmiştir. Reyes ve Kang yaptıkları çalışmada, sandviç kompozit panellerin derin çekilmesinde zımba hızını 150 mm/dk olarak almışlardır [153]. Bu değerler, bu çalışmada kullanılan zımba ilerleme hızına referans teşkil etmiştir.

Çift yönlü elyaf takviyesi içeren kompozit levhalar için sonuçlar bu bölümün devamında alt başlıklar halinde verilmiştir. Dört çeşit kompozit levha için farklı geometrilere ait şekillendirme kusurunun başladığı parametreler tespit edilmiştir. PP-60 kompozit levha malzemeye ait kusurlarının en belirgin ortaya çıktığı tam dairesel numuneler kullanılarak detaylı deformasyon incelemesi yapılmıştır.

Tek yönlü elyaf takviyesi içeren kompozit levaların derin çekilme işlemi ile ilgili olarak yapılan şekillendirme deneyleri başarısız olmuştur. 159 °C numune sıcaklığı; 0,4 MPa tutma basıncı ve 90 mm/dk zımba hızı şartlarında en fazla 7 mm derinliğe ilerlenebilmiştir. Şekil verme sırasında levha malzemedeki elyaf boylamasına ayrılmış ve tabaka içi matriks yırtılması meydana gelmiştir. Resim 4.2’de görüldüğü gibi planlanan derin çekme sağlanamamıştır.

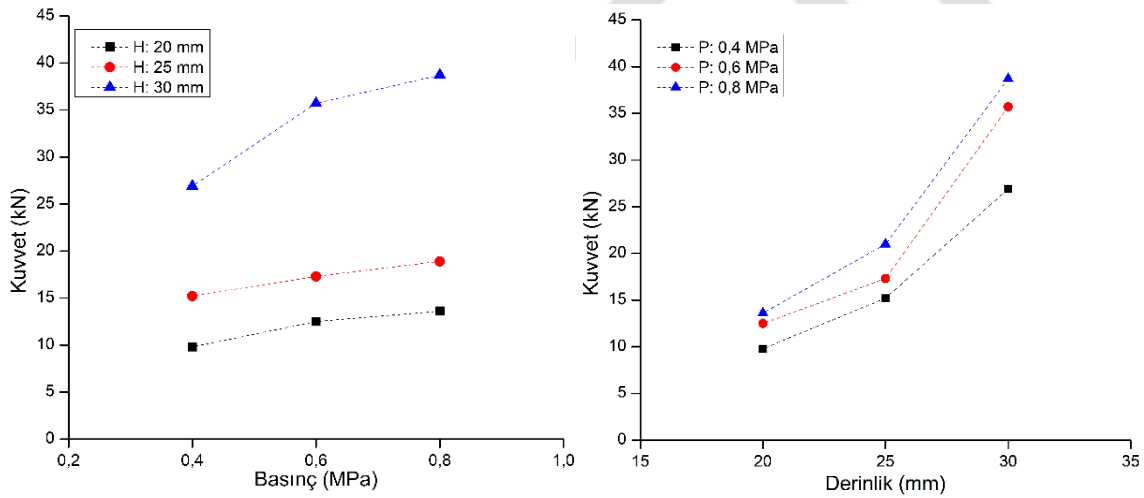


Resim 4.2. Derin çekilmiş tek yönlü kompozit malzemeler

#### 4.2.1. PP-60 kompozit levha malzemenin şekillendirme sonuçları

##### Şekillendirme parametrelerinin pres kuvvetine etkisi

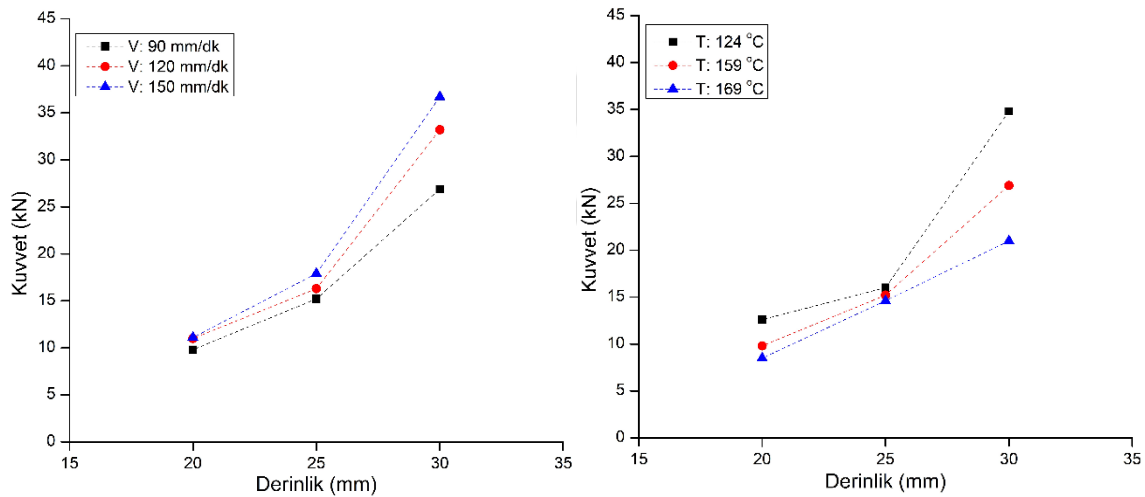
Şekil 4.10'da 159 °C numune sıcaklığında yapılan deneylerde, farklı derinliklerde tutma basıncının değişiminin pres kuvvetine etkisi gösterilmiştir. Parçada kırışmanın ve delaminasyonun önüne geçmek için numune, kalıp ile tutucu arasında sıkıştırılmış ve bu tutma basıncının artışıyla birlikte derin çekme işlemi için harcanan pres kuvveti de artmıştır. Elde edilmeye çalışılan derinlik arttıkça da basıncın etkisi daha belirgin bir ölçüde artış göstermiştir. Zımba geometrisiyle ilişkili olarak parçada oluşan gerilmeler tekdüze gerçekleşmemiş ve bu yüzden kuvvet eğrileri parabolik olarak değişmiştir. Çünkü düşük basınçta matriks daha az sıkışmış ve parçanın kaymasına müsaade etmiştir. En fazla artış 30 mm için tutma basıncının 0,4 MPa'dan 0,8 MPa'a çıkmasıyla gerçekleşmiş ve pres kuvveti %48 artış göstermiştir. Şekillerde belirtilen H: derinliği, P: tutma basıncını, V: zımba hızını ve T: numune sıcaklığını ifade etmektedir.



Şekil 4.10. Farklı tutma basıncı ve derinliğe bağlı olarak pres kuvvetindeki değişim

Şekil 4.11'de 0,4 MPa tutma basıncında yapılan deneylerde, derin çekme derinliğine bağlı olarak farklı zımba hızlarının ve numune sıcaklıklarının pres kuvvetine etkisi gösterilmiştir. Zımba hızının artmasıyla üç seviye derinlikte de pres kuvveti benzer eğilimle yükselmiştir. 30 mm çekme derinliğinde çekme hızının 90 mm/dk'dan 150 mm/dk'ya yükseltilmesi için %32 daha fazla çekme kuvvetine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. İşlem süresini kısaltmak ve numune sıcaklığının homojen kalmasını sağlamak için zımba hızının artırılması bir çözüm olarak görülmüş, ancak kalıplama

kuvveti yani şekillendirme için harcanan enerji artış göstermiştir. Kristallenme sıcaklığında (124 °C) daha yüksek pres kuvvetine ihtiyaç duyulmuş ve erime sıcaklığında (169 °C) malzeme yüzeyinde bozulma oluşmuş, ancak erime sıcaklığına yaklaştıkça daha düşük kuvvetlerde derin çekme yapılabilmiştir. Kalıplama kuvveti, 30 mm derinlikte numune sıcaklığının 129 °C'den 159 °C'ye çıkartılmasıyla %20 azalmıştır. Kuvvet artışı büyük oranda elyafa bağlı olduğundan dolayı erime sıcaklığında bile derinlik arttıkça kalıplama kuvveti yükselmiştir. Rahiminejad ve Compston, kristallenme ile erime sıcaklıkları arasında farklı değerlere ısıtılan kompozit plakaların derin çekilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında, benzer sonuçları elde etmiş ve sıcaklık artışıyla güvenli derinlik artarken, gerilme kuvvetleri azalmıştır [176]. Yarı küresel zımbanın yarıçapı 22,5 mm olduğu için numune bu derinlikten sonra silindirik şekilde akmaya başlamıştır. Şekilde de görüldüğü gibi 25 mm'den sonra artış oranı yükselmiştir.

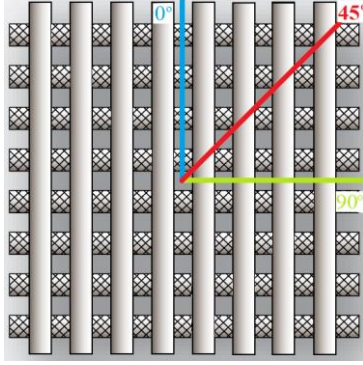


Şekil 4.11. Derinliğe bağlı olarak farklı zımba hızları ve numune sıcaklıklarına göre pres kuvvetindeki değişim

#### Şekillendirme parametrelerinin kulak oluşumuna etkisi

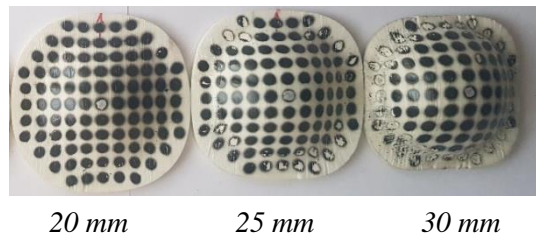
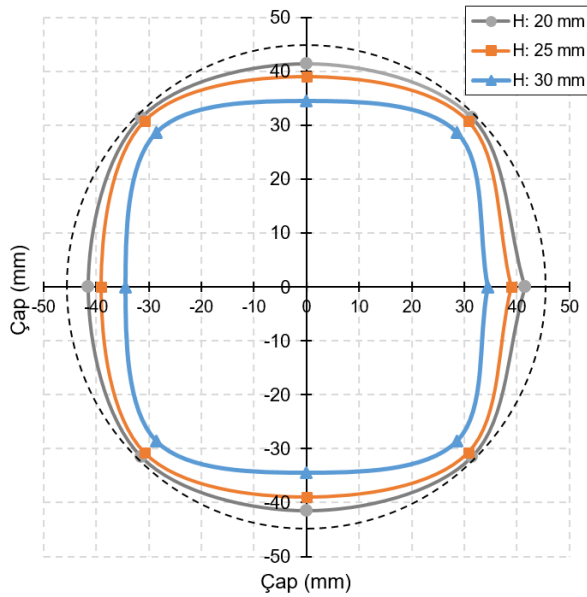
Çift yönlü dizilmiş prepreg elyaf yönleri 0 ve 90 derece eksenler doğrultusundadır. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi yatay ve düşey eksenler arasında elyaf yönlenmesi bulunmamaktadır. Sac metallere de bilindiği gibi maksimum kayma 45 derecelik düzlemlerde gerçekleşmektedir. Bu teoride olduğu gibi derin çekilmiş kompozit levhalarda da kayma dört köşede etkili olmuştur. Açı değişiminin saat yönünde olduğu kabul edilirse, küçük çap değerleri 0° - 180° ile 90° - 270° eksenleri ve büyük çap değerleri ise 45° - 225°

ile  $135^\circ$  -  $315^\circ$  eksenleri doğrultusundan ölçülmüş ve numunelerden son çap değerleri alınmıştır. Bu eksenler arasındaki çap farkı kulaklanma olarak ifade edilmiştir.



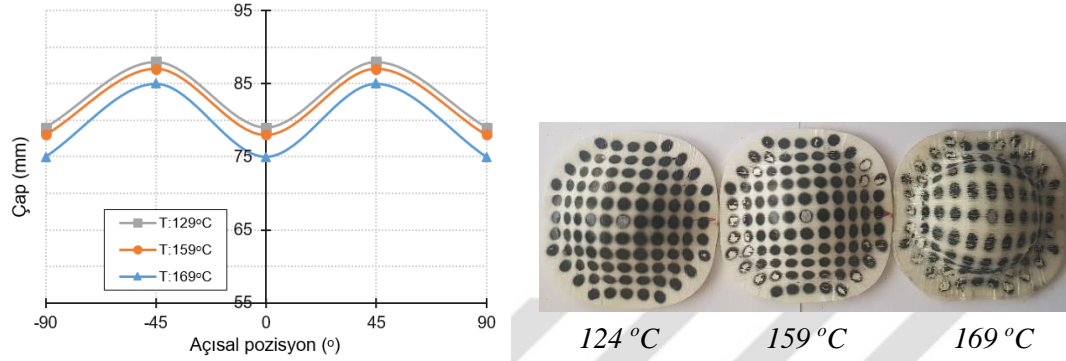
Şekil 4.12. Çift yönlü dizilmiş prepreglerin elyaf yönleri

Şekil 4.13'te numune sıcaklığı  $159^\circ\text{C}$  ile tutma basıncı  $0,4\text{ MPa}$  şartlarında derinlik değişiminin kulak oluşumuna etkisi üstten tam görünüş olarak karşılaştırılmıştır. Dört bölgede de  $45^\circ$  lik düzlemlerde kulaklanma meydana gelmiştir. Parça derinliği arttıkça son çap ölçüsü azalmıştır.  $20\text{ mm}$  derinlikte kulaklanma ekseninin ölçüsü ilk çapa çok yakındır. Bununla birlikte  $30\text{ mm}$  derinliğe çökertilmiş numunede yatay ve dikey eksenlerde çap değişimi maksimum olmuştur. Derinlik  $20 - 25 - 30\text{ mm}$  olarak artarken, kulaklanma da sırasıyla  $6 - 9 - 12\text{ mm}$  şeklinde artmıştır.



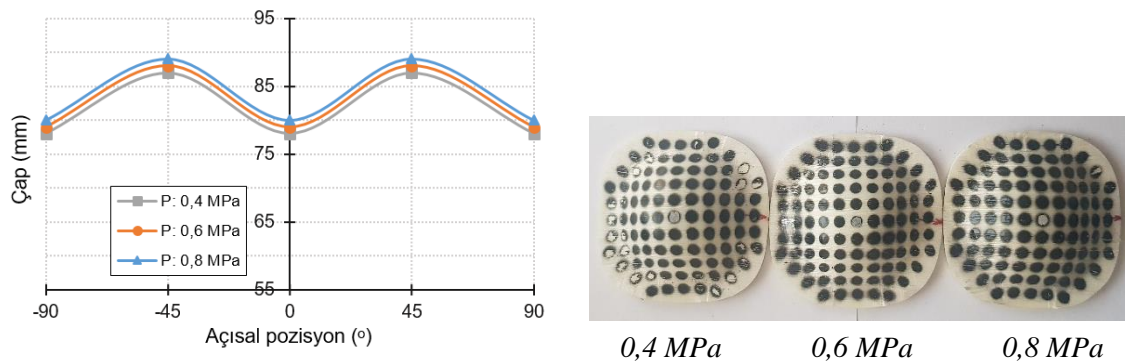
Şekil 4.13. Derinliğin kulaklanmaya etkisi (T:  $159^\circ\text{C}$  - V:  $90\text{ mm/dk}$  - P:  $0,4\text{ MPa}$ )

Şekil 4.14'te tutma basıncı 0,4 MPa ve 25 mm derinlik şartlarında sıcaklığa bağlı olarak kulak oluşumu gösterilmiştir. Erime sıcaklığında, kristallanma ile yumuşama sıcaklıklarına göre numune son çapında daha çok azalma görülmüştür. 169 °C numune sıcaklığında kulaklanma 10 mm'ye çıkmıştır.



Şekil 4.14. Numune sıcaklığının kulaklanmaya etkisi (V: 90 mm/dk - P: 0,4 MPa - H: 25 mm)

Şekil 4.15 ile Şekil 4.16'da farklı tutma basıncının ve zımba hızının kulaklanmaya etkileri verilmiştir. Numune sıcaklığı 159 °C iken 25 mm derin çekilmiş parçaların büyük ve küçük çapları arasındaki farkı belirginleştirmek için yarı-küresel yapının açılmış halinde açısal konuma göre kulak oluşumu gösterilmiştir. Zımba hızı 90 mm/dk iken, tutma basıncının artışı flanş kısmından ölçülen son çap ölçülerini artırmış, ancak kulaklanma miktarı değişmemiştir. Suresh ve Kumar'ın yaptıkları çalışmada da açıkladığı gibi, tutma basıncı artışı, radyal çekme gerilmesini artırdığından dolayı, çevresel akma direncini azaltmış ve flanş çapında artışa neden olmuştur [128].

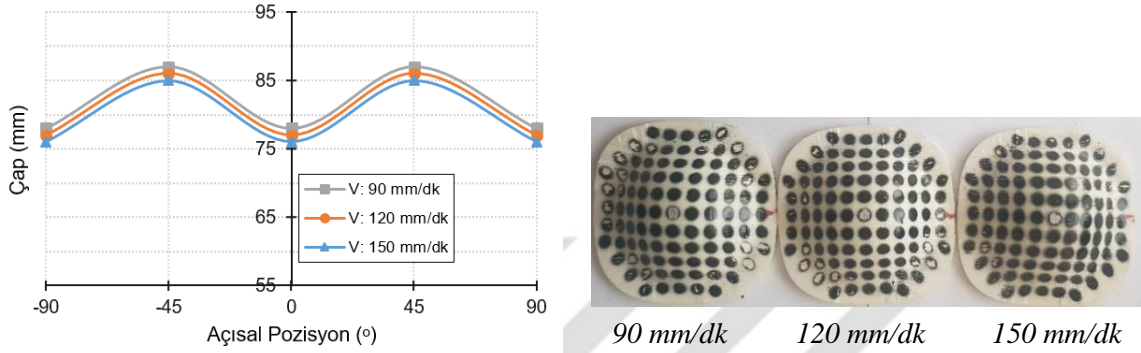


Şekil 4.15. Tutma basıncının kulaklanmaya etkisi (H: 25 mm - T: 159 °C - V: 90 mm/dk)

Tutma basıncı 0,4 MPa iken zımba hızının artmasıyla aralarındaki fark sabit kalmış, en büyük ve en küçük çap değerleri azalmıştır. Tutma basıncı ve zımba hızı değişse de kulaklanma 9 mm olarak sabit kalmıştır. Büyük çap değerlerinin 45°'lik bölgelerde



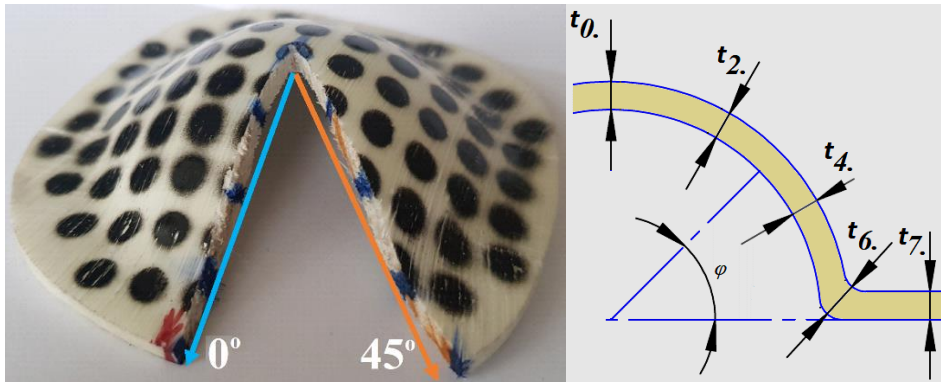
meydana geldiği açık bir biçimde görülmüştür. Kulaklanmanın değişimi sac metallerde esas olarak takımların yani zımba ile kalıp geometrilerinin bir sonucudur. Zımbanın ilerleme miktarı da geometrik olarak değişime yol açmıştır. Böylece, derinlik değişimi kulak oluşumunu etkilemiştir. Numune sıcaklığının levha kesit kalınlığını etkilemesi ve kalıp ile tutucu arasındaki akıcılığı etkilediği için kulaklanmayı değiştirmiştir.



Şekil 4.16. Zımba hızının kulaklanmaya etkisi (P: 0,4 MPa - H: 25 mm - T: 159 °C)

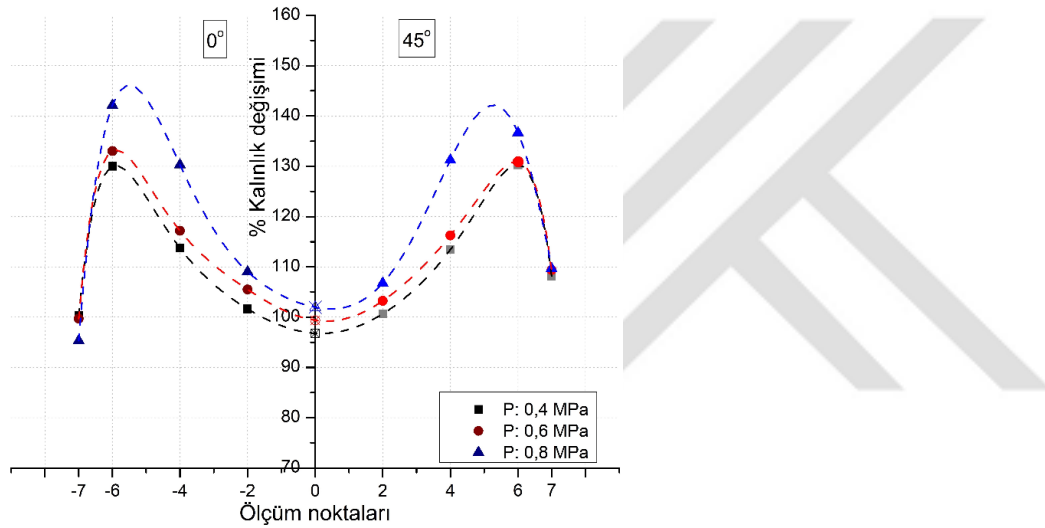
#### Şekillendirme parametrelerine göre 0 ve 45 derece kesitte kalınlık değişimleri

Deney sonrası karşılaştırma için seçilmiş numuneler  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  eksenlerden  $1/8$  kesit olarak kesilmiştir. Bir açı mastarı kullanılarak iki eksene göre de numune kesiti üzerinde belirlenmiş beş bölgeye ( $\alpha$ :  $0^\circ/30^\circ/60^\circ/\text{kavis}/90^\circ$ ) işaretleme yapılmıştır. Bu bölgelerden ölçülen kalınlık değerleri kaydedilerek eğriler oluşturulmuş ve Şekil 4.17 ile 4.20 arasında gösterilmiştir. Şekillerin sol bölgesinde  $0^\circ$  kesitten ve sağ tarafında ise  $45^\circ$  kesitten alınan değerler göstermiştir. Resim 4.3'te ölçüm noktaları iki eksende de numune üzerinde gösterilmiştir.



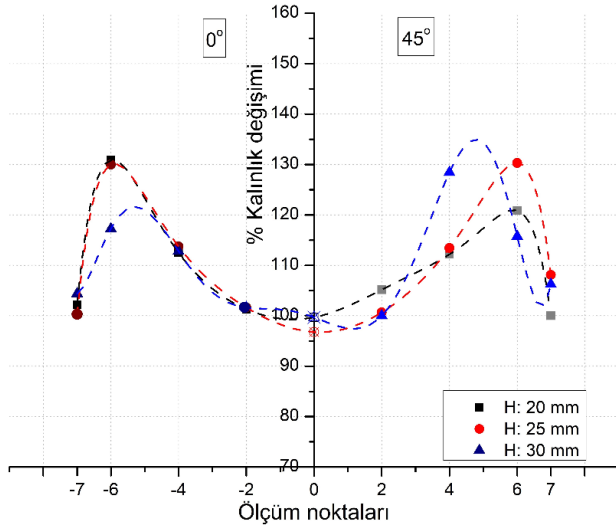
Resim 4.3. Ölçüm eksenleri ve noktaları

Derinlik 25 mm, numune sıcaklığı 159 °C ve zımba hızı 90 mm/dk şartlarındayken tutma basıncının değişiminin kalınlaşmaya etkisi Şekil 4.17’de gösterilmiştir. 0° kesitteki kalınlık değişimi incelendiğinde; tutma basıncı arttıkça flanş bölgesinde kalınlaşma azalırken, diğer tüm bölgelerde kalınlaşma artmıştır. Literatürde de benzer biçimde tutma basıncının artmasıyla flanş kısmının kalınlaşmasının azaldığı belirtilmiştir [128]. 0° kesitte en fazla kalınlaşmanın kavis bölgesinde (t6) olduğu belirlenirken, en az değişim zımbanın itme merkezi yani yarı-kürenin tepe noktasında (t0) meydana gelmiştir. 45° kesitteki kalınlık değişimi t0, t2, t4 bölgelerinde 0°’lik kesite göre kalınlaşma daha az artmış, t6 bölgesi aynı oranda kalınlaşırken, t7 bölgesi görece daha fazla kalınlaşmıştır.



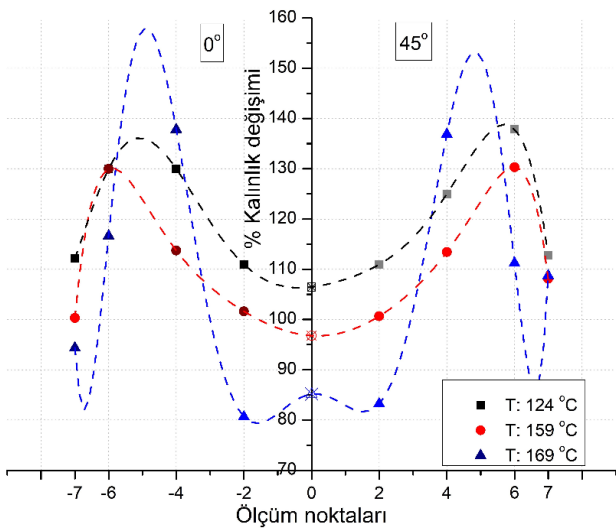
Şekil 4.17. Tutma basıncının parça kalınlığına etkisi (H: 25 mm - T: 159 °C - V: 90 mm/dk)

Numune sıcaklığı 159 °C, zımba hızı 90 mm/dk ve tutma basıncı 0,4 MPa şartlarında derinlik değişiminin kalınlaşmaya etkisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. 0° kesitte derinliğin artışı kalınlık değişiminde belirgin farklar oluşturmazken, kavis bölgesinde derinliğin 30 mm olması durumunda kalınlaşma azalmıştır. 45° kesitteki bölgelerde düzensiz bir biçimde kalınlık değişimi görülmüştür. En az kalınlık değişimi 25 mm derinlikte meydana gelmiştir.



Şekil 4.18. Derinliğin parça kalınlığına etkisi (T: 159 °C - V: 90 mm/dk - P: 0,4 MPa)

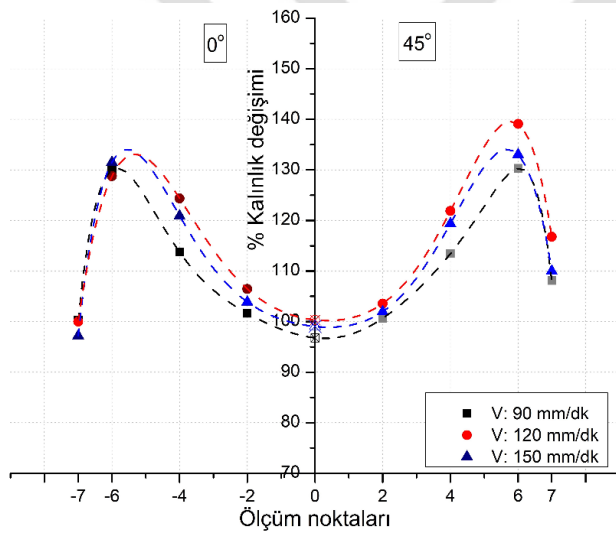
Zımba hızı 90 mm/dk, tutma basıncı 0,4 MPa ve derinlik 25 mm iken farklı sıcaklıklarda derin çekilen numunelerin kalınlık değişimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Parça kalınlığını en fazla numune sıcaklığının etkilediği tespit edilmiştir. Numune sıcaklığı arttıkça hem 0° kesitte hem de 45° kesitte kalınlaşma eğilimi azalmıştır. Numune erime sıcaklığında derin çekildiğinde t0 ve t2 bölgelerinde incelmeye meydana gelmiş ve t4 bölgesinde de daha düşük sıcaklıklara göre daha fazla kalınlaşma tespit edilmiştir. 0° ile 45° kesitleri arasında tek belirgin fark t7 kalınlığında oluşmuş, flanş kalınlığı 0° kesitte sıcaklık azaldıkça artarken 45° kesitte farklı birbirine yakın değerler belirlenmiştir.



Şekil 4.19. Numune sıcaklığının parça kalınlığına etkisi (V:90mm/dk - P:0,4MPa - H:25mm)



Tutma basıncı 0,4 MPa, derinlik 25 mm ve numune sıcaklığı 159 °C deney şartlarında zımba hızının kalınlık değişimine etkisi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Zımba hızının 90 mm/dk olması durumunda kalınlaşma en az olmuştur. Zımba hızının 120 mm/dk olmasıyla 45° ekseninde kalınlaşma tüm bölgelerde maksimum olmuş, 0° ekseninde ise bu durum sadece t6 bölgesinde farklılaşmış ve 150 mm/dk zımba hızıyla derin çekilen numunede en fazla değerini almıştır. Flanşa yani t7 bölgesindeki kalınlaşma 45° ekseninde 0° eksenine göre daha fazla meydana gelmiştir. Harhash vd. sandviç panellerin şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, 25 mm’ye kadar derin çekilmiş malzemenin bir kesit boyunca kalınlık profilinin, Şekil 4.20’de gösterilen kalınlık değişimi ve bölgeleri ile benzer eğilime sahip olduğu, merkezden eteğe doğru bir kalınlık artışı ve flanşa incelme görülmüştür [177].

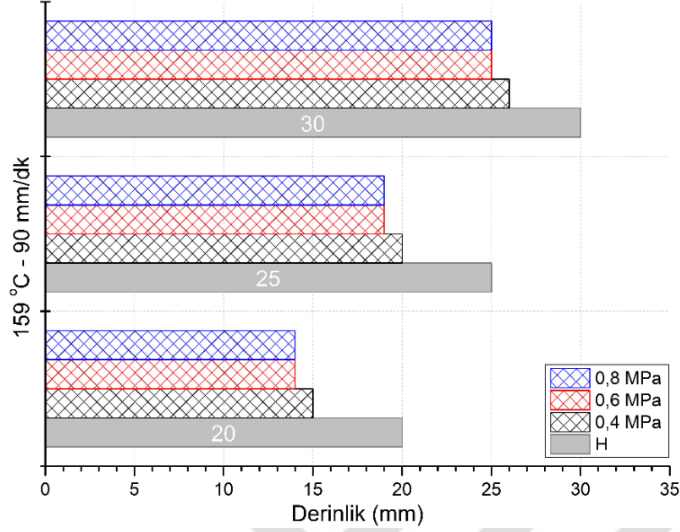


Şekil 4.20. Zımba hızının parça kalınlığına etkisi (P: 0,4 MPa - H: 25 mm - T: 159 °C)

#### Şekillendirme parametrelerinin geri gelmeye etkisi

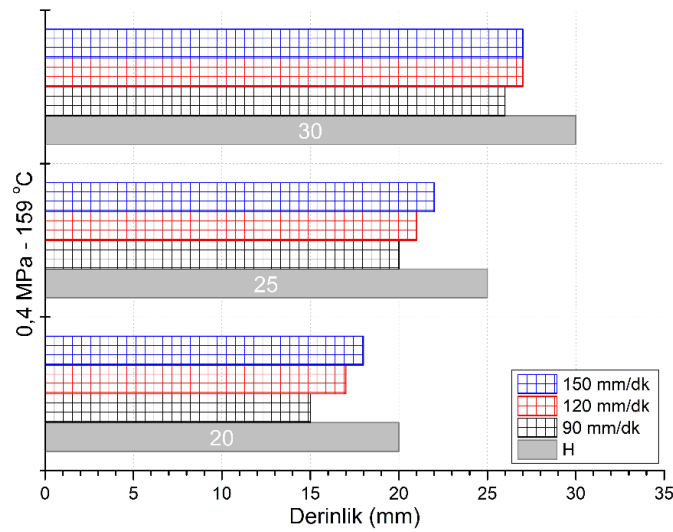
Zımbanın numuneyi belirli bir derinliğe kadar çökerttiği, zımbanın ilerlemesi durdurulduktan sonra beklemeden geri çekilmesi sırasında parçanın hedef derinlikten aşağıya düştüğü gözlanmıştır. Bu durum, malzemedeki artık gerilmelerden kaynaklanmıştır. Şekil 4.21’de tutma basıncı, Şekil 4.22’de zımba hızı ve Şekil 4.23’te numune sıcaklığı değişimlerine bağlı olarak derin çekilen numunelerin derinlik seviyesine göre geri gelme durumları gösterilmiştir. Her derinlik kademesi şekil üzerinde H ile gösterilmiştir. Tutma basıncı 0,4 MPa iken, 30 mm’ye kadar derin çekilen numune, deney sonrası 26 mm derinliğe düşmüştür. Tutma basıncı 0,4 MPa değerinin üzerindeyken geri

gelme her derinlikte 1 mm daha fazla olmuştur. Tutma basıncının düşük olması, numunenin kalıp içine daha rahat akmasına müsaade etmiş ve karşı gerilmelerin daha az etkisi altında kalmıştır. Böylece, numune daha az geri gelmiştir.



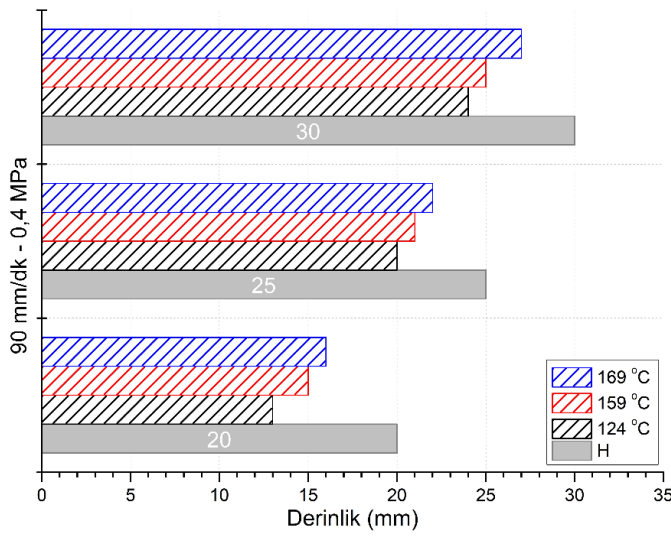
Şekil 4.21. Farklı tutma basıncına bağlı olarak parça son yükseklikleri

Zımba hızı 150 mm/dk iken, numune 20 mm'ye kadar derin çekildikten sonra derinliği 18 mm'ye gerilemiştir. Zımba hızının yavaş olması şekillendirme için geçen toplam süreyi artırmış ve buna bağlı olarak da numune sıcaklığının düşmesine neden olmuştur. Yüksek hızlarda şekillendirme süreci sonuna kadar numune sıcaklığı daha fazla korunduğundan dolayı numunede daha az artık gerilmeler birikmiştir. Böylece, zımba hızının yüksek olması geri gelme üzerinde olumlu etki meydana getirmiştir.



Şekil 4.22. Farklı zımba hızına bağlı olarak parça son yükseklikleri

Numune sıcaklığı 159 °C'deyken 25 mm'ye kadar derin çekilen parça, işlem sonrası 21 mm derinliğe düşmüştür. En fazla geri gelme numune kristallenme sıcaklığında derin çekildiğinde meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça matrikste oluşan kalıcı gerilmeler artmış ve geri gelme azalmıştır. Derinliğin düşük olması durumunda zımba, numune yüzeyinde daha dar bir bölgeye temas ettiğinden dolayı elastik deformasyon miktarı daha az olmuş ve böylece geri gelme fazlaşmıştır. Hwang vd. lokal ısıtma tekniği kullanarak kompozitlere şekil verme ile ilgili yaptıkları çalışmada, şekillendirme sıcaklığının yüksek olmasının burkulmayı ve geri gelmeyi etkili bir şekilde azaltabildiğini bulmuşlardır [178].



Şekil 4.23. Farklı numune sıcaklığına bağlı olarak parça son yükseklikleri

Genel olarak çekme derinliği arttıkça plastik deformasyon arttığından dolayı geri gelme miktarı azalmıştır. Deney sonrası numune son yüksekliklerine ait değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. En fazla geri gelme 124 °C numune sıcaklığında gerçekleşmiştir. Yani numunenin sıcaklığı arttıkça geri gelme kusuru azalmıştır. Düşük derinliklerde numunenin şekil alabilmesi için zımba ile kalıp arasında yeterince yol alamamış ve derinlik arttıkça geri gelme azalmıştır. En az geri gelme 0,4 MPa tutma basıncında olmuştur. Tutma basıncı arttıkça, levhanın kalıp ile tutucu arasında akması zorlaşmış ve malzemede biriken elastik gerilmeler artmıştır. Zımba hızının artışı kalıcı deformasyon oluşumunu artırmış ve zımba hızı arttıkça geri gelme azalmıştır.

Çizelge 4.2. Geri gelme sonrası numune yükseklikleri

Derinlik (mm)	Tutma basıncı (MPa)			Zımba hızı (mm/dk)			Numune sıcaklığı (°C)		
	0,4	0,6	0,8	90	120	150	129	159	169
20	15	14	14	15	17	18	13	15	16
25	20	19	19	20	21	22	20	21	22
30	26	25	25	26	27	27	24	25	27

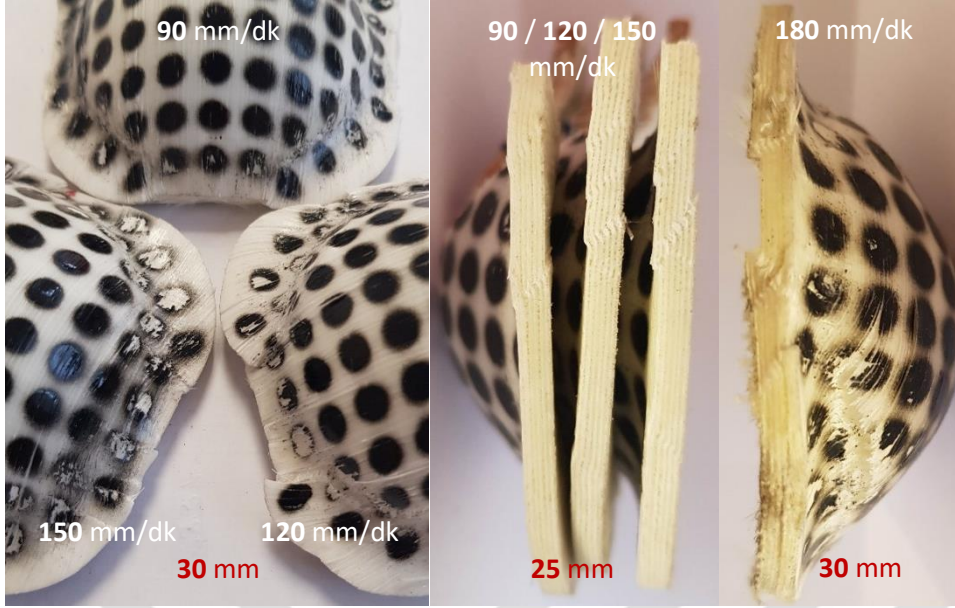
### Deformasyonlar ve delaminasyon durumu

Elyafın boylamasına ayrılması, elyafın dirseklenerek düzlem dışına bükülmesi, elyafın üst üste gelerek katlanması, matriksin enlemesine/boylamasına yırtılması, matriksle elyafın sıyrılması, katmanların buruşması durumlarından birinin veya bir kaçının oluşmasıyla tabaka içi ve/veya tabakalar arası ayrılmalar meydana gelmesi kusuruna delaminasyon adı verilmektedir [179]. 159 °C sıcaklıktaki PP-60 kompozit numuneleri, tutma basıncı 0,4 MPa ve zımba hızı 90 mm/dk iken, 30 mm derinliğe çekildiğinde Resim 4.4'te görüldüğü gibi büyük oranda delaminasyon meydana gelmiştir.



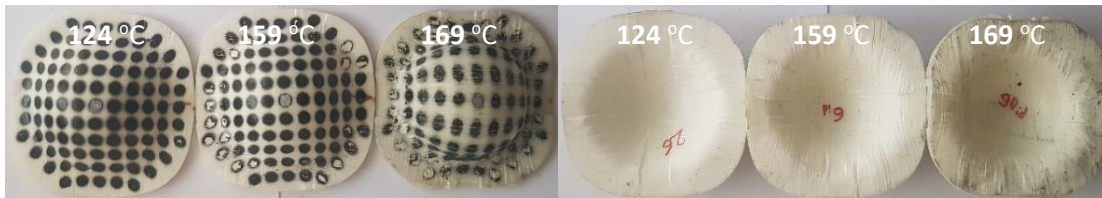
Resim 4.4. Derinlik 30 mm iken PP-60 kompozit levhanın delaminasyon durumu

PP-60 kompozit levha numune sıcaklığı 159 °C ve tutma basıncı 0,4 MPa iken zımba hızının etkisini Resim 4.5'te farklı derinlikler için gösterilmiştir. Zımba hızının artışı deformasyonları artırmıştır. 30 mm derinlikte, 90 mm/dk hızda yüzeyde herhangi bir kusur oluşmazken, 120 mm/dk hızda merkez kenara doğru buruşmalar meydana gelmiş ve hız 150 mm/dk'ya yükseldiğinde ise katmanlaşmalar gerçekleşmiştir. 180 mm/dk zımba hızında ise üst tabakada yırtılmalar ve tabakalar arası kayma belirginleşmiştir. 25 mm derinlikte, hız 120 mm/dk iken bükülmeler başlamış, 150 mm/dk'ya çıktığında kırılmalar meydana gelmiştir.



Resim 4.5. Farklı derinliklerde ve zımba hızlarında PP-60 kompozit levhada oluşan deformasyonlar

Derinlik 25 mm, tutma basıncı 0,4 MPa ve zımba hızı 90 mm/dk şartlarında numune sıcaklığının deformasyona etkisi Resim 4.6'da iç ve dış yüzeylerinden gösterilmiştir. Numune erime sıcaklığında (169 °C) derin çekildiğinde matriksin tutunamaması ile bağlayıcılığının ortadan kalkması sebebiyle elyaf lif lif ayrılmış ve tüm yüzey kırçılmıştır. Numune sıcaklığı 124 °C iken matriks (polipropilen) kristal yapıya geçme sınırında olduğundan dolayı, pres kuvvetinin yüksek olmasından da anlaşılacağı gibi, malzeme sert reaksiyon göstermiş, yatay ve düşey eksenlerde iç bölgelerden itibaren belirgin katlanmalar oluşmuştur. Yumuşama sıcaklığında (159 °C) ön ısıtılarak derin çekilen numunelerde herhangi bir kusura rastlanmamıştır. Literatürde de benzer bir sonuçla karşılaşmış ve en uygun şekil verme sıcaklığının kristallenme ile erime sıcaklıkları arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır [180].

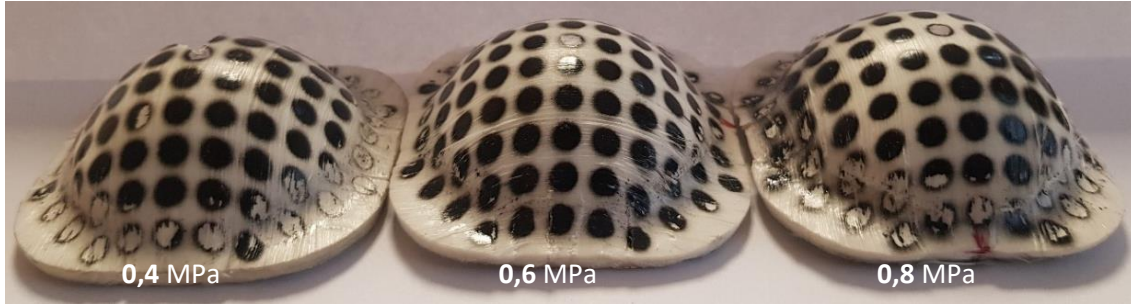


Resim 4.6. Numune sıcaklığının deformasyona etkisi

Zımba hızı 90 mm/dk, numune sıcaklığı 159 °C ve derinlik 30 mm olması durumunda tutma basıncının şekillendirme deformasyonuna etkisi Resim 4.7'de gösterilmiştir. Tutma basıncı doğudan flanş bölgesine uygulandığından dolayı ilk kopmalar kalıp kavisinden sonra



kopmalar oluşmaktadır. 0,4 MPa tutma basıncında herhangi bir kusurla karşılaşılmazken, basınç 0,6 MPa olduğunda üst yüzeyde kopmalar başlamış, 0,8 MPa tutma basıncında ise özellikle 45°'lik bölgelerde yırtılmalar meydana gelmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak, Wakeman vd. yaptıkları çalışmada, tutma basıncının yükselmesiyle flanş kısmındaki kırışmaların önlenemediğini, ancak elyaf kopması riskini artırdığı için şekillendirme kalitesini düşürdüğünü belirlemiştir [181].



Resim 4.7. Tutma basıncının değişimine göre deformasyon durumu

#### 4.2.2. Diğer kompozit levhaların deformasyonlarının incelenmesi

ŞSD'lerin oluşturulmasında numunenin yırtılma oluncaya kadar derin çekilmesi esastır. Dene makinasında, yırtılmanın başlamasıyla birlikte, artan pres kuvvetinde ani bir düşme meydana gelmekte ve ilerleme otomatik olarak durmaktadır. Kompozit levha malzemeler prepreg katmanlardan oluştuğu için deformasyon başlamış olsa bile, uygulanan yük artmaya devam etmiştir. Hasar gören katman ya da bölgenin dışında kalan yapılar yük taşımaya devam ettiği için pres kuvvetinde belirgin bir azalma gerçekleşmemiştir. Bu yüzden, deney adım adım belirli derinliklerde durdurulmuş ve deformasyon başlangıç derinlikleri tespit edilmiştir. Bununla birlikte, şekil verilen parçanın kalınlıktaki nötr ekseninden içe doğru basma yükünün, dışa doğru ise çekme yükünün etkili olduğu bilinmektedir. Bu durum deneyler sonrası numunelerde meydana gelen deformasyonlarda açıkça gözlenmiştir. Özellikle yırtılma ve çatlama hasarları en dış katmanda meydana gelmiştir. Buna ilave olarak, numunelerdeki delaminasyon ve kırışma hasarları da yan düzlemden gözlenebilmiştir. Böylece, dört malzeme çeşidi için farklı geometrinin en uygun şekillendirme parametrelerine göre en fazla ilerleyebildiği derinlik miktarları, belirtilen deformasyon durumları gözle kontrol edilerek belirlenmiştir.

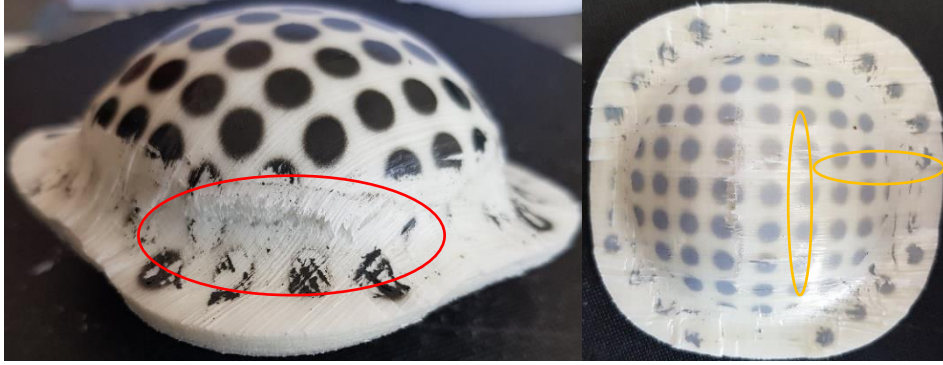
90 mm/dk zımba hızı ile şekillendirilen PP-60 kompozit levhaları için en uygun tutma basıncının 0,4 MPa olduğu belirlenmişti. Diğer kompozit levhalar için de en uygun tutma basıncını belirlemek ve bunun için deformasyona etkisini değerlendirmek üzere bir dizi deney yapılmıştır. Sabit zımba hızına göre yapılan deneylerde, PA6-60 kompozit levhası için yine 0,4 MPa tutma basıncı görece daha olumlu sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte, hem PP-70 hem de PA6-70 kompozit levhaları içinse tutma basıncının 0,6 MPa olarak uygulanması deformasyon oluşumunu olumlu yönde etkilemiştir. Derin çekilen numunelerin uğradıkları hasar durumları fotoğraflanmış ve Resim 4.8’de verilmiştir. Elyaf oranı %70 olan kompozit levhalarda tutma basıncının düşük olması, numunenin kesitten çatlamasıyla tabakaların yanal olarak bir bölgeden başka bir bölgeye doğru taşınmasına yol açmıştır.



Resim 4.8. 0,4 MPa tutma basıncıyla derin çekilmiş PP-70 ve PA6-70 numuneleri

En uygun zımba hızının PP-60 kompozit levhasının şekillendirilmesinde 90 mm/dk olduğu tespit edilmişti. Şekillendirme işleminin süresi zımba hızına bağlıdır ve işlem süresinin kısılması ısıtılan kompozit levhanın mümkün olan en kısa sürede derin çekilmesi numune sıcaklığının değişimini azalttığından dolayı parça kalitesinin iyileşmesini de sağlamaktadır. Bu bağlamda, diğer üç kompozit levha için bir üst seviye zımba hızı seçilerek deneyler yapılmış, ancak zımba hızının artışı beraberinde deformasyonların da artmasına yol açmıştır. Resim 4.9’da 120 mm/dk zımba hızına göre derin çekilmiş numunelerin görüntüleri verilmiştir. Resimde görüldüğü gibi, PP kompozit levhada köşeden yırtılma, PA6 kompozit levhada merkez eksenlerde elyafın kopmasıyla çatlamlar meydana gelmiştir. Polyamid kompozitlerin deformasyonlarına benzer şekilde, Avila & Jabbur’un PET/PE/cam elyaf granüllerinden ekstrüzyonla imal ettikleri kompozit plakalar derin çekildikten sonra oluşan yırtılmalar merkezden köşelere doğru yayılmıştır [182]. Yarı-kristalin polimerlerin kristallebilen bölgelerinin farklılık göstermesi ve elyaf ile olan yüzey

etkileşimlerinin çeşitlilik göstermesi sebebiyle, hasarın meydana gelme yeri ve biçimi değişkenlik göstermiştir.



Resim 4.9. 120 mm/dk zımba hızında şekillendirilmiş PP-70 ve PA6-60 kompozit levhaların deformasyonları

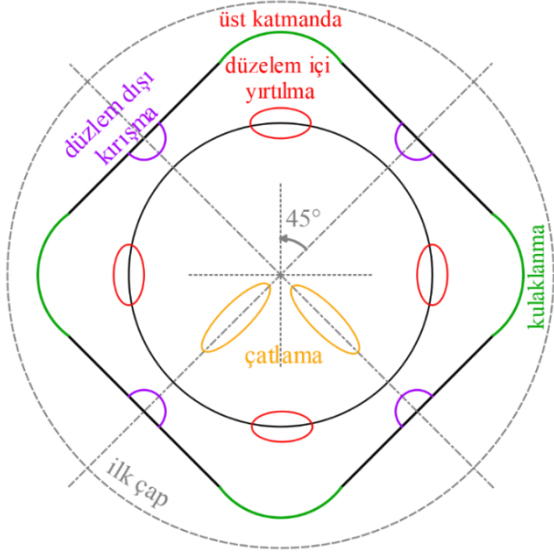
Şekillendirme kabiliyetini etkileyen en önemli parametrenin derinlik olduğu tespit edilmiştir. Resim 4.10’da uygun derinliğin aşılması durumunda kompozit levhalarda meydana gelen deformasyonlar gösterilmiştir. Dar geometrideki numuneler, tam dairesel numunelere göre daha fazla derinliğe ulaşabilmiştir. Ancak, sınırların aşılması durumunda tabakaların etek kısmından belirgin bir şekilde atmalar ve orta düzlemlerden ayrılmalar (delaminasyon) meydana gelmiştir. Orta genişlikteki numunelerde ise dar çapta bükülmelere ve PA6 kompozitlerde üst katmanda matriks kırılmasına neden olmuştur.



Resim 4.10. Çekme derinliğinin fazla olması durumunda PA6-60, PP-70 ve PA6-70 kompozit levhaların deformasyonları

Deformasyonlar ile ilgili son olarak Şekil 4.24’te derin çekme numunelerinde karşılaşılan deformasyon durumları şematik olarak özetlenmiştir. Kompozit levhalar derin çekildiğinde, matriks uzaması ve elyaf ayrılması nedenleri kadar, tabaka içi kaymanın da etkisiyle hasara uğramıştır.

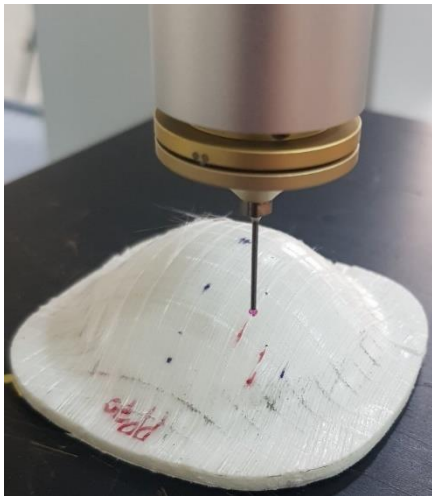




Şekil 4.24. Numune üzerindeki deformasyon bölgeleri

#### 4.2.3. Ölçüm doğrulama

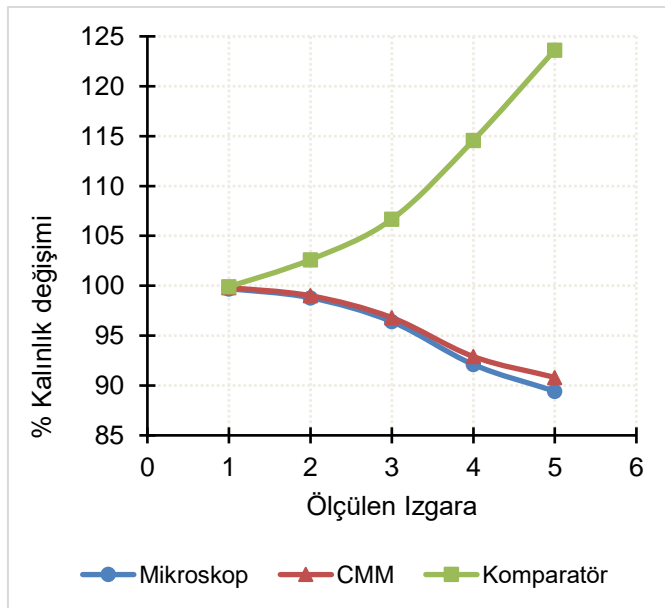
Şekillendirme sınır eğrilerinin oluşturulması için kullanılan koordinat ekseni üzerine işaretlenmiş noktalar, deforme olmuş ızgara desenlerinin mikroskopta sabit ölçekle görüntülenmesi ve bilgisayar ortamında müstakil olarak uzamaların ölçülmesiyle belirlenmiştir. Bu ölçme tekniğini değerlendirmek için, bir koordinat ölçüm makinası (Hexagon-CMM) yardımıyla, Resim 4.11’de görüldüğü gibi, ızgara desenleri doğrudan numune üzerinden hassas prob ucuyla ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ölçülen numuneden kesit parça alınmış ve dijital bir komparatör ile kesit kalınlığındaki değişim ölçülerek, hesaplanan son kalınlık değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Resim 4.11. CMM ile koordinat ölçme

Kompozit levhaların kalınlığının 3 mm olması amaçlanarak imal ettirilmiştir. Ancak, sıkıştırma-kalıplama yöntemi ile üretilen kompozit levha malzemelerin kalınlıkları tamamen homojen olmamaktadır. Bu yüzden, levha imalatından sonra doğrulama için elde edilen kalınlık değerleri ölçülmüştür. PP-60, PP-70, PA6-60 ve PA6-70 kompozitleri için ortalama levha kalınlıklarının sırasıyla; 3,19; 3,26; 3,17 ve 2,81 mm olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ölçme ve değerlendirme bölümlerinde dikkate alınmıştır.

Şekil 4.25'te PP-60 kompozit levhanın derin çekme işleminden sonra kalınlık değişimi, üç farklı yöntemler ölçülerek karşılaştırılmıştır. Mikroskop ve CMM ile yüzey katmanından yapılan ölçme işlemlerinde aynı eğimde ve birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Ancak, komperatör ile yapılan ölçümde zıt bir eğimde ve oldukça farklı bir sonuç elde edilmiştir. Bu farklılık, derin çekme işlemi sonrasında kompozit levha katmanlarının gözle görülür biçimde yapraklanması ve daha hacimli bir hale gelmesinden kaynaklanmıştır. Şekillendirmede deformasyonların yoğun olduğu bölgelerin doğru tespit edilmesi esas olarak kabul edildiğinde, yüzeyde güvenli olmayan incelleme, diğer katmanlara da kademeli olarak aktarılmış, ancak komperatörle manuel ölçüm sırasında delaminasyon nedeniyle hatalı okuma yapılmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada ızgara şekil değişimleri, Avila & Jabbur [182], ve Reyes & Kang'ın [153] yaptıkları çalışmalarda da olduğu gibi, optik mikroskopta görüntülenerek ölçülmüştür.



Şekil 4.25. Ölçümlerin karşılaştırılması

Kesit üzerinden kalınlık ölçülmesi başlangıç kalınlığı homojen olmayan numuneler için hatalı sonuç verebilmektedir. Ancak, ızgara deseni boyut değişimleri oransal olarak ölçüldüğünden daha sağlıklı sonuç elde edilebilmektedir. Tabakalı kompozitlerde en dış katmanın deformasyon değişimi levhanın hasar başlangıcına karşılık gelmektedir. Bu yüzden, şekillendirme sınırı kesit kalınlık değişimi üzerinden değil deformasyon başlangıcı dikkate alınarak belirlenmiştir.

### 4.3. Şekillendirme Sınır Diyagramları

Malzemeye şekil verme sürecinin doğru yönetilmesi ve hammaddenin verimli kullanılabilmesi için şekillendirme sırasında malzemede oluşabilecek hataların (şekillendirme sınırlarının) öngörülebilmesi gerekmektedir. Sac metaller için geliştirilmiş olan şekillendirme sınır diyagramlarının termoplastik kompozitlerde henüz hazırlanmamış olması, termoplastik kompozitlerin otomotiv endüstrisinde kullanımının yaygınlaşmasında engel teşkil etmektedir. Bu sebeple, termoplastik kompozit levhalara uygulanan derin çekme deneyleriyle malzemelerde meydana gelen deformasyonlar, termoform kalıplama parametrelerinin şekillendirme hasarları üzerindeki etkileri ve şekillendirme sınır eğrileri tespit edilmiştir.

Tek yönlü elyafı güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin derin çekilmesinde elyaf ayrılmasından kaynaklanan önemli ölçüde hasar meydana gelmiştir. Çift yönlü dokunmuş %60 oranda cam elyafı takviyelendirilmiş polipropilen esaslı kompozit levhalar için, D/d:2 çekme oranına sahip derin çekme işleminde, 159 °C levha sıcaklığı, 0,4 MPa tutma basıncı, 90 mm/dk zımba hızı en uygun şekillendirme parametreleri olarak tespit edilmiştir. En uygun derinlik seviyesinin belirlenmesi için tam daire geometriye göre güvenli görülen 25 ila 30 mm arası 1 mm aralıklarla daha hassas incelenmiş ve deformasyonların başladığı derinlik değerinin 27 mm olduğu tespit edilmiştir. Sac metallerin ŞSD'leri oluşturulurken numuneler yırtılıncaya kadar derin çekilir ve ani yük düşmesi meydana geldiğinde çatlağın ilerlememesi için deney sonlandırılır [167]. Kompozit levhalarda görülmüştür ki, sac metallerden farklı olarak, katmanlı yapıdan dolayı kuvvet aniden azalmamaktadır. Bu yüzden, kompozit levhaların ŞSD'lerinin çıkartılmasında gözle muayene ederek derin çekme işleminin durdurulması için deformasyon başlangıcı referans alınmıştır. Diğer kompozit levhaların şekillendirilmesinde uygun parametre seviyelerinin tespit edilmesi için benzer şekilde inceleme yapılmış ve dört kompozit levha çeşidi için farklı numune

geometrilerine göre en uygun derinlik seviyeleri tespit edilmiştir. Belirlenen seviyeler Çizelge 4.3'te listelenmiştir. Beş farklı geometri için en geniş numuneden en dar numuneye doğru; 'a, b, c, d, e' notasyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada olduğu gibi, Rahiminejad ve Compston yaptıkları çalışmada, benzer oranlarda daralan kum saati biçimde 5 farklı geometri kullanmışlardır [176]. Wang vd. keten lifi ile güçlendirilmiş polipropilen kompozitleri, ön ısıtma olmadan, su emdirilerek derin çekme deneylerine tabii tutmuşlardır. Levha kalınlığı 1 mm olsa bile, çekme oranı bu çalışmada olduğu gibi 2 alınarak farklı geometriler kullanılmış ve en dar numune için en fazla 30 mm derinliğe kadar sorunsuz şekillendirme yapabilmışlardır [85].

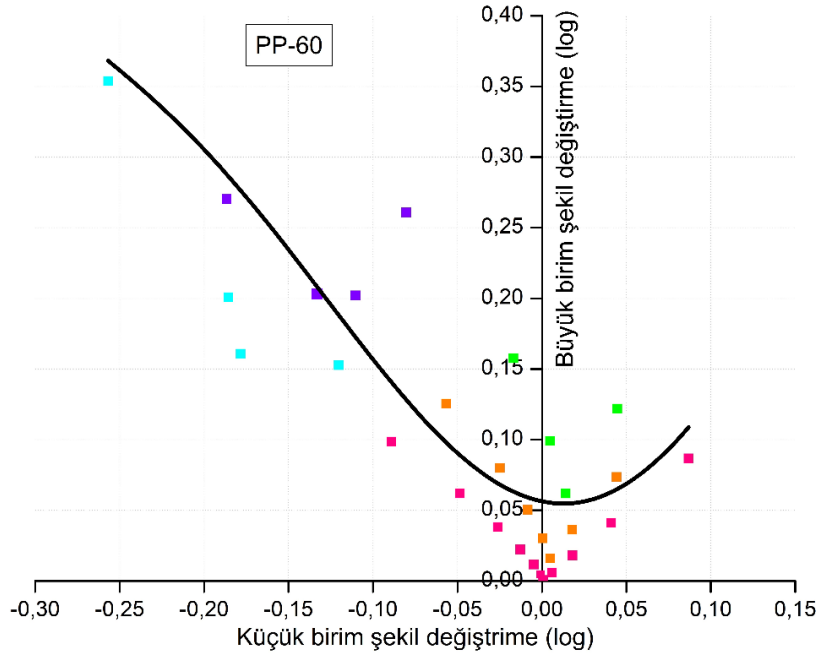
Çizelge 4.3. İncelenen şekillendirme parametrelerinin en uygun seviyeleri

	PP-60	PP-70	PA6-60	PA6-70	
Tutma basıncı (MPa)	0,4	0,6	0,4	0,6	
Numune sıcaklığı (°C)	159	159	211	211	
Zımba hızı (mm/dk)	90	90	90	90	
Derinlik (mm)	e	29	28	28	27
	d	28	27	28	27
	c	28	27	26	25
	b	28	27	24	23
	a	27	26	24	23

Hedeflenen ŞSD'lerin oluşturulması için, derin çekme deneyleri ile belirlenmiş şekillendirme parametrelerinin en uygun seviyeleri kullanılarak numuneler, sınır derinliğe kadar şekillendirilmiştir. Daha sonra, yöntemde tarif edildiği gibi ölçme işlemleri yapılarak ŞSD'ler oluşturulmuş ve aşağıda değerlendirilmiştir. Soldan sağa doğru değişen nokta renkleri, dardan geniş doğru (e-d-c-b-a) beş farklı geometriden alınan ölçümleri temsil etmektedir.

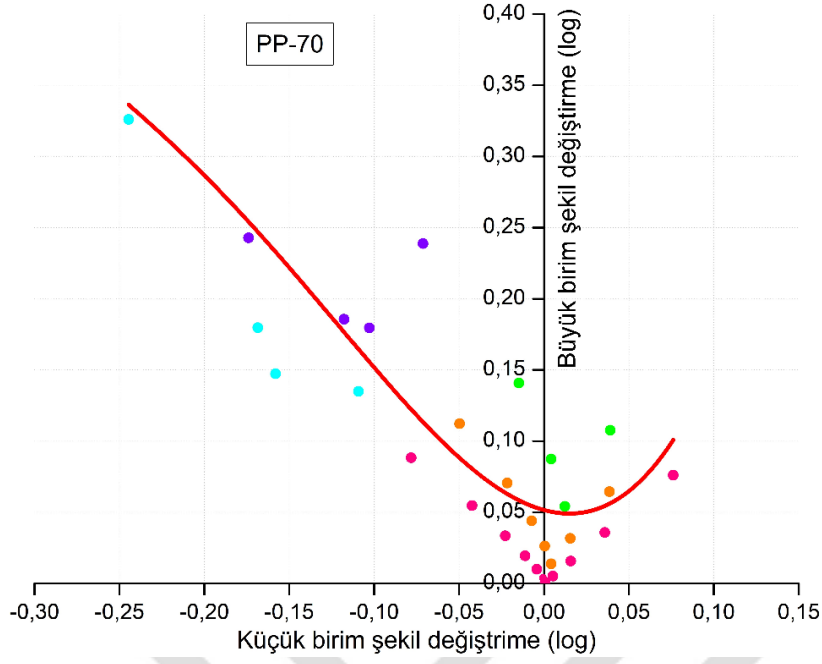
Şekil 4.26'da PP-60 kompozit levha malzemeye ait ŞSD verilmiştir. Diyagramın yatay eksenini büyük birim şekil değiştirme veya minör uzama ve dikey eksenini de büyük birim şekil değiştirme veya majör uzama olarak ifade edilmiştir. Numune yüzeylerinden alınan görüntülemeler yardımıyla ve ızgara şekil değiştirme analiziyle belirlenen uzama değerleri noktasal olarak işaretlenmiştir. Ayrıca, bu noktaları ifade eden bir eğri çizilmiştir. Bu eğri, (-0,257; 0,368), (0,014; 0,055) ve (0,087; 0,109) noktalarından geçen birim şekil

değiştirme sınırlarını temsil etmektedir. En dar PP-60 numunesi 29 mm derinliğe ve en geniş numune 27 mm derinliğe kadar çekilebilmiştir. Rahiminejad ve Compston çelik sac ile %60 cam elyaf içeren polipropilen kompozitten oluşan sandviç panellerin şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, 140 °C sıcaklıkta derin çekme işleminde 22 mm derinlikte sac malzemenin yırtılmasıyla deformasyon başlamıştır [176].



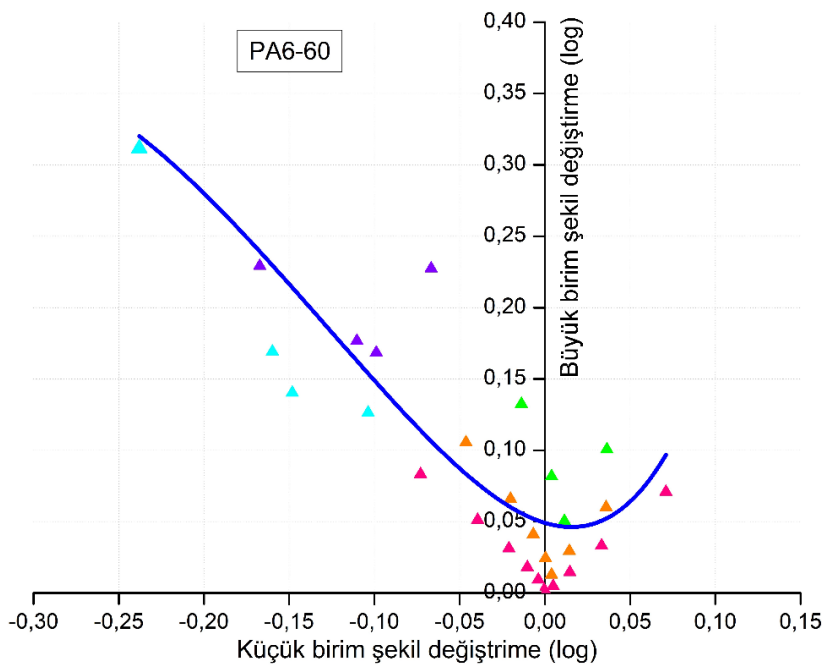
Şekil 4.26. PP-60'a ait ŞSD

Şekil 4.27'de PP-70 kompozit levha malzemeye ait ŞSD görülmektedir. Şekilde görülen eğri, negatif minör bölgede (-0,245; 0,336), majör eksen üzerinde (0,015; 0,049) ve pozitif minör bölgesinde (0,076; 0,101) noktalarından geçen birim şekil değiştirme sınırlarını temsil etmektedir. Numune geometrisine göre güvenli çekme derinliği 26 ile 28 mm arasında değişmiştir. PP-60 kompozit levhaya göre %1,1 daha fazla incelme, %2,8 daha fazla kalınlaşma meydana gelmiştir. Wang vd. yaptıkları çalışmada, 1,2 mm kalınlığa sahip, dokunmuş karbon elyaf takviyeli polipropilen kompozit levhaların derin çekme deneylerini gerçekleştirmiş ve fotografitrik ölçüm sistemi ile ızgara şekil değiştirme analizini yaparak malzemelerin ŞSD'lerini oluşturmuştur. Dokuma yönü 0/90 olan kompozit malzemenin, minör uzamaları %-25 ile %18 arasında neredeyse eşit olarak dağılmış ve majör uzama %20 civarında yoğunlaşmıştır [183]. Elyaf çeşidinin farklı olmasına rağmen negatif minör uzama bölgesi benzerlik göstermiş, ancak levha kalınlığının düşük olması majör uzamaların yükselmesini ve pozitif minör bölgesinin genişlemesini sağlamıştır.



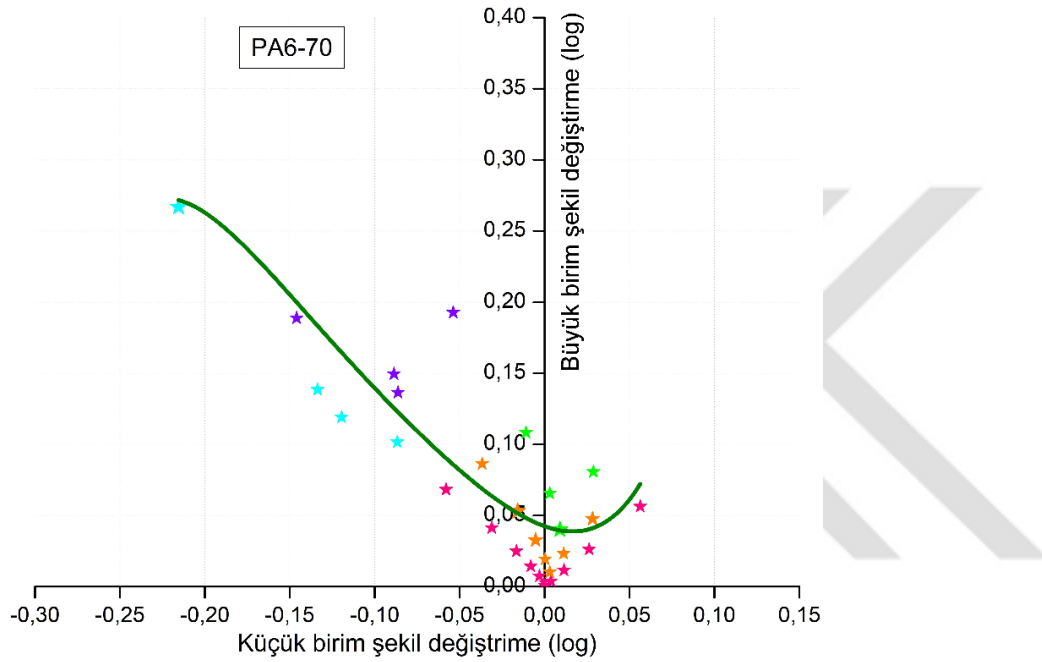
Şekil 4.27. PP-70'e ait ŞSD

Şekil 4.28'de PA6-60 kompozit levhaya ait ŞSD görülmektedir. Şekillendirmede sınır derinlikleri tam dairesel numunede 24 mm, en dar numunede 28 mm olarak belirlenmiştir. Bu sınır derinliklere göre çekilen numunelerden alınan ölçümler diyagram üzerinde noktasal olarak işaretlenmiş ve bu noktaları temsil eden bir eğri oluşturulmuştur. Eğri, (-0,238; 0,320), (0,015; 0,046) ve (0,071; 0,097) noktalarından geçen birim şekil değişirme sınırlarını temsil etmektedir.



Şekil 4.28. PA6-60'a ait ŞSD

Şekil 4.29’da PA6-70 kompozit levhaya ait ŞSD görülmektedir. Diyagramda görülen eğri, (-0,215; 0,272), (0,015; 0,039) ve (0,056; 0,072) noktalarından geçen birim şekil değiştirme sınırlarını temsil etmektedir. PP-60 kompozit levhaya göre %1,5 oranda incelme ve %4,5 kalınlaşma eğilimi artmıştır. Farklı geometrilerdeki numuneler 23 ila 27 mm arasında derin çekilebilmiştir. PA6 polimerinin Hidrojen bağı yapabilme kapasitesinin yüksek olması



Şekil 4.29. PA6-70’e ait ŞSD

Derin çekme deneyleri başarıyla sonuçlandırılmış dört kompozit malzemeye ait şekillendirme sınır eğrileri Şekil 4.30’da karşılaştırılmıştır. Yukarıda bahsedilen nokta bulutlarının üzerinden geçen eğriler, beşinci mertebeden bir polinom fonksiyonla (regresyon iyilik uyum indeksi  $R^2=0,79$ ) fit edilmiştir. Eğrinin altında kalan bölge, ilgili malzemenin güvenli şekil değiştirme kabiliyetini gösterirken, eğrinin üzerindeki bölge ise şekillendirme riskini, yani uzamaların hasara yol açtığını göstermiştir.

Şekillendirme sınır eğrisine ait koordinatların sonlu elemanlar analiz programlarının malzeme kütüphanelerine eklenmesiyle, ilgili malzemeye ait şekillendirme kabiliyeti hakkında sayısal bir bilgi tanımlanmış olmakta ve dolayısıyla, parça-kalıp imalatından önce, kompozit levha malzemenin ilgili şekli alıp alamayacağıyla ilgili olarak ön bilgi verilmektedir. Kompozit levhanın sorunsuz olarak şekil alabilmesi için uzamaların eğrinin altında kalması gerekmektedir. Ayrıca, literatürde ve yöntemde açıklandığı gibi küçük ve

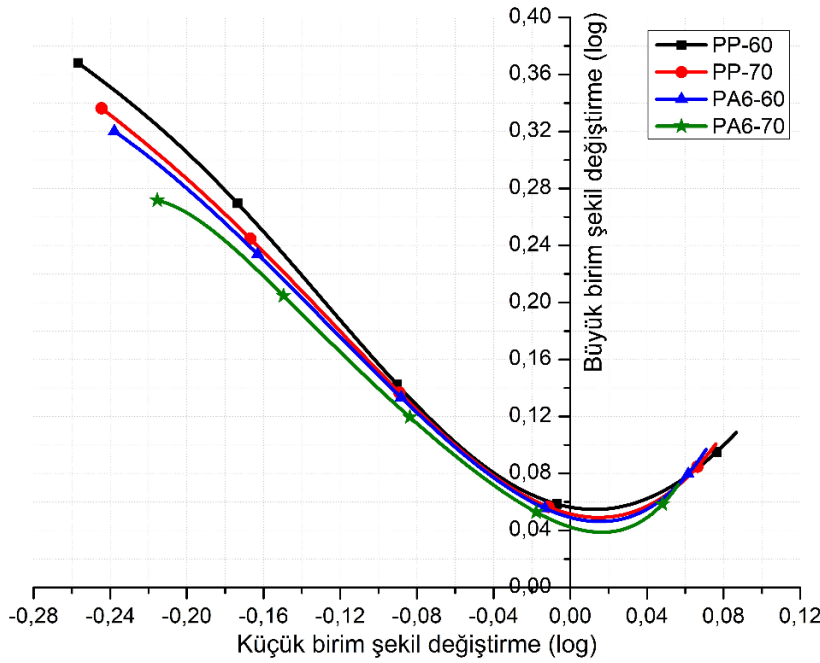
büyük birim şekil değiştirmelerin oranı, malzemede meydana gelen gerilme-uzama biçimleri ile ilgili bilgi vermektedir. Yöntemde açıklandığı gibi (Bkz. Şekil 3.18); uzama modu  $u=-1$  (saf kayma) değerinden  $u>-2$  moduna doğru gidildikçe malzeme kalınlaşıyor ve  $u=1$  (eş eksenli gerdirme) moduna doğru gidildikçe malzeme inceliyor demektir. Uzama oranı pozitif olduğunda, yani küçük birim şekil değişimi pozitif yönde ise, malzeme iki ekseninde de geriliyor demektir. Uzama oranı negatif olduğunda, yani küçük birim şekil değişimi negatif yönde ise, malzeme tek yönde çekiliyor veya çekme ve basma yüklerine maruz kalıyor demektir [184].

Şekil 4.30'da görülen eğrilere ait deformasyon modlarının ( $u$ ) minimum -1,1 ve maksimum 1,0 değerleri arasında değiştiği hesaplanmıştır. Deformasyon modu uzama oranı ile ilişkilidir. Saf kayma deformasyon modu ile tek eksenli çekme modu arasındaki değerler en dar numunelerden ( $d$  ve  $e$ ) elde edilmiştir. Bu numuneler geleneksel çekme numunesi gibi iki boyutlu bir gerinime maruz kalmıştır. Wang vd. yaptıkları çalışmada, 1 mm kalınlığa sahip, %50 dokunmuş keten lifi takviyeli polipropilen kompozit levhaların ŞSD'lerini oluşturmuşlar, takviye oranı ile türünün farklı olması poisson etkisini baskın hale getirdiğinden dolayı, minimum uzama oranını -0,3 olarak tespit etmişlerdir [85]. Bu çalışmada kullanılan kompozit levhaların 3 mm kalınlığında olması, cam elyaf çekme dayanımının yüksek ve kompozitte ağırlıkça elyaf oranının fazla olmasından dolayı, boylamasına uzama keten lifine göre daha az meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak, endeki uzamayla olan oranların da değişkenlik göstermesiyle bu fark ortaya çıkmıştır.

Şekil 4.30 incelendiğinde, PP-60'a ait eğrinin altında kalan alan en fazla olduğundan dolayı PP-60 kompozit levha malzemenin derin çekilebilirlik özelliğinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Derin çekme yüksekliğinin azalmasıyla birlikte sınır eğrisinin aşağıya doğru ötelendiği görülmüştür. Büyük birim şekil değiştirme ekseninde eğriler arasındaki fark düzlem uzama durumundan itibaren belirginleşmiştir. Ayrıca, küçük birim şekil değiştirme ekseninde saf kayma durumu civarında uzama farkları kompozit levha çeşidine göre belirgin olarak görülmüştür. Elyaf oranındaki artışın kompozit levhaların şekillendirme kabiliyetini azalttığı tespit edilmiştir. Eğrilerin diyagramın sol bölgesinde daha fazla alana sahip olduğu görülmüştür. Kritik deformasyonun çoğunlukla saf kayma modundan önce veya hemen sonra başladığı anlaşılmıştır. Ayrıca, diyagramın sağ tarafı değerlendirildiğinde, ortalama %8'lik bir incelme eğiliminden sonra deformasyonun başladığı görülmüştür. Pozitif minör bölgesinin kısa olması, ilgili



kompozit levhalardan karmaşık geometrilere sahip parça imalatında hasar toleransının düşük olduğunu göstermiştir. Morrow vd., sac metallerin şekillendirme sınır eğrilerinin majör uzama ekseninde daha yüksek değerlere çıktığını, kompozit levhaların majör ekseninde düzlem uzamalarının daha düşük gerçekleştiğini tespit etmiştir [58]. Bu çalışmamızın sonuçları da bu bulguyu destekler nitelikte olmuş, ayrıca negatif minör uzama bölgesine doğru yönelim arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.30. ŞSD'lerin karşılaştırması

Bu çalışmada incelenen kompozit levhaların geleneksel mekanik özelliklerine tekrar bakıldığında, çekme dayanımının elyaf oranının artmasıyla yükseldiği, PA6 kompozitlerin basma dayanımının PP kompozitlere göre daha fazla çıktığı, benzer şekilde kayma dayanımında da polimer türünün baskın rol oynadığı belirlenmiş, ancak PP kompozitlerin PA6 kompozitlere göre daha yüksek darbe tokluğu gösterdiği ve elyaf oranının yükselmesiyle sönmülenen enerjinin arttığı tespit edilmiştir. ŞSD'ler bu bulgular ile birlikte değerlendirilecek olursa; kayma dayanımı en zayıf olan PP-60 malzemesinin şekil alma kabiliyetinin en yüksek olduğu, basma dayanımı PA6 kompozitlerden daha yüksek olan PP kompozitlerin daha kolay şekillendirildiği, elyaf oranıyla doğru orantılı değişen çekme dayanımında olduğu gibi en zor şekillendirilen malzemenin PA6-70 olduğu ve aynı elyaf oranında PP kompozitlerin darbe tokluğunun PA kompozitlere göre daha fazla çıkmasına paralel olarak şekillendirme kabiliyetlerinin de yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.



## 5. SONUÇLAR

Otomotiv endüstrisinde, yakıt sarfiyatının ve buna bağlı olarak karbondioksit emisyonunun azaltılması için, taşıtlarda kullanılan parçalarda, herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın, ağırlık azaltılması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, metal malzemelerin yerini alabilecek, özgül mukavemeti yüksek ve hızlı kalıplanabilme özelliğine sahip termoplastik kompozit parçaların kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, farklı matriks/elyaf kombinasyonlarına sahip levha halindeki termoplastik kompozitlerin (PP-60, PP-70, PA6-60, PA6-70) termoform kalıpta sorunsuz şekillendirilebilmeleri için numune sıcaklığı, zımba hızı, tutma basıncı parametrelerinin en uygun değerleri tespit edilmiş ve bu parametrelerin en uygun seviyelerine göre derin çekme deneyleri yapılarak şekillendirme sınır diyagramlarının hazırlanmıştır.

Termoplastik esaslı kompozit levhaların şekillendirme sınır diyagramlarının çıkarılmasında sac metaller için kullanılmakta olan Nakajima derin çekme yönteminden yararlanılmıştır. Literatür araştırmasıyla birlikte hazırlanan tam faktöriyel deney tasarımına göre malzemeler tedarik edilmiş ve yapısal/termal karakterizasyona (çekme, basma, darbe, kayma, DSC, TGA, HDT/Vicat, soğuma testlerine) tabi tutulmuştur. Deney numuneleri standartlara uygun boyutlarda su jeti yöntemiyle kesilmiştir. Daha sonra, lazer teknolojisiyle numune yüzeylerine kartezyen geometride markalama yapılmıştır. Deney düzeneği kurulduktan sonra levha halindeki termoplastik kompozitler ön ısıtılmış ve derin çekme işlemiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Termoplastik kompozit levhaların termoformla şekillendirilmesi sırasındaki olası deformasyon davranışları (delaminasyon, kulaklanma, kırılma, kalınlaşma/incelme, boğumlanma, yırtılma, çatlama, geri gelme hataları) deneylerle sistematik olarak incelenmiştir. Termoform kalıplama parametrelerinin (malzeme sıcaklığı, zımba hızı, tutma basıncı, çekme derinliği) ve kompozit levha malzemenin matriks/elyaf kombinasyonlarının, şekillendirme hasarları üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. En uygun parametre seviyelerine göre yapılan derin çekme işlemleri sonrası, numune yüzeylerindeki ızgaralarda meydana gelen şekil değişimleri ışık mikroskopunda görüntülenmiş ve bilgisayar ortamına aktarılarak ölçümler yapılmıştır. Deforme olmuş desenlerden ölçülen değerler kullanılarak şekillendirme sınır diyagramları çizilmiştir.

Şekillendirme kuvveti üzerinde en çok derinlik değişimi etkili olmuş, zımba hızı, pot basıncı ve derinlik yükseldikçe kuvvet artmış, numune sıcaklığı yükseldikçe azalmıştır. Çekme derinliği yükseldikçe doğal olarak flanş çapı belirgin bir şekilde düşmüş ve kulaklanma artmıştır. Numune sıcaklığı ve zımba hızı arttıkça azalan flanş çapı, tutma basıncı arttıkça küçülmüştür. Kulaklanma sac metallerdeki gibi dört köşede 45°'lik eksenlerde gerçekleşmiştir. Parça kalınlığı tepe bölgesinde korunurken, kalınlık değişimine en fazla numune sıcaklığının etki ettiği belirlenmiştir. 0° ve 45° kesitlerde de en fazla deformasyon kavise yakın bölgelerde meydana gelmiştir. Parça derinliğinin artması malzemedeki olası kusurların her birinin artmasına yol açmıştır.

Çift yönlü dizilmiş %60 cam elyafla takviyelendirilmiş polipropilen esaslı kompozit levhalar için, D/d:2 çekme oranında, derin çekme işleminde 159 °C levha sıcaklığı, 0,4 MPa tutma basıncı, 90 mm/dk zımba hızı ve 27 mm derinlik en uygun şekillendirme parametreleri olarak tespit edilmiştir. %60 elyaf içeren polyamid-6 için 211 °C levha sıcaklığında, en uygun tutma basıncı ve zımba hızının PP-60 ile aynı olduğu (0,4 MPa - 90 mm/dk) belirlenmiş, ancak çekme derinliğinin 24 mm ile sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Elyaf oranları %70 olduğunda ise, tutma basıncının 0,6 MPa olarak uygulanmasının daha uygun olduğu, diğer parametrelerin değişmediği ve bununla birlikte güvenle ulaşılabilen derinlik değerlerinin 1'er mm azaldığı tespit edilmiştir. Tespit edilen bu parametrelerin seviyeleri şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesinde kullanılmıştır.

Tek yönlü cam elyafla güçlendirilmiş termoplastiklerin çift yönlü dizilmesiyle levha haline getirilmiş kompozit malzemelerin derin çekme işleminin başarıyla gerçekleştiği, ancak tümü tek yönlü olan kompozit levhaların üç boyutlu olarak termoform kalıpta şekil verilemediği ve lif yönünün tersine hasar oluştuğu tespit edilmiştir. 3 mm levha kalınlığına sahip kompozitlerin şekillendirme sınır diyagramları değerlendirildiğinde, PP-60 malzemesinin güvenli şekil verme bölgesinin diğerlerine göre daha fazla olduğu, PP-60'ın, saf kayma modunda elde edilen %26 minör ve %37 majör uzamalara göre, şekil alma kabiliyetinin en yüksek olduğu belirlenmiştir. PA6-70'in diğer kompozitlere göre daha büyük hasara uğradığı tespit edilmiştir. PP kompozit levhaların PA6 kompozitlere göre daha az kusurla şekillendirilebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, elyaf oranındaki artışın şekillendirmeyi zorlaştırdığı tespit edilmiştir. Şekillendirme sınır eğrilerinin altında kalan alan ŞSD'nin sol bölgesinde daha fazla çıkması ve sağ bölgenin genişliğinin az olması

nedeniyle karmaşık geometrilere sahip parçaların şekillendirilmesinde bu kompozit levhaların hasar toleransının düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

### 5.1. Öneriler

Termoplastik kompozit malzemelerin derin çekilmesinde; kalıp sıcaklığı, kalıp boşluğu ve kalıp kavisi değiştirilerek, ayrıca daha düşük levha kalınlıkları, polimer ve elyaf türleri de incelenerek termoform kalıplama işlemlerinin kolaylaştırılmasına bilimsel katkılar sunulabilir.





## KAYNAKLAR

1. Krzyzanowski, M., Kuna-Dibbert, B., and Schneider, J. (2005), *Health Effects of Transport Related Air Pollution*. Copenhagen: The World Health Organization Publications.
2. Faiz, A., Weaver, C. S., and Walsh, M. P. (1996), *Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions*. Washington DC: The World Bank Publications.
3. Schiffer, H. W. (2016), *World Energy Resources*. London: World Energy Council.
4. İnternet: United States Environmental Protection Agency. (2019), *Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation*. Erişim: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-05/documents/epa\\_non-co2\\_greenhouse\\_gases\\_rpt-epa430r19010.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-05/documents/epa_non-co2_greenhouse_gases_rpt-epa430r19010.pdf)
5. Gurria, A. (2011), *Energy*. Paris: OECD Green Growth Studies.
6. İnternet: European Parliament. (2019), *State of Play, Current and Future Challenges, EU Environment and Climate Change Policies*. Erişim: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/638428/IPOL\\_STU\(2019\)638428\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/638428/IPOL_STU(2019)638428_EN.pdf)
7. İnternet: U.S. Department of Energy. (2015), *Advancing Clean Transportation and Vehicle Systems and Technologies, Quadrennial Technology Review*. Erişim: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter8.pdf>
8. İnternet: Argonne National Laboratory. (2015), *Emissions Modeling: Greet Life Cycle Analysis*. Erişim: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/van002\\_wang\\_2015\\_o.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/van002_wang_2015_o.pdf)
9. İnternet: International Council on Clean Transportation. (2016), *Light weighting Technology Development and Trends in U.S. Passenger Vehicles*. Erişim: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_PVtech\\_lightweighting\\_wp2\\_016-25.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PVtech_lightweighting_wp2_016-25.pdf)
10. Crolla, D. (2015), Fundamentals of SI Engines: Trends in Automotive Engines. D. Crolla, *Encyclopedia of Automotive Engineering Leeds* (1<sup>st</sup> edition). Wiley Press, 90.
11. İnternet: Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P., and Wanner, B. U.S. (2011), *U.S. Department of Energy Critical Materials Strategy*. Erişim: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf)
12. Askeland, D. R. (1996), *The Science and Engineering of Materials*. (3<sup>rd</sup> edition). Boston: Springer Press, 88.
13. Fentahun, M. A., and Savaş, M. A. (2018), Materials used in Automotive Manufacture and Material Selection using Ashby Charts. *International Journal of Materials Engineering*, 8(3), 40-54.

14. Internet: Moretta, L. (2018), *Review of Material and Manufacturing Process Selection Criteria*. Circular Approach for Eco-Composite Bulky Product. Erişim: <https://www.ecobulk.eu/wp-content/uploads/2018/12/D2.3-Material-and-manufacturing-process-selection-criteria.pdf>
15. Prieur, M. (2006), *Functional Elements and Engineering Template Based Product Development Process: Application for the Support of Stamping Tool Design*. Msc Thesis, Karlsruhe University Press, Karlsruhe.
16. Ishikawa, T., Amaoka, K., Masubuchi, Y., Yamamoto, T., Yamanaka, A., Arai, M., and Takahashi, J. (2018), Overview of Automotive Structural Composites Technology Developments in Japan, *Composites Science and Technology*, 155, 221-246.
17. Mitschang, P., Blinzler, M., and Wöginger, A. (2003), Processing Technologies for Continuous Fibre Reinforced Thermoplastics with Novel Polymer Blends. *Composites Science and Technology*, 63(14), 2099-2110.
18. Khan, M. A., Mabrouki, T., Vidal-Salle, E., and Boisse, P. (2010), Numerical and Experimental Analyses of Woven Composite Reinforcement Forming using a Hypoelastic Behaviour: Application to the Double Dome Benchmark. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 378-388.
19. Leutz, D., Vermilyea, M., Bel, S., and Hinterhölz, R. (2016), Forming Simulation of Thick AFP Laminates and Comparison with Live CT Imaging. *Applied Composite Materials*, 23, 583-600.
20. Willems, A. (2008), *Forming Simulation of Textile Reinforced Composite Shell Structures*. PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 21.
21. Vanclooster, K., Van-Goidsenhoven, S., Lomov, S. V., and Verpoest, I. (2009), Optimizing the Deepdrawing of Multi-Layered Woven Fabric Composites. *The International Journal of Material Forming*, 2(1), 153-156.
22. Campbell, F. C. (2010), *Structural Composite Materials*. (1<sup>st</sup> edition). USA: ASM International Press.
23. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., and Pruncu, C. (2019), Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
24. Kaw, A. K. (2006), *Mechanics of Composite Materials*. (2<sup>nd</sup> edition). New York: Taylor & Francis Group Press, 76.
25. Reddy, J. N. (2006), *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*. (2<sup>nd</sup> edition). Boca Raton: CRC Press.
26. Ganczarski, A. W., Hernik, S., and Skrzypek, J. J. (2015), Mechanics of anisotropic composite materials J. Skrzypek and A. Ganczarski, *Mechanics of anisotropic materials* (87-131) Springer International Publishing.



27. Masuelli, M. A. (2013), Introduction of Fibre-Reinforced Polymers, Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. *Fiber Reinforced Polymers*, Croatia: Intech Press, 73.
28. Seyhan, A. T. (2003), *Processing and Characterization of Polymer Based Composites with Superior Impact Resistance*. MSc Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir, 8.
29. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., and Linul, E. (2019), Fiber Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties and Applications. *Polymers*, 11(10), 1-37.
30. İnternet: Gurit. (2017), *Guide to Composites*. Erişim: <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
31. Ho, M. P., Wang, H., Lee, J. H., Ho, C. K., Lau, K. T., Leng, J., and Hui, D. (2012), Critical Factors on Manufacturing Processes of Natural Fibre Composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3549-3562.
32. Zweben, C. (2015), Composite Materials (Chapter 10), M., Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook*, (4<sup>th</sup> edition), Wiley Press, 68.
33. Mallick, P. K. (1993), *Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*. (3<sup>rd</sup> edition). New York: CRC Press.
34. Shedden, J. (2013), *Simplifying the Testing and Calculation of Fracture Toughness of Thermoplastic and Thermoset Matrix Composite Materials*, A Senior Project, California Polytechnic State University, California.
35. Shubhra, Q. T., Alam, A., and Quaiyyum, M. (2011), Mechanical Properties of Polypropylene Composites: A Review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(3), 362-391.
36. Koltzenburg, S., Maskos, M., Nuyken, O. (2017), *Polymer Chemistry*. Springer Verlag GMBH.
37. Karian, H. (2003), *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*. (2<sup>nd</sup> edition). New York: Taylor & Francis Press, 63.
38. Mazumdar, S. K. (2002), *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. (1<sup>st</sup> edition). Boca Raton: CRC Press.
39. Massy, J. (2017), *A Little Book about Big Chemistry: The Story of Man-Made Polymers*. Cham: Springer International Publishing.
40. Amin, S. (2011), Thermoplastic Elastomeric (TPE) Materials and Their Use in Outdoor Electrical Insulation. *Reviews on Advanced Materials Science*, 29, 15-30.
41. Callister, W. D. (2007), *Materials Science and Engineering*. (7<sup>th</sup> edition). New York: Wiley Press.

42. Woigk, W., Fuentesc, C. A., Riond, J., Hegemanne, D., Van-Vuurec, A. W., Dransfeldb, C., and Masania, K. (2019), Interface Properties and Their Effect on the Mechanical Performance of Flax Fibre Thermoplastic Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 122, 8-17.
43. Mortazavian, V., and Fatemi, A. (2015), Effect of Fiber Orientation and Anisotropy on Tensile Strength and Elastic Modulus of Short Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, 72, 116-129.
44. Fukuta, K., Aoki, E. and Nagatsuka, Y. (1986), 3-D Fabrics for Structural Composites, *15th Textile Research Symposium*, Osaka/Japan.
45. Wang, P., Legrand, X., and Soulat, D. (2017), Three Dimensional Textile Preform Using Advanced Textile Technologies for Composite Manufacturing. B. Kumar and S. Thakur, *Textiles for Advanced Applications* (161-189) Rijeka: Intech Publisher.
46. Badawi, S. S. (2007), *Development of the Weaving Machine and 3-D Woven Spacer Fabric Structures for Lightweight Composites Materials*. PhD Thesis, Dresden University of Technology, Dresden.
47. Boisse, P. (2011), *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, Oxford: Woodhead Publishing, Volume 36.
48. Chawla, K. K. (2019), *Composite Materials, Science and Engineering*. (4<sup>th</sup> edition). Springer Press.
49. Vaidya, U. K., and Chawla, K. K. (2008), Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *International Materials Reviews*, 53(4), 185-218.
50. Friedrich, K., and Hou, M. (1998), On Stamp Forming of Curved and Flexible Geometry Components from Continuous Glass Fiber Polypropylene Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29A, 217-226.
51. Aström, B. T. (1997), Thermoplastic Composite Sheet Forming: Materials and Manufacturig Techniques. *Composite Sheet Forming: Composite Material Series*, 11, 27-73.
52. Land, P., Crossley, R., Branson, D., and Ratchev, S. (2015), Technology Review of Thermal Forming Techniques for Use in Composite Component Manufacture. *SAE International*, 2015-01-2610.
53. Biron, M. (2012), *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. (2<sup>nd</sup> edition). Amsterdam: Elsevier Press, 47.
54. Wakeman, M. D., Cain, T. A., Rudd, C. D., Brooks, R., and Long, A. C. (1998), Compression Moulding of Glass and Polypropylene Composites for Optimised Macro- and Micro- Mechanical Properties-1 Commingled Glass and Polypropylene. *Composites Science and Technology*, 58(12), 1879-1898.

55. Gabler, M., Tkachenko, V., Küppers, S., Kuka, G. G., Habel, W. R., Milwich, M., and Knippers, J. (2012), Automatically Produced FRP Beams with Embedded FOS in Complex Geometry: Process, Material Compatibility, Micromechanical Analysis, and Performance Tests. *SPIE Smart Structures and Non-destructive Evaluation*, San Diego/California.
56. İnternet: Evonik Industries A.G. (2016), *Innovation for Composites*. Erişim: [https://composites.evonik.com/product/composites/downloads/phc\\_innovation-for-composites\\_web.pdf](https://composites.evonik.com/product/composites/downloads/phc_innovation-for-composites_web.pdf)
57. Offringa, A. R. (1996), Thermoplastic Composites Rapid Processing Applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27 A, 329-336.
58. Morrow, C., Dharmalingam, S., Venkatesan, S., and Kalyanasundaram, S. (2010), Stretch Forming Studies on Thermoplastic Composite. *6th Australasian Congress on Applied Mechanics*, Perth/Australia.
59. Duhovic, M., and Bhattacharyya, D. (2006), Simulating the Deformation Mechanisms of Knitted Fabric Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), 1897-1915.
60. Hou, M., Ye, L., and Mai, Y. W. (1997), Manufacturing Process and Mechanical Properties of Thermoplastic Composite Components. *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 334-338.
61. Haanappel, S. (2013), *Forming of UD Fibre Reinforced Thermoplastics*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, 18.
62. Bell, C., Corney, J., Zuelli, N., and Savings, D. (2019), A State of the Art Review of Hydroforming Technology. *International Journal of Material Forming*, 151, 1-40.
63. Paul, S. K. (2013), Theoretical Analysis of Strain- and Stress-Based Forming Limit Diagrams. *Journal of Strain Analysis*, 48(3), 177-188.
64. Anket, O., Koruvatan, T., ve Ay, I. (2011), Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.
65. Şener, B. and Kurtaran, H. (2016), Optimization of Process Parameters for Rectangular Cup Deep Drawing by the Taguchi Method and Genetic Algorithm. *Materials Testing*, 58(3), 238-245.
66. Şimşir, C., Çetin, B., Efe, M., Davut, K., and Bayramin, B. (2017), A Material Perspective on Consequence of Deformation Heating During Stamping of DP Steels. *Journal of Physics: Conference Series*, 896, 012059.
67. Çavuşoğlu, O., Leacock, A. G., and Gürün, H. (2016), Forming Limit Diagrams and Strain Rate Dependent Mechanical Properties of AA6019-T4 and AA6061-T4 Aluminium Sheet Materials. *Materials and Technology*, 50(6), 1005-1010.
68. Şen, N., ve Kurgan, N. (2015), Sac Metal Malzemelerin Ilık Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme Prosesinde Malzeme Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 663-674.

69. Özdemir, A. O., Karataş, Ç., ve Şirin, H. (2017), Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelik Saclardaki Alaşım Elementlerinin Şekillendirmeye Etkisinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım ve Teknoloji*, 5(4), 109-119.
70. Ozsoy, N., Mimaroglu, A., Ozsoy, M., and Ozsoy, M. I. (2015), Comparison of Mechanical Behaviour of Carbon and Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta Physica Polonica A*, 127FF(4), 1032-1034.
71. Aleksendric, D., Carlone, P., and Cirovic, V. (2016), Optimization of the Temperature Time Curve for the Curing Process of Thermoset Matrix Composites. *Applied Composite Materials*, 23, 1047-1063.
72. Lahuerta, F., Nijssen, R. P. L., Meer, F. P., and Sluys, L. J. (2017), The Influence of Curing Cycle and Through Thickness Variability of Properties in Thick Laminates. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 563-575.
73. Dessenberger, R. B., and Tucker, C. L. (1998), Forming Limit Measurements for Random Fiber Mats. *Polymer Composites*, 19(4), 370-376.
74. Hart-Smith, L. J. (1998), Predictions of the Original and Truncated Maximum Strain Failure Models for Certain Fibrous Composite Laminates. *Composites Science and Technology*, 58, 1151-1178.
75. Belingardi, G., Beyene, A.T., and Jichuan, D. (2016), Energy Absorbing Capability of GMT, GMTEX and GMT-UD Composite Panels for Static and Dynamic Loading: Experimental and Numerical Study. *Composite Structures*, 143, 371-387.
76. Barburski, M., Lomov, S. V., Vanclooster, K., and Verpoest, I. (2013), Drapeability of Glass and Steel Fibres Knitted Fabrics. *19th International Conference on Composite Materials*, Shanghai/China.
77. Akduman, C., Özgüney, I., and Akcakoca-Kumbasar, E. P. (2016), Preparation and Characterization of Naproxen Loaded Electrospun Thermoplastic Polyurethane Nanofibers as a Drug Delivery System. *Materials Science and Engineering C*, 64, 383-390.
78. Palanikumar, K., Srinivasan, T., Sailesh, A., and Rajagopal, K. (2016), Strength Validation and Morphological Studies of Glass Fiber Reinforced with Polypropylene Matrix (GFR/PP) Composites, *Environment, Energy and Earth Sciences*, 423-429.
79. Ucsular, I., Zor, M., and Sayman, O. (2012), The Influence of Distinct Fiber Arrangement on the Thermo Mechanical Behavior of Steel Fiber Reinforced Thermoplastic Matrix Composites. *Composites Part B: Engineering*, 43, 1914-1918.
80. Schommer, D., Duhovic, M., and Hausmann, J. (2015), Modeling Non-Isothermal Thermoforming of Fabric Reinforced Thermoplastic Composites. *10th European Ls-Dyna Conference*, Würzburg/Germany.
81. Celebi, H., Bayram, G., and Dogan, A. (2016), Influence of Zinc Oxide on Thermoplastic Elastomer Based Composites: Synthesis, Processing, Structural, and Thermal Characterization. *Polymer Composites*, 37(8), 2369-2376.

82. Hofstee, J., and Keulen, F., (2000), 3-D Geometric Modeling of a Draped Woven Fabric. *Composite Structures*, 54(2-3), 179-195.
83. Mohammed, U., Lekakou, C., and Bader, M. G. (2000), Experimental Studies and Analysis of the Draping of Woven Fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(12), 1409-1420.
84. Wang, W., Lowe, A., and Kalyanasundaram, S. (2013), A Study on Continuous Flax Fibre Reinforced Polypropylene Composite in Stamp Forming Process. *Advanced Composites Letters*, 22(4), 86-89.
85. Wang, W., Lowe, A., and Kalyanasundaram, S. (2016), Investigating the Forming Limits of a Flax Fibre Reinforced Polypropylene Composite in Different Water Treatment Conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 103-113.
86. Lee, J. H. (2002), An Analysis of Stretch Forming of Thermoplastic Composites. *Polymer Composites*, 23(3), 442-453.
87. Xu, H., and Evers, P. T. (2017), Lightweight Reinforced Thermoplastic Composites with Improved formability. *17th Annual SPE Automotive Composites Conference & Exhibition*, Michigan/United States.
88. Takano, N., Ohnishi, Y., Nishiyabu, K., and Zako, M. (2001), Deep Drawing Simulation of Knitted Fabric Reinforced Thermoplastics by Homogenization Theory and Experimental Verification. *Journal of the Society of Materials Science*, 50(5), 461-467.
89. Nurul-Fazita, M. R., Jayaraman, K., and Bhattacharyya, D. (2016), Formability Analysis of Bamboo Fabric Reinforced Poly (Lactic) Acid Composites. *Materials*, 9(539), 1-19.
90. Wang, W., Lowe, A., Davey, S., Zanjani, N. A., and Kalyanasundaram, S. (2015), Establishing a New Forming Limit Curve for a Flax Fibre Reinforced Polypropylene Composite through Stretch Forming Experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 114-123.
91. Conte, R., Ambrogio, G., Pulice, D., Gagliardi, F., and Filice, L. (2017), Incremental Sheet Forming of a Composite Made of Thermoplastic Matrix and Glass Fiber Reinforcement. *Procedia Engineering*, 207, 819-824.
92. Erdoğan, E. S., and Ekşi, O. (2014), Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds. *Journal of Mechanical Engineering*, 60(3), 195-202.
93. Broutman, L. J., Kalpakjian S., and Chawla, J. (1972), Deep Drawability of Biaxially Rolled Thermoplastic Sheets. *Polymer Engineering and Science*, 12(2), 150-156.
94. Pede, S., and Woodhams, R. T. (1990), Deep Drawing Self Reinforced Thermoplastic Sheet. *Polymer Engineering and Science*, 30(79), 1185-1199.

95. Cabrera, N. O., Reynolds, C. T., Alcock, B., and Peijs, T. (2008), Non-Isothermal Stamp Forming of Continuous Tape Reinforced All-Polypropylene Composite Sheet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 1455-1466.
96. Akkerman, R., Haanappel, S. P., and Sachs, U. (2018), History and Future of Composites Forming Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 406, 012003.
97. Alcock, B., Cabrera, N. O., Barkoula, N. M., and Peijs, T. (2009), Direct Forming of All-Polypropylene Composites Products from Fabrics Made of Co-Extruded Tapes. *Applied Composite Materials*, 16, 117-134.
98. Zanjani, N. A., and Kalyanasundaram, S. (2012), An Investigation on the Effect of Aspect Ratio Variations on Induced Deformation Modes of Self Reinforced Polypropylene Composite at Room Temperature. *15th European Conference on Composite Materials*, Venice/Italy.
99. Zanjani, N. A., Sexton, A., and Kalyanasundaram, S. (2015), Induced Forming Modes in a Pre-Consolidated Woven Polypropylene Composite during Stretch Forming Process at Room Temperature: I. Experimental Studies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 251-263.
100. Rosa-Sainz, A., Centeno, G., Silva, M. B., Lopez-Fernandez, J. A., Martinez-Donaire, A. J., and Vallellano, C. (2020), On the Determination of Forming Limits in Polycarbonate Sheets. *Materials*, 13(928), 1-18.
101. Keane, M. A., Mulhern, M. B., and Mallon, P. J. (1995), Investigation of the Effects of Varying the Processing Parameters in Diaphragm Forming of Advanced Thermoplastic Composite Laminates. *Composites Manufacturing Volume*, 6(3-4), 145-152.
102. Morris, S. R., and Sunt, C. T. (1996), Analysis of Forming Loads for Thermoplastic Composite Laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27A, 633-640.
103. Jain, L. K., Hou, M., Ye, L., and Mai, Y. W. (1998), Spring-In Study of the Aileron Rib Manufactured from Advanced Thermoplastic Composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29A, 973-979.
104. Hwang, S. F., and Hwang, K. J. (2002), Stamp Forming of Locally Heated Thermoplastic Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(5), 669-676.
105. Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M., and Kalyanasundaram, S. (2005), The Effect of Process Temperature on the Formability of Polypropylene Based Fibre Metal Laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 1158-1166.
106. Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M., and Kalyanasundaram, S. (2006), Stamp Forming of Polypropylene Based Fibre Metal Laminates: The Effect of Process Variables on Formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 163-168.

107. Mc-Cool, R., Murphy, A., Wilson, R., Jiang, Z., Price, M., Butterfield, J., and Hornsby, P. (2012), Thermoforming Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 226(2), 91-102.
108. Jamin, T., Dube, M., and Lebel, L. L. (2014), Stamp Forming of Thermoplastic Composites: Effect of Radius and Thickness on Part Quality. *16th European Conference on Composite Materials*, Seville/Spain.
109. Zal, V., Naeini, H. M., Bahramian, A. R., and Sinke, J. (2017), Investigation of the Effect of Temperature and Layup on the Press Forming of Polyvinyl Chloride Based Composite Laminates and Fiber Metal Laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 207-217.
110. Boucher, D. T., and Champagne, M. F. (2018), Stamping of High Performance Thermoplastic Composite Intrusion Beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 418, 012127.
111. Hou, M., and Friedrich, K. (1994), 3-D Stamp Forming of Thermoplastic Matrix Composites. *Applied Composite Materials*, 1, 135-153.
112. Hou, M. (1996), Stamp Forming of Fabric Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymer Composites*, 17(4), 596-603.
113. Dessenberger, R. B., and Tucker, C. L. (2001), Ideal Forming Analysis for Random Fiber Preforms. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(1), 1-23.
114. Bhattacharyya, D., Bowis, M., and Jayaraman, K. (2003), Thermoforming Wood Fibre Polypropylene Composite Sheets. *Composites Science and Technology*, 63, 353-365.
115. Sadighi, M., Rabizadeh, E., and Kermansaravi, F. (2008), Effects of Laminate Sequencing on Thermoforming of Thermoplastic Matrix Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 725-730.
116. Vanclooster, K., Lomov, S. V., and Verpoest, I. (2009), On the formability of Multi-Layered Fabric Composites. *17th International Conferences on Composite Materials*, Edinburgh/United Kingdom.
117. Cherouat, A. and Borouchaki, H. (2009), Present State of the Art of Composite Fabric Forming: Geometrical and Mechanical Approaches. *Materials*, 2, 1835-1857.
118. Davey, S., Cantwell, W., Das, R., and Kalyanasundaram, S. (2012), Investigation into the formability of Carbon Fibre/Polyether Ether Ketone Composite Sheets in Stamp Forming Processes. *15th European Conference on Composite Materials*, Venice/Italy.
119. Zhang, Q., Cai, J., and Gao, Q. (2014), Simulation and Experimental Study on Thermal Deep Drawing of Carbon Fiber Woven Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 802-810.

120. Zheng, B., Gao, X., Li, M., Deng, T., Huang, Z., Zhou, H., and Li, D. (2019), Formability and Failure Mechanisms of Woven CF/PEEK Composite Sheet in Solid State Thermoforming. *Polymers*, 11(966), 1-17.
121. Lamers, E. A. D., Akkerman, R., and Wijskamp, S. (2001), Fibre Orientation Modelling for Rubber Press Forming of Thermoplastic Laminates. *International Journal of Forming Processes*, 6(3-4), 443-463.
122. Lamers, E. A. D., Akkerman R., and Wijskamp, S. (2002), Drape Modelling of Multi-Layer Fabric Reinforced Thermoplastic Laminates. *6th International Conference on Textile Composites*, Philadelphia/United States.
123. Lamers, E. A. D., Wijskamp, S., and Akkerman, R. (2003), Drape Modelling of Multi-Layered Composites. *6th International Esaform Conference on Material Forming*, Salerno/Italy.
124. Arnold, S. E., Sutcliffe, M. P. F., and Oram, W. L. A. (2016), Experimental Measurement of Wrinkle Formation during Draping of Non-Crimp Fabric. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 159-169.
125. Shirani, M., Agahi, A., Sadough, S. A., and Biglari, F. R. (2006), Experimental Study of Thermoplastic Reinforced Composite Sheet Deep Drawing. *Materiaux*, Dijon/France.
126. Harrison, P., Gomes, R., and Curado-Correia, N. (2013), Press Forming a 0/90 Cross Ply Advanced Thermoplastic Composite Using the Double Dome Benchmark Geometry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 54, 56-69.
127. Talapatra, A., Agarwal, S. K., Pandit, S., Sengupta, A. and Saha, J. (2014), Formability Characterization of Composite Sheet Materials by Erichsen Cupping Testing Method. *International Conference on Materials and Characterization Techniques*, 6(3), 1883-1886.
128. Suresh, S., and Kumar, V. S. S. (2018), Investigation on Influence of Stamp Forming Parameters on Formability of Thermoplastic Composite. *Polimeros*, 28(5), 422-432.
129. Viisainen, V., Zhou, J., and Sutcliffe, M. (2019), Development of a Composite Forming Limit Diagram: A Feasibility Study. *22nd International Conference on Composite Materials*, Melbourne/Australia.
130. O'Bradaigh, C. M., and Pipes, R. B. (1991), Issues in Diaphragm Forming of Advanced Thermoplastic Composites. *Polymer Composites*, 12(4), 246-256.
131. Mc-Guinness, G. B., and O'Bradaigh, C. M. (1995), Effect of Preform Shape on Buckling of Quasi-Isotropic Thermoplastic Composite Laminates during Sheet Forming. *Composites Manufacturing*, 6(3-4), 269-280.
132. Hou, M., and Friedrich, K. (1998), Adjustable Forming of Thermoplastic Composites for Orthopaedic Applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 9, 83-88.



133. Thomann, U. I., and Ermanni, P. (2004), The Influence of Yarn Structure and Processing Conditions on the Laminate Quality of Stampformed Carbon and Thermoplastic Polymer Fiber Commingled Yarns. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17, 259-282.
134. Pillay, S., Vaidya, U. K., and Janowski, G. M. (2005), Liquid Molding of Carbon Fabric Reinforced Nylon Matrix Composite Laminates. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18, 509-527.
135. Wakeman, M. D., Blanchard, P., and Manson, J. A. E. (2005), Void Evolution during Stamp Forming of Thermoplastic Composites. *15th International Conference on Composite Materials*, Durban/South Africa.
136. Hsiao, S. W., and Kikuchi, N. (1999), Numerical Analysis and Optimal Design of Composite Thermoforming Process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177, 1-34.
137. Skordos, A. A., and Sutcliffe, M. P. F. (2008), Stochastic Simulation of Woven Composites Forming. *Composites Science and Technology*, 68, 283-296.
138. Thijsse, R. H. W., and Akkerman, R. (2009), A Multi-Layer Triangular Membrane Finite Element for the Forming Simulation of Laminated Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 739-753.
139. Nishi, M., and Hirashima, T. (2015), Forming Simulation of Textile Composites Using Ls-Dyna. *10th European Ls-Dyna Conference*, Würzburg/Germany.
140. Xiong, H., Hamila, N., and Boisse, P. (2019), Consolidation Modeling During Thermoforming of Thermoplastic Composite Prepregs. *Materials*, 12, 2853.
141. Cherouat, A., and Billoet, J. L. (2001), Mechanical and Numerical Modelling of Composite Manufacturing Processes Deep Drawing and Laying-Up of Thin Pre-impregnated Woven Fabrics. *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 460-471.
142. Barbagallo, G., Madeo, A., Morestin, F., and Boisse, P. (2017), Modelling the Deep Drawing of a 3-D Woven Fabric with a Second Gradient Model. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 22(11), 2165-2179.
143. Chen, Q., Boisse, P., Park, C. H., Saouab, A., and Breard, J. (2011), Intra/Inter-Ply Shear Behaviors of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites in Thermoforming Processes. *Composite Structures*, 93, 1692-1703.
144. Davey, S., Das, R., Cantwell, W. J., and Kalyanasundaram, S. (2013), Forming Studies of Carbon Fibre Composite Sheets in Dome Forming Processes. *Composite Structures*, 97, 310-316.
145. Haanappel, S. P., Thijsse, R. H. W., Sachs, U., Rietman, B., and Akkerman, R. (2014), Formability Analyses of Uni-Directional and Textile Reinforced Thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56, 80-92.

146. Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M., and Kalyanasundaram, S. (2006), The Development of a Finite Element Model for Simulating the Stamp Forming of Fibre Metal Laminates. *Composite Structures*, 75, 298-304.
147. Zal, V., Naeini, H. M., Sinke, J., Bahramian, A. R., Abouhamzeh, M., and Benedictus, R. (2017), A New Procedure for Finite Element Simulation of Forming Process of Non-Homogeneous Composite Laminates and FMLs. *Composite Structures*, 163, 444-453.
148. Sexton, A., Venkatesan, S., Cantwell, W., and Kalyanasundaram, S. (2012), Experimental and Numerical Characterisation of the out of Plane Stretch Forming of a Fibre Metal Laminate Based on a Self Reinforced Polypropylene Composite. *15th European Conference on Composite Materials*, Venice/Italy.
149. Rajabi, A., Kadkhodayan, M., Manoochehri, M., and Farjadfar, R. (2015), Deep Drawing of Thermoplastic Metal Composite Structures: Experimental Investigations, Statistical Analyses and Finite Element Modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 159-170.
150. Rajabi, A., Kadkhodayan, M., and Ghanei, S. (2017), An Investigation into the Flexural and Drawing Behaviors of GFRP Based Fiber Metal Laminate. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 25(10), 805-812.
151. Harhash, M., Carrado, A., and Palkowski, H. (2014), Forming Limit Diagram of Steel/Polymer/Steel Sandwich Systems for the Automotive Industry. *Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications*, 243-254.
152. Nestler, D., Trautmann, M., Zopp, C., Tröltzsch, J., Osiecki, T., Nendel, S., Wagner, G., and Kroll, L. (2017), Continuous Film Stacking and Thermoforming Process for Hybrid CFRP/Aluminum Laminates. *Procedia CIRP*, 66, 107-112.
153. Reyes, G., and Kang, H. (2007), Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber Metal Laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 284-290.
154. Saadatfard, A., Gerdooei, M., and Aghchai, A. J. (2018), Drawing Potential of Fiber Metal Laminates in Hydromechanical Forming: A Numerical and Experimental Study. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 0(0), 1-18.
155. ISO-527/4. (1997), Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre Reinforced Plastic Composites.
156. ISO-14126. (1999), Fibre Reinforced Plastic Composites, Determination of Compressive Properties in the In-Plane Direction.
157. Meyers, M. A., and Chawla, K. K. (2009), *Mechanical Behavior of Materials*. (2<sup>nd</sup> edition). New York: Cambridge University Press.
158. ISO-179/1. (2010), Plastics - Determination of Charpy Impact Properties - Part 1: Non-Instrumented Impact Test.
159. ISO-14130. (1997), Fibre Reinforced Plastic Composites: Determination of Apparent Interlaminar Shear Strength by Short Beam Method.

160. İnternet: UL Thermoplastics Testing Center. (2015), *Performance Materials Electronics Brochure*. Erişim: <https://www.ulttc.com/en/industries/automobil.html>
161. ISO-11357/1. (2016), *Plastics - Differential Scanning Calorimetry (DSC) - Part 1: General Principles*.
162. ISO-11358/1. (2014), *Plastics - Thermogravimetry (TG) of Polymers - Part 1: General Principles*.
163. ISO-75/1. (2020), *Plastics - Determination of Temperature of Deflection under Load - Part 1: General Test Method*.
164. Grellmann, W., and Seidler, S. (2011), *Kunsts Toffprüfung Carl Hanser Verlag* (2nd edition), Vienna: Hanser Library.
165. ISO-306. (2013), *Plastics - Thermoplastic Materials - Determination of Vicat Softening Temperature (VST)*.
166. ISO-12004/2. (2008), *Metallic Materials - Sheet and Strip - Determination of Forming Limit Curves - Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory*.
167. Sexton, A. (2014), *Stretch Forming of Thermoplastic Fibre Metal Laminates*. PhD Thesis, Australian National University, Canberra.
168. Schmidt, F. M., Le-Maoult, Y., And Monteix, S. (2003), Modelling of Infrared Heating of Thermoplastic Sheet Used in Thermoforming Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 225-231.
169. İnternet: Panzera, P. (2014), *Advanced Composite Material (Chapter 7), Federal Aviation Administration*. Erişim: [https://www.researchgate.net/profile/Mahesh\\_Nagarkar/post/Is\\_there\\_any\\_requirement\\_of\\_finish\\_of\\_fibres\\_such\\_as\\_carbon\\_Kevalr\\_in\\_the\\_aerospace\\_industry/attachment/5a6750c9b53d2f0bba4d3b6e/AS%3A585981686202368%401516720329177/download/ama\\_ch07.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mahesh_Nagarkar/post/Is_there_any_requirement_of_finish_of_fibres_such_as_carbon_Kevalr_in_the_aerospace_industry/attachment/5a6750c9b53d2f0bba4d3b6e/AS%3A585981686202368%401516720329177/download/ama_ch07.pdf)
170. Dykes, R. J., Mander, S. J., and Bhattacharyya, D. (2000), Roll Forming Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Sheets: Experimental Analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 1395-1407.
171. Sun, G., Zhang, W., Wang, Z., Yin, H., Zheng, G., and Li, Q. (2020), A Novel Specimen Design to Establish the Forming Limit Diagram (FLD) for GFRP through Stamping Test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130, 105737.
172. Marciniak, Z., Duncan, J. L., and Hu, S. J. (2002), *Mechanics of Sheet Metal Forming*, (2<sup>nd</sup> edition). Oxford: Butterworth-Heinemann Press, 128.
173. Santos, P. A., Spinace, M. A. S., Fermoselli, K. K. G., and De-Paoli, M. A. (2007), Polyamide-6/Vegetal Fiber Composite Prepared by Extrusion and Injection Molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2404-2411.

174. Bouafif, H., Koubaa, A., Perre, P., and Cloutier, A. (2010), Effects of Composite Processing Methods on Wood Particle Development and Length Distribution: Consequences on Mechanical Properties of Wood Thermoplastic Composites. *Wood and Fiber Science*, 42(1), 62-70.
175. Heaney, D. F. (2012), Moulding of Components in Metal Injection Moulding, D. F. Heaney. *Handbook of Metal Injection Moulding* (109-132) Cambridge: Woodhead Publishing.
176. Rahiminejad, D., and Compston, P. (2020), The Effect of Pre-Heat Temperature on The Formability of a Glass Fibre Polypropylene and Steel Based Fibre Metal Laminate. *International Journal of Material Forming*, 0, 1-13.
177. Harhash, M., Carrado, A., and Palkowski, H. (2014), Forming Limit Diagram of Steel Polymer Steel Sandwich Systems for the Automotive Industry. T. Sano, T. S. Srivatsan and M. W. Peretti, *Advanced Composites For Aerospace, Marine and Land Applications* (143-254) John Wiley & Sons Incorporated.
178. Hwang, S. F., and Hwang, K. J. (2002), Stamp Forming of Locally Heated Thermoplastic Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(5), 669-676.
179. Abir, M. R., Tay, T. E., and Lee, H. P. (2019), On the Improved Ballistic Performance of Bio-Inspired Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 123, 59-70.
180. Rahman, R., Hamdan, S., Hashim, D. M. A., Islam, S., and Takagi, H. (2015), Bamboo Fiber Polypropylene Composites: Effect of Fiber Treatment And Nano Clay on Mechanical and Thermal Properties. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 21, 253-258.
181. Wakeman, M. D., Zingraff, L., Bourban, P. E., Manson, J. A. E., And Blanchard, P. (2006), Stamp Forming of Carbon Fibre/PA12 Composites: A Comparison of a Reactive Impregnation Process and a Commingled Yarn System. *Composites Science and Technology*, 66(1), 19-35.
182. Avila, A. F., and Jabbur, F. G. (2005), Sheet Forming Studies using Low cost Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18, 5-22.
183. Wang, Z., Zhang, W., Luo, Q., Zheng, G., Li, Q., and Sun, G. (2020), A Novel Failure Criterion Based Upon Forming Limit Curve for Thermoplastic Composites. *Composites Part B: Engineering*, 108320.
184. Şanay, B., ve Kaftanoğlu, B. (2011), Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 12(1), 18-27.



*GAZİ GELECEKTİR..*