



T. C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENDİNDEN TAKVİYELİ POLİPROPİLEN ESASLI TERMOPLASTİK
KOMPOZİT LEVHALARDA DELİK ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ

Orhan KURTULUŞ

Doç.Dr. Murat YAZICI

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bursa- 2017

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Orhan KURTULUŞ tarafından hazırlanan ‘Kendinden takviyeli polipropilen esaslı termoplastik kompozit levhalarda delik etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr.Murat YAZICI

Üye: Doç.Dr. Murat YAZICI
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği

imza

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
Bursa Teknik Üniversitesi
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği

imza

Üye: Doç. Dr. Hande GÜLER
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği

imza

Yukarıdaki Sonucu Onaylarım

Prof. Dr. AYBAYRAM
Epstittü Müdürü

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim

03/05/2017

Orhan KURTULUŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KENDİNDEN TAKVİYELİ POLİPROPİLEN ESASLI TERMOPLASTİK KOMPOZİT LEVHALARDA DELİK ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Orhan KURTULUŞ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Murat YAZICI

Otomotiv endüstrisi için ağırlık azaltma çalışmalarına yönelik yapılan araştırmalar son yıllarda kompozit malzemeleri ön plana çıkarmıştır. CO₂ salınımına getirilen yasal sınırlamalar nedeniyle özellikle otomotiv endüstrisinde özgül mukavemet, şekil verilebilirlik, hafiflik ve geri dönüşüm yetenekleri ile ağırlık azaltmak ve gerekli mekanik özellikleri karşılamak amacıyla termoplastik matrisli kompozitler kullanılmaya başlamıştır. Kendinden takviyeli termoplastik kompozitler ise %100 geri dönüşüm yeteneği ve darbe dayanımlarının yüksek olması nedeniyle, kompozit malzemelerin özel bir alanını oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında, laminasyon yöntemiyle üretilmiş kendinden takviyeli polipropilen esaslı termoplastik kompozit plakaların çekme ve kayma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra delik etkisini incelemek için, kompozit plakalara ASTM standardına göre delik açılmış ve çekme deneyleri tekrarlanmıştır. Deney sonuçlarını incelemek ve kıyaslamak için Abaqus yazılımında kompozit plakaların analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendinden Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemeler, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Delik Etkisi, Mekanik Özellikler,

2017, ix + 77 sayfa.

ABSTRACT

Msc Thesis

EXPERIMENTAL and NUMERICAL INVESTIGATION of THE OPEN-HOLE EFFECT on SELF REINFORCED POLYPROPYLENE BASED THERMOPLASTIC COMPOSITE LAMINATES.

Orhan KURTULUŞ

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Murat YAZICI

Researches on weight reduction for the automotive industry have been focused on composite materials in recent years. Due to the legal restrictions on CO₂ emissions, thermoplastic matrix composites are now being used especially in the automotive industry to reduce weight with specific strength, formability, lightness and recycling capabilities and to meet the required mechanical features. Self-reinforced thermoplastic composites constitute a special area of composite materials thanks to their 100% recyclability and high resistance against impact conditions. In this thesis paper, tensile and shear tests were conducted for self-reinforced polypropylene based thermoplastic composite plates produced by lamination method. Then, the composite plates were drilled according to the ASTM standard in order to determine the open hole-effect and the tensile tests were repeated. Composite plates were analyzed in Abaqus software in order to examine and compare the results of the experiments.

Key Words: Self Reinforced Thermoplastic Composite Materials, Finite Element Method, Open-Hole Effect, Mechanical Properties

2017, ix + 77 Pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca hiçbir desteğini benden esirgemeyen aileme, dünyaya gelerek varlığıyla hayatıma yeni bir anlam kazandıran kızım Bilge'ye, tez çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan ve akademik katkılarıyla bana yön veren değerli hocam Doç. Dr. Murat Yazıcı'ya, Arş. Gör. Hakkı Özer, Arş. Gör. İ. Kürşad Kandırmış, Harun Güçlü'ye, yüksek lisans sürecimde gerekli hassasiyeti göstererek çalışmalarına imkân veren ve her türlü teknik desteği sağlayan Rollmech Automotive Anonim Şirketi'ne, Maysan Mando Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Orhan KURTULUŞ

03/05/2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	6
2.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	6
2.1.2. Uygulama Alanları.....	8
2.1.2.1. Havacılık Sektörü.....	9
2.1.2.2 Otomotiv Sektörü.....	9
2.1.2.3. İnşaat Sektörü.....	10
2.1.2.4 Denizcilik Sektörü.....	10
2.1.2.5 Elektrik-Elektronik Sektörü.....	10
2.1.2.6. Spor Araç ve Gereçleri.....	11
2.1.2.7 Sağlık Sektörü.....	11
2.1.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	11
2.1.3.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	11
2.1.3.2. Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	16
2.1.3.3. Yüksek Performanslı Kompozit Üretimi.....	17
2.1.4. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri.....	18
2.1.4.1. Matris Malzemeleri.....	19
2.1.4.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları.....	20
2.2. Termoplastik Kompozitler.....	23
2.2.1. Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	24
2.2.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	26
2.2.3. Termoplastik Kompozitlerin Üretim Metotları.....	26
2.2.3.1. Fiberlerin İşlenmesi.....	27
2.2.3.2. Fiber ile Matrisin Birleşimi.....	28
2.2.3.3. Şekillendirme Teknikleri.....	30
2.2.3.4. Termoplastik Kompozitlerin Tezgâh ile İşlenmesi.....	34
2.2.3.5. Yeniden İşlenebilirlik.....	345
2.3. Kendinden takviyeli (self-reinforced) kompozitler.....	35
2.3.1.Kendinden Takviyeli (Self-Reinforced) Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	36
2.3.2. Kendinden Takviyeli (Self-Reinforced) Kompozitlerin Üretimi.....	37
2.3.2.1 Sıcak Presleme.....	37
2.3.2.2 Koekstrüzyon Prosesi.....	37
2.4. Kompozit malzemelerde delik (open-hole) etkisi.....	38
2.5. Sonlu elemanlar yöntemi.....	38
2.5.1. Sonlu Elemanlar Modeli Hazırlama.....	41

3. MATERYAL VE YÖNTEM	44
3.1 Deneysel Yöntem	44
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	49
3.2.1. Delikli Çekme Testi için Ön İşlem Adımları	49
3.2.2. Delikli Çekme Testi için Ağ Yapısı	53
4. BULGULAR	55
4.1. Deneysel Sonuçlar	55
4.2. Sonlu Elemanlar Sonuçları	60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	76



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil2.1. Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması.....	7
Şekil2.2. El yatırma yöntemi	12
Şekil2.3. Püskürtme yöntemi.....	13
Şekil2.4. Profil çekme yöntemi üretim şeması	13
Şekil2.5. Elyaf sarma yöntemi	14
Şekil2.6. RTM yöntemi	15
Şekil2.7. Toz metalürjisi yöntemi üretim şeması.....	16
Şekil2.8. Yüksek performanslı kompozit üretim şeması.....	18
Şekil2.9. Plastik kompozit malzemelerin işleme tekniklerini sınıflandırılması.....	27
Şekil2.10. Toz kaplama yöntemi.....	29
Şekil2.11. Enjeksiyon kalıplama sistemleri: A.Plunger (dalma pistonlu) tip, B. Reciprotating (ileri-geri çalışmalı) vidalı tip.....	31
Şekil2.12. Reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (RIM)	32
Şekil2.13. Plastik şişe üretilen bir şişirme prosesi.....	33
Şekil2.14 Ekstruder şeması.....	34
Şekil2.15. Sıcak presleme prosesi	37
Şekil2.16. Bazı sonlu elemanlar uygulamaları.....	40
Şekil2.17. Sonlu elemanlar ile modelleme örnekleri	42
Şekil3.1. Katmanları 6, 9 ve 12 olan kendinden takviyeli pp termoplastik kompozit malzemeler.....	45
Sekil3.2. Çekme Cihazı.....	46
Sekil3.3. Katmanları 6, 9 ve 12 olan çekme test numuneleri.....	47

Şekil3.4.	Teste hazır delikli çekme numunesi.....	47
Şekil3.5.	Katmanları 6, 9, 12 olan kayma test numuneleri.....	48
Şekil3.6.	Kayma test aparatı.....	49
Şekil3.7.	Delikli çekme testi numunesi.....	50
Şekil3.8.	Çekme testi için kompozit kesit tanımlanması.....	51
Şekil3.9.	12 katmanlı delikli çekme numunesi.....	52
Şekil3.10.	Üst Bölge Sınır Şartı Bağlantısı.....	52
Şekil3.11.	Delikli çekme numunesi için sınır şartları.....	53
Şekil3.12.	Delikli çekme numunesi ağ yapısı.....	53
Şekil4.1.	Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin çekme deney sonuçları.....	55
Şekil4.2.	Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin standart çekme deney sonuçları	56
Şekil4.3.	Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin standart çekme deney sonuçları.....	56
Şekil4.4.	Kendinden takviyeli 6,9 ve 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin delikli çekme deney sonuçları	57
Şekil4.5.	Delikli çekme deneyi kırılma esnasında gerilme yığılması bölgeleri ve malzeme davranışı.....	58
Şekil4.6.	Delikli çekme deneyi kırılma esnasında gerilme yığılması bölgeleri ve malzeme davranışı.....	59
Şekil4.7.	Kendinden takviyeli 9 ve 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin kayma deney sonuçları.....	59
Şekil4.8.	Kendinden takviyeli Pp kompozit malzemelerin kayma deneyi esnasında şekil değişimleri	60
Şekil4.9.	Çekme yönündeki nominal gerilme dağılımı.....	61
Şekil4.10.	Çekme yönündeki logaritmik gerilme dağılımı.....	61
Şekil4.11.	12 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu	62
Şekil4.12.	12 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri..	62
Şekil4.13.	12 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu....	63

Şekil4.14.	12 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri..	63
Şekil4.15.	9 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz sonucu.....	64
Şekil4.16.	9 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz değerleri...	64
Şekil4.17.	9 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu.....	65
Şekil4.18.	9 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri...	65
Şekil4.19.	9 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu.....	66
Şekil4.20.	9 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri...	66
Şekil4.21.	6 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz sonucu.....	67
Şekil4.22.	6 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz değerleri...	67
Şekil4.23.	6 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu.....	68
Şekil4.24.	6 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri...	68
Şekil4.25.	6 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu.....	69
Şekil4.26.	6 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri...	69
Şekil4.27.	Deney sonuçları ve FEM sonuçlarının karşılaştırılması.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge2.1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	8
Çizelge2.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları	9
Çizelge2.3. Kompozit üretim yöntemlerinin bazı açılardan karşılaştırılması.....	18
Çizelge2.4. Genel amaçlı plastiklerin bazı özellikleri.....	24
Çizelge2.5. Mühendislik amaçlı plastiklerin bazı özellikleri.....	25
Çizelge2.6. Termoplastik reçineler erime ve işlem sıcaklıkları.....	26
Çizelge3.1. Polipropilen malzemenin mekanik özellikleri.....	44
Çizelge4.1. Katman sayısı 6 olan kompozit malzemenin analiz sonuçlarının karşılaştırılması	70

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde, müşteri talepleri ve yasal zorunluluklar birçok Araştırma-Geliştirme (AR-GE) faaliyetine yön vermiştir. Ürün kalitesi, fiyat, güvenlik ve performans gibi müşteri memnuniyetini etkileyen unsurlar endüstride rekabet ortamı oluşturmuştur. Dolayısıyla otomobil üreticilerinin temel hedefi kaliteli ürünü uygun maliyetlerde ve beklenen sürelerde üretmek olmuştur.

Yasal olarak karbon salınımına getirilen sınırlamalar neticesinde de otomobil üreticilerinin AR-GE faaliyetlerinin büyük kısmını ağırlık azaltma çalışmaları oluşturmaktadır. Ağırlık azaltma çalışmalarındaki amaç, CO₂ emisyonlarını azaltmakla birlikte aynı zamanda yakıt tasarrufu sağlamak olmuştur. Fakat araç ağırlığını azaltırken dikkate alınması gereken uluslararası standartlar aracın yolcu ve yaya güvenliğini riske atmaması gerektiğini belirtmektedir. Bu bağlamda otomobil üreticileri daha hafif ve dayanıklı yeni malzemelere yönelmişlerdir. Burada hafiflik, yüksek dayanım, üstün kimyasal ve mekanik özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler devreye girmiştir.

Kompozit malzemeler matris ve fiber adı verilen iki fazdan oluşmaktadırlar. Hedeflenen ürünün mekanik ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak öngörülen matris fiber karışımı, belirli oranda ve belirli fiziki düzende uygun metotlarla işlenerek kompozit yapı olarak üretilmektedirler. Fiberler kompozit malzemenin mukavemetinde belirleyici rol oynarlar. Matrisler malzemeler ise fiberlerin belirli bir düzende durması ve kompozit yapıya dışarıdan gelen yükleri fiberlerin üzerine dengeli şekilde dağıtma görevini üstlenirler.

Günümüzde klasik kompozitlere göre içinde daha elverişli özellikler barındıran kendinden takviyeli, yani matris ve fiber malzemesi aynı olan termoplastik kompozit yapılar ön plana çıkmıştır. Yüksek darbe dayanımı, şekil verilebilirlik, %100 geri dönüşüm yeteneği ve özgül mukavemetinin yüksek olması nedeniyle kendinden takviyeli termoplastik kompozitler otomotiv sektörü AR-GE faaliyetlerinde yüksek talep görmektedir.

Kompozit ürünlerde, elemanların birbirleriyle bağlantısını sağlamak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bağlantı için ürüne delik açılması zorunlu olan

durumlarda, yükleme koşulları altında delik çevresinde oluşan gerilme ygılması kritik hale gelmektedir. Yapılan alımalar sonucunda delik çevresinde oluşan gerilme ygılmasının ürünü hasara urattıı görülmüştür. Kompozit malzemelerde delik etkisinin incelenmesi bu etkinin verdiği hasarın nlenmesi AR-GE çalışmalarında güncelliğini korumaktadır.

Bu tez kapsamında laminasyon metoduyla üretilmiş 6,9 ve 12 katmanlı olmak üzere  farklı geometride, kendinden takviyeli polipropilen esaslı termoplastik malzeme, çekme ve kayma numuneleri üzerinde çalışılmıştır. Numuneler deney standartlarında verilen ölçülere göre temin edilmiştir. Çekme deneyleri delikli ve deliksiz, kayma deneyleri de deliksiz kendinden takviyeli kompozit malzemelere uygulanarak, mekanik özellikler tespit edilmiş ve delik etkisi incelenmiştir. Ayrıca malzemelerin Abaqus yazılımıyla analizleri yapılarak, test ve analiz sonuçları karılatırılmıtır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Seo ve ark. (2000) PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin elyaf malzemeleri ile arasında oluşan bağı güçlendirmek amacıyla çalışma yapmıştır. Çalışmada izotaktik polipropilen İPP ve maleik anhidrid ile güçlendirilmiş polipropilen MA-PP hidrojen bağlanması açısından karşılaştırılmıştır. İPP malzemesi ile az miktarda karıştırılmış MA-PP iki malzemenin yapısal farklılıklardan dolayı etkileşim zincirine sebep olmaktadır. İPP eriyiği içerisinde (%0,2) oranında MA-PP eklenmesi sonucunda homojen çekirdeklenmesinin azalmasına yol açmakta ve etkili çekirdeklerin sayısını arttırdığı görülmektedir. İPP fazında MA-PP nin bir çekirdeklendirici bağlantı gibi hareket ettiği anlamına gelmektedir.

Morgan ve ark. (2009) tarafından yapılan araştırmalara göre otomotiv, havacılık ve inşaat sektörleri başta olmak üzere diğer sektörlerin de talepleri doğrultusunda polimer kompozitler özellikle termoplastikler yaygın hale gelmektedir. Bu eğilim, yüksek mukavemetli çelikler gibi daha geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, polimer kompozitlerin minimal ağırlık ve yüksek performans özelliklerinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Artan kullanım eğilimi, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin bileşenlerine ayrılmasını yani geri dönüştürülmesini çok daha önemli hale getirmiştir. Cam ve karbon elyaflar eritilemedikleri için polimer matrisli kompozitlerde geri dönüşümü mümkün olmamaktadır. Bu talebi karşılamak için polimer matris içinde eriyebilen ve matris ile uyumlu olan elyaflar kullanılmaktadır. Bu durum kendinden takviyeli termoplastik malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Poliamid, polietilen, polietilen terftalat ve polipropilen gibi malzemeler kendinden takviyeli kompozitlerin geliştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Chen ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, değiştirilmiş bir film istifleme tekniği kullanarak kendinden takviyeli polietilen teraftalat kompozitleri üretmişler ve yaptıkları deneylerle mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçları kendinden takviyeli polietilen teraftalat kompozitlerinin, takviyesiz polyester matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında gerilme, eğilme ve darbe özelliklerinin belirgin olarak üstün olduğunu görmüşlerdir. Polyester matrisin gevrekleşmesi nedeniyle tutma süresinin önemli bir boyutta etkilendiği tespit edilmiştir. Kendinden takviyeli polietilen teraftalat

(SRPET) malzemenin 215 C° sıcaklıkta 3 dakika. süre ile işlem görmesiyle en iyi mekanik özellikler sergilemiş olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerde SRPET malzemenin 854 J/m olduğu tespit edilmiştir. Bu saf polyester reçine darbe yutma enerjisinin yaklaşık 63 katıdır.

Chengcheng ve ark. (2011) da kendinden takviyeli kompozitleri (SRCs) gelişimini gözden geçirmişlerdir ve SRCs'lerin tasarım ilkeleri, üretim teknikleri ve potansiyel uygulama alanlarına üzerinde durmuşlardır. Araştırmaları sonucu SRCs' ler birbirinden farklı bileşenli kompozitlerle kıyaslanmış ve sonuç olarak SRCs'lerin homojen yapıda olmalarından ötürü mükemmel bir ara yüze sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

P. Russo ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 0/90 cam fiber doğrultulu polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Kendinden takviyeli kompozit malzemelerden farklı olarak bu çalışmada fiber ile matris arasındaki uyumu artırıcı polybond 3200 (Maleik Anhidrid) malzemesinin yanı sıra fiberlere aminosilan kaplanmıştır. Çalışmada aminosilan içerikli kompozit malzeme ile aminosilan içermeyen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla eğilme ve düşük hızda çarpışma testleri yapılmıştır. Eğilme ve düşük hızda darbe deneyleri sonucunda aminosilan içerikli polipropilen termoplastik kompozit malzemelerin en yüksek gerilme ve en iyi darbe direncine sahip malzeme olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemelerde bağlantı yöntemleri ve uygulamaları da günümüzde üzerine çalışılan önemli konular arasındadır. Özellikle mekanik bağlantı yöntemleri, ürünlere değiştirilebilir özellikte olma yeteneği kazandırdığı için Araştırma Geliştirme faaliyetlerine hala devam edilmektedir. Mekanik bağlantılar cıvata v.b. elemanlarla sağlandığı için ürün üzerine delik açma zorunluluğu vardır. Kompozit malzemedeki statik ve dinamik yüke maruz kalındığı delik çevresinde gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Kompozit laminalarda gerilme yığılmaları malzeme mukavemetini azaltarak hasara neden olmaktadır. Martin ve ark. (2015) çekme yüküne maruz bırakılmış bir kompozit plakada delik çevresindeki hasar başlangıcını tespit etmek için birleştirilmiş enerji kriterini kullanmışlardır. Sonlu ve sonsuz genişlikteki izotropik ve ortotropik plakaların çeşitli konfigürasyonlarını analitik ve sayısal modeller yardımıyla incelemişlerdir.

Sonsuz ve sonlu genişlikteki, izotropik ve ortotropik plakaların çeşitli konfigürasyonları analitik ve sayısal modeller yardımıyla incelenmiştir. İncelemeler sonucu delik yarıçapının arttıkça mukavemetin azaldığını ve delik çevresindeki gerilme karaktersitiğinin malzeme tokluğu, plaka genişliği ile de ilgili olduğunu tespit etmişlerdir.

M. Yazıcı ve ark. (2016) tarafından termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışma da pa matrisli cam elyaf takviyeli ve pp matrisli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin pe matrisli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelere oranla daha üstün mekanik özelliklere sahip oldukları belirlenmiştir. Bu sonuçlara bakılarak cam elyaf ile pa ve pp matris malzemesinin daha iyi uyum sağladığı ve otomotiv endüstrisinde yüksek mekanik özellik istenen parçalarda kullanımının daha uygun olacağı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında laminasyon tekniği ile elde edilmiş [0,90] istifinde polipropilen esaslı kendinden takviyeli termoplastik kompozitlerin, standart çekme, delikli çekme ve kayma deneyleri yapılmıştır. Deneyleri yapılan numuneler standartlara göre üretilmiştir. Mekanik özellikleri tespit edilen deney numunelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme; aynı veya farklı gruptan iki ya da daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan malzemedir. Kompozit malzeme içerisindeki bileşenler kompozitin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlerler. (Şahin 2006)

Kompozitler, matris adı verilen ana yapı ve takviye elemanı (fiber) adı verilen dayanımı yüksek malzemelerden oluşur. Dolayısıyla matris ve takviye elemanın özellikleri kompozit malzemenin özelliklerini belirlemektedir. Takviye elemanı kompozitin mukavemetini ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Matris ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini engellemektedir.

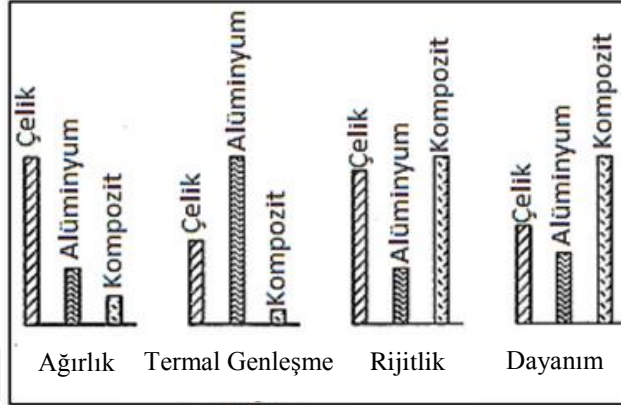
Ayrıca matris ve takviye elemanı (fiber) arasındaki yapışma yeteneği, hacimsel oran ve takviye elemanının matris içindeki pozisyonu kompozit malzemenin belirleyici özelliklerini etkileyen önemli unsurlardır.

2.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozitlerde, kendi başlarına yapılarında mevcut olmayan fakat malzeme bileşenlerinin optimum özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli bir avantaj oluşturur. Kompozit malzeme üretimi ile şu özellikler amaçlanmaktadır:

- Yüksek mukavemet,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek rijitlik,
- Hafiflik,
- Yüksek aşınma direnci,
- İyi korozyon direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi termal iletkenlik,
- Estetik görünüm,
- Elektriksel özellik (Demir 2013)

Yukarıdaki özelliklerin hepsine birden aynı kompozit malzemede ihtiyaç yoktur. Amaçlanan yapının fonksiyonuna göre hangi özellikler elde edilmek isteniyorsa ona göre malzeme seçimi yapılır. Kompozitin elastik modülü, çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri bileşenlerinden yararlanılarak tespit edilebilir.



Şekil 2.1. Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen 2010)

Matris/takviye elemanı seçimi, üretim yöntemi, bileşenlerin mukavemet değerleri kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozite gelen yükün matris tarafından takviye elemanına iletilmesinde matris ve takviye elemanı arasındaki ara-yüzey temasının güçlü olması gerekmektedir. Kompozitler karma malzemeler olduğu için bu şartı sağlamak adına iyi bir matris/ elyaf seçimi yapılmalıdır. (Şahin 2006)

Çizelge 2.1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen 2010)

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (G/ρ)	Özgül Modülü (E/ρ)	Uzama Miktarı (%)
Alüminyum	2,8	84	71	30	25	-
Al-2024	2,8	247	89	88	25	8-20
Al Alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	21,1	20
Ni Alaşımı	8,18	450-1200	204	147	24,9	26-45
Ahşap	0,7	110	13	157	19	-
Alaşımız Çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımız Çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme Demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç (%30 Zn)	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/Epoksi (%60)	1,62	1400	220	865	135	0,8
Kevlar/Epoksi	1,38	1310	83	950	60	-
Cam/Epoksi (%60)	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/Polyester (%50)	1,9	750	38	390	19,8	1,8
Karbon/Epoksi (Y:D)	1,5	1650	140	1100	93	-
Cam/Polyester	1,55	110	9	72	5,7	2
Al/50%B	2,7	1130	207	420	77	-
Cu/50%T	14,13	1207	262	90	18	-

Kompozitlerin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır;

- Fiyatlarının yüksek olması,
- Üretimin zor olması,
- Kırılma uzamasının az oluşu,
- İyi yüzey kalitesi elde etmenin zor oluşu,
- İşlenmesinin zor olması (Türkmen 2010).

2.1.2. Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler sanayide hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle kompozitlere en yoğun olarak otomotiv, savunma ve havacılık sektöründe başvurulmaktadır.

Çizelge 2.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Türkmen 2010)

Endüstrisi	Uygulama Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiC _w /Al, Gr/Al, B/Al, cam/epoksi, C/epoksi, B/epoksi, K/epoksi, süper alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, giriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al ₂ O ₃ /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al ₂ O ₃ /Al, SiC _w /Al, B/A, SiC/Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/epoksi, SiC _p /Al, SiC _w /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/epoksi, Karbon/Epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi, Karbon/Epoksi
Spor	Oltalar, golf küllüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri bisiklet ve motosiklet gövdesi	Gr/Al, B/Al, C/epoksi, B/epoksi, SiC _w /Al, B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Uçak-Uzay	Uçak frenleri, roket memeleri, türbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/karbon kompozit
Diğer Alanlar	Makine yatakları	C/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb

2.1.2.1. Havacılık Sektörü

Kompozit malzemeler düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gibi mekanik özellikleriyle atmosferde daha mukavim davranış göstermeleri nedeniyle havacılık sektöründe metallerin ve alüminyum alaşımların yerini almıştır. Uçaklarda ve helikopterlerde gövde parçaları ve iç tasarım parçalarında polimer esaslı kompozit malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir.

2.1.2.2 Otomotiv Sektörü

Son yıllarda otomotiv sektörünün en gözde konularından birisi olan ağırlık azaltma çalışmalarının başında kompozit malzeme kullanımı gelmektedir. Düşük yakıt tasarrufu ve CO₂ salınımı gereksinimleri nedeniyle daha hafif araçlar üretmek otomobil üreticilerinin temel hedefleri arasına girmiştir.

Sektörde termoset kompozit malzemelerin kullanımı yaygın olmakla birlikte günümüzde termoplastik malzemelerin kullanım oranı da bir hayli artmıştır. Termoplastik malzeme kullanımının artmasının nedenleri arasında, geri dönüşürebilir olması, kolay şekil alması ve özgül mukavemetinin yüksek olması gösterilebilir.

Kokpit parçaları, araç gövde parçaları, salıncak kolu ve aynalar otomotiv sektöründe kompozit malzemelerin kullanıldığı ürünler arasındadır. Kokpit parçaları, araç gövde parçaları, salıncak kolu ve aynalar otomotiv sektöründe kompozit malzemelerin kullanıldığı ürünler arasındadır.

2.1.2.3. İnşaat Sektörü

İnşaat sektöründe de kompozit malzeme kullanımı geniş bir kullanım hacmine sahiptir. Cephe korumaları, bina kaplama düzenekleri, lavabolar, otobüs durakları, kapılar, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları sektörde kullanılan kompozit malzemelere örnek verilebilir. (Özer 2015)

2.1.2.4 Denizcilik Sektörü

Kompozit malzemeler deniz suyunun ve suda bulunan kimyasalların aşındırma etkisine karşı iyi korozyon direnci göstermelerinden dolayı denizcilik sektöründe yaygın bir şekilde kullanılırlar. Ayrıca kolay kalıplanabilir oldukları için deniz aracı gövdesi tek parça halinde üretilebilmektedir. Dolayısıyla kaynak dikişi olmadığı için su sızıntı problemi ortadan kalkmaktadır. Kompozit malzemelerin hafif olması da yakıt sarfiyatını azaltarak, denizcilik sektöründe kullanılma nedenlerinin başında gelmektedir. Kompozit deniz aracı yapımında 3 ana reçine kullanılmaktadır. Bunlar; polyester, vinilester ve epoksidir. Tekne gövdelerinde, katamaranlarda, yelkenlilerde, yat iç dekorasyon ürünlerinde kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.2.5. Elektrik-Elektronik Sektörü

Kompozit malzemeler yalıtkan özelliklerinden dolayı, elektrik izolasyon ürünü olarak elektrik-elektronik sektöründe kullanılmaktadırlar.

2.1.2.6. Spor Araç ve Gereçleri

Kompozitler spor araç-gereçlerinde de öne çıkan malzemelerdir. Ağırlıklarının az ve mukavemetlerinin yüksek olması sayesinde özellikle cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler bu alanda da kullanılmaktadır. Kompozitler darbe dayanımlarının iyi olması nedeniyle deniz sporlarında kano, sörf tahtası gibi araçlarda karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca üstün titreşim sönümlenme kabiliyetleri nedeniyle golf sopası, tenis raketi gibi spor aletlerinde kullanılmaktadır. (Öztürk 2009)

2.1.2.7. Sağlık Sektörü

Özellikle diş hekimlerinin kullandığı dolgu malzemesi, protez dişlerde ve ortopedi alanında kullanılan yapay bacak ve kemik hasarı olan bölgelerin yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

2.1.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit üretiminde farklı ihtiyaçları karşılamak için birçok farklı üretim metodu bulunmaktadır. Bu metotların her birinin bazı avantajları ve faydaları mevcuttur. Dolayısıyla uygun üretim yöntemini bulmak, son ürün kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Uygulamalarda, dayanım, ağırlık, yorulma mukavemeti, yüksek korozyon dayanımı, hasar toleransları ve bakım kolaylıkları gibi etmenler birlikte düşünülerek, düşük maliyetli ve en kolay ürün üretilebilir yöntem tercih edilmelidir. (Şimşek 1994)

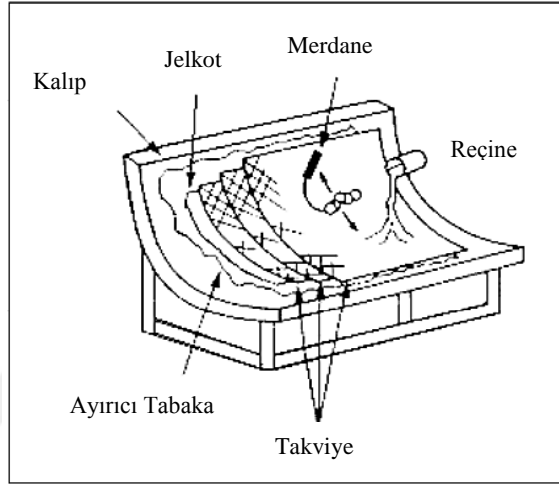
2.1.3.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Yöntemleri

El Yatırma Yöntemi

El yatırma en basit kompozit üretim yöntemlerinden biridir. Daha önceden hazırlanan kalıp içerisine dokuma elyaf veya keçe yerleştirilerek reçine rulo ve fırça gibi el aletleriyle elyafın üzerine sürülür. Planlanan kalınlık oluşana kadar bu işleme devam edilir. Dolayısıyla tabakalı yapıda bir kompozit malzeme üretilmiş olur. El yatırma yöntemine en uygun reçineler, epoksi ve polyesterdir. Estetik görünüm elde etmek, tutuşmayı engellemek ve hafiflik için reçineye dolgu maddeleri katılmaktadır.

Reçinelerin kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek için polivinil alkol (PVA), silikon, madeni yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılmaktadır.

Rüzgar türbin kanatları, tekne gövdeleri, ev dekorasyon malzemeleri el yatırma yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerden bazılarıdır.



Şekil 2.2. El yatırma yöntemi (Eker 2011)

Püskürtme Yöntemi

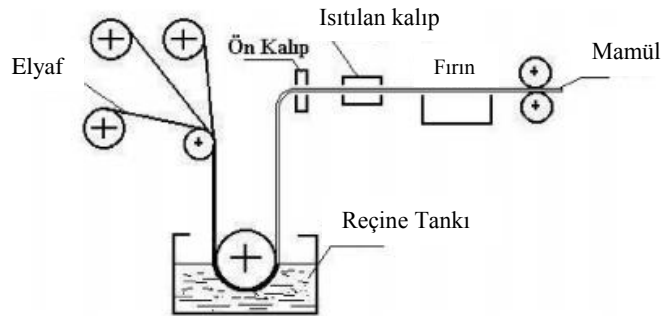
Püskürtme yöntemi çalışma metodu el yatırma yöntemi gibidir. Bu yöntemde kırılmış elyaf kullanılır. Elyaf kırma işlemi tabanca üzerinde bulunan bir kırıcı aracılığı ile yapılır. Kırılmış elyaflar uygun hızda kalıp yüzeyine, sertleştirici ilaveli reçine ile birlikte özel bir tabanca kullanılarak püskürtülür. Püskürtme işlemi uygun hızda yapılmalı ve püskürtme açısı kalıba dik yönde olmalıdır. Bu sayede gereksiz elyaf kullanımından kaçınılmaktadır. İslatma operasyonu bu yöntemde önem arz etmektedir. İslatmanın tam gerçekleşmesi için kullanılan elyaf miktarı % 35 oran ile sınırlı olmalıdır. Püskürtme işleminden sonra hava kabarcıklarını engellemek için bir rulo yardımı ile elyaf üzerinde gezilir. Püskürtme yöntemi ile karmaşık geometrili malzemeler üretilir. Fakat hızlı bir üretim yöntemi olmasına karşın, maliyeti yüksektir.



Şekil 2.3. Püskürtme yöntemi (Mazundar 2012)

Profil Çekme Yöntemi

Bu yöntem seri üretim şartlarına uygundur. Sabit kesitli profil ürünlerin üretilmesinde başvurulan maliyetli bir yöntemdir. Sistemde takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra, 120-150 °C'ye kadar ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirilerek sertleştirilir. Islatmanın düzgün olması sebebiyle % 60-65 oranında elyaf kullanılır. Enine yük taşıyacak kompozitlerde özel dokuma metotlarına başvurulur. Bu yöntemle genellikle çubuk ve boru şekilli ürünler üretilir. Profil çekme yöntemi, yönlenmiş elyaf, uzunlamasına mukavemetin fazlalığı, otomasyon kullanılması, işletme ve yatırım maliyeti gibi avantajlara sahiptir (Aktaş 2010).



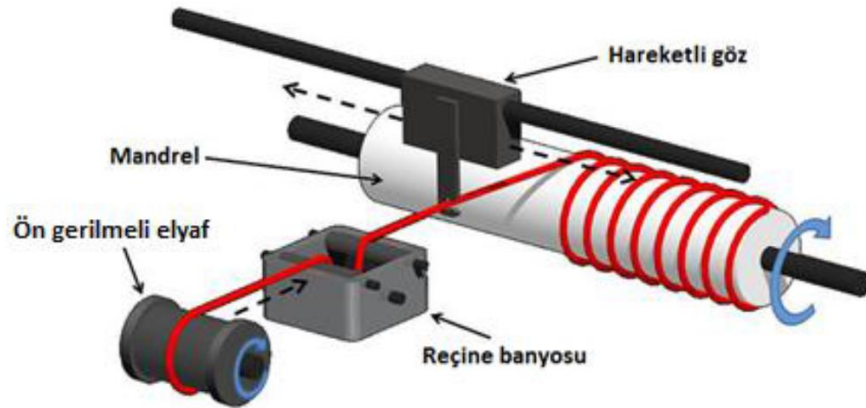
Şekil 2.4. Profil çekme yöntemi üretim şeması (Aktaş 2010).

Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma, genellikle silindirik parçaların üretiminde uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem, sürekli elyafın kuru veya ıslak olarak makaralardan ön gerilmeyle çekilerek dönen bir parça üzerine sarılma tekniğine dayanır. Elyaf sarma yüksek dayanıma sahip kompozit ürünler üretmek için kullanılmaktadır. Elyaf sarma teknolojisinde sürekli elyaf (cam elyaf ve karbon elyaf gibi) malzemeler ve reçine kullanılmaktadır.

Elyaf sarma yöntemi, sürekli elyafın bir mandrel üzerine önceden belirlenmiş koordinatlar boyunca hassas bir şekilde sarılmasıyla çalışmaktadır. Bu sarım tekniği daha çok simetrik ve dairesel ürünlerin üretimi için kullanılmaktadır. Simetrik ve dairesel ürünlerin üzerine reçine takviyeli elyaf sarma işlemi uygulanması ile dayanımı çok yüksek ürünler üretilmektedir.

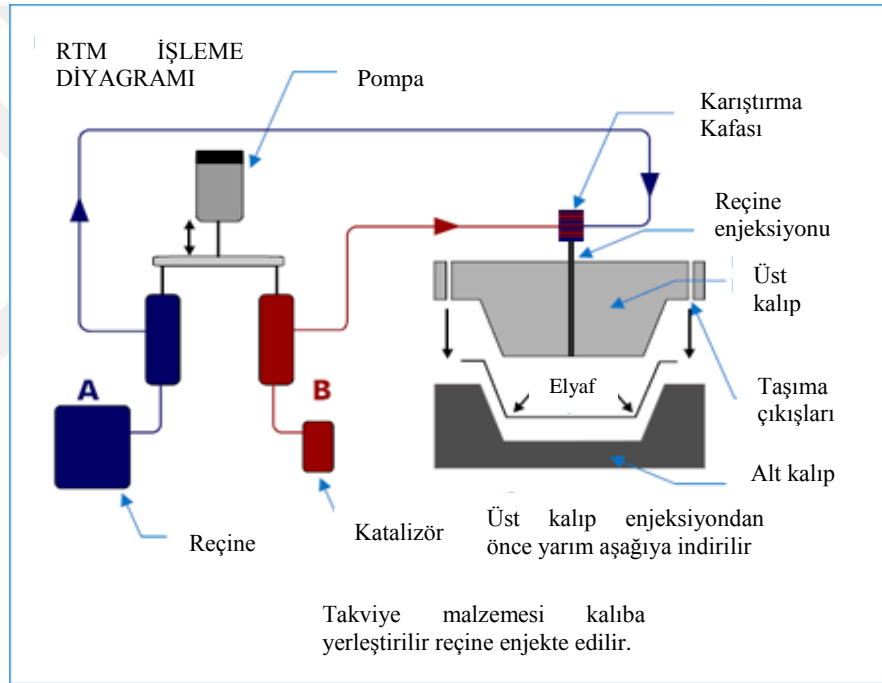
Elyaf sarım işleminde üretilen ürünün istenilen kalınlık ve güçte takviye elamanı ile kompozit oluşturulurken ön gerilme, sarım açısı ve reçine formülasyonu gibi değerler nihai ürünün mukavemetini etkilemektedir. Bu parametrelerden ön gerilme, özellikle kırılma ve narin elyafların yapısında oluşturacağı herhangi bir hasar üretilen ürünün çalışma performansını etkilemesinden dolayı bu sistemler önemli bir rol üstlenmektedir.



Şekil 2.5. Elyaf sarma yöntemi (Toptaş 2015)

Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

Reçine transfer kalıplama yöntemi için dişi ve erkek olmak üzere iki parçalı kalıp kullanmak gerekir. Bu yöntem hızlı, uzun ömürlüdür ve elde edilen ürünlerin her iki yüzeyi de düzgündür. Takviye malzemesi olarak kuru keçe veya kumaş kullanabilir. Bu yöntemde takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Matris içinde geç çözünen reçineler ile elyafın sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Matris enjeksiyonu en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Küçük veya karmaşık geometrili uçak ve otomobil parçaları bu yöntem uygulanarak üretilmektedir.



Şekil 2.6. RTM yöntemi (Türkmen 2010)

Basınçla Kalıplama Yöntemi

Bu yöntemde, cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren ve hazır kalıplama bileşimi denen kompozit malzemeler, sıcak pres kalıplarla üretilmektedir. Üretimin basınç altında gerçekleşmesi sebebiyle bu yöntemde delikli ve karmaşık geometrili ürünler üretilebilmektedir. Basıncılı kalıplama yönteminde ürün ret oranı çok düşüktür (Özer 2015).

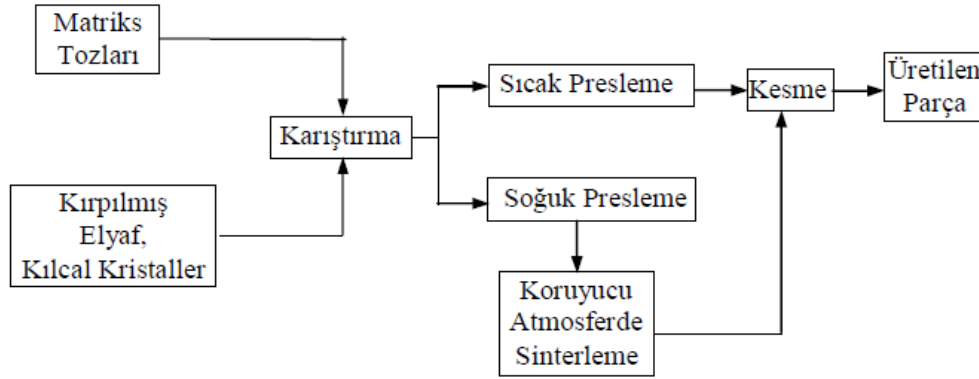
2.1.3.2. Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Sıcak presleme yöntemi

Sıcak presleme yönteminde elyaf, alüminyum, magnezyum, titanyum gibi metal folyeler arasına yerleştirilir. Yüzeğe püskürtülen ve pres operasyonu sırasında yanan bir bağlayıcı ile elyafın kayması engellenir. Presleme operasyonu 0-170 °C sıcaklık ve 0,5-15 MPa basınç altında gerçekleştirilir (Aran 1990).

Toz metalürjisi yöntemi

Bu yöntemde toz şeklindeki metal ya da seramik malzemeler birleştirilmektedir. Katı hal difüzyonu için bu malzemeler karıştırılıp gerekli basınç ve sıcaklıkta sinterlenmektedir. Nikel, bakır, alüminyum, kobalt gibi metal malzemeler bu yöntemde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tozların sinterlenmesi sırasında elyaf ve takviye elemanın özellikleri bozulabileceğinden karışım uzun süre ısıtılmamalıdır (Aran 1990).



Şekil 2.7. Toz metalürjisi yöntemi üretim şeması (Aktaş 2010).

Sıvı metal emdirme yöntemi

Erime noktası düşük olan magnezyum, alüminyum, gümüş ve bakır gibi metaller, bu yöntemde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Elyafın sıvı metal havuzundan geçirilmesi ve katılaşmaya bırakılması sonucu malzemeler üretilir. Kiriş, boru, çubuk, profil gibi ürünler bu yöntemde seri üretim şartlarında elde edilebilir.

Elektroliz yöntemi

Bu yöntem, katot olarak kullanılan mandrel üzerinde bulunan elyaflara elektroliz sırasında metal matris çökertilmesi operasyonudur. Elektroliz yöntemi ile yüksek hacim oranlı kompozitler üretilmektedir. Son işlem olarak elyaflar preslenerek birleştirme işlemi yapılır. İşlemler düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu nedenle elyaf özellikleri korunmaktadır

Buhar çökeltme yöntemi

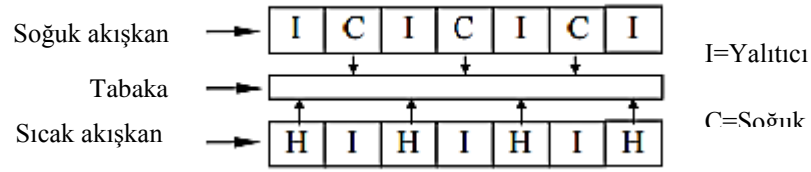
Bu yöntem ile üretilen kompozitlerde buharlaştırılan matris malzeme, takviye elemanı üzerine çökeltilir ve takviye elemanı kaplanır. Alüminyum ve nikel gibi metal matrisler bu yöntemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimin düşük sıcaklıklarda yapılması avantaj sağlarken maliyetlerin yüksek olması olumsuzluk olarak karşımıza çıkmaktadır

Haddeleme yöntemi

Haddeleme yönteminde, metal bant ve elyaf basınç altında işlenerek sürekli ürünler elde edilmektedir. Matris malzemenin oksitlenmesini engellemek için haddeleme vakumlama işlemi ile eş zamanlı yapılmaktadır. Ortaya çıkan malzemeler üst üste konarak nihai ürün kalınlığının artırılması mümkündür.

2.1.3.3. Yüksek Performanslı Kompozit Üretimi

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretiminde amaç iyi bir ara yüzey oluşturmak için matris malzemesi, takviye fiberleri veya partikülleri iyi ıslatarak, mümkün olan ve en hızlı şekilde katılaşma yapabilmektir. Mevcut yöntemlerde uzun sürelerde yapılan üretimler bu yöntemde bir saat gibi kısa sürelerde yapılmaktadır. Parçanın ısıl işleme hazırlanması için parça üzerine sıcak akışkan gönderilmektedir. Akışkan madde olarak genellikle su ve yağ kullanılmaktadır. Üretim, biri yüksek diğeri alçak basınçta olmak üzere iki kalıpta yapılmaktadır. Yüksek basınçtaki üst kalıbın iç kısmında ısıl işlem sırasında alt basınç odasındaki parçanın üzerini saracak esnek bir membran yer almaktadır. Bu yöntemde kalınlığı yüksek numuneler bile düzenli bir yapıya sahip olacak şekilde ısıl işleme tabi tutulabilir.



Şekil 2.8. Yüksek performanslı kompozit üretim şeması (Aktaş 2010).

Çizelge 2.3. Kompozit üretim yöntemlerinin bazı açılardan karşılaştırılması, 10: en büyük değer, 1: en küçük değer (Lubin 1982).

Yöntem	Ekipman Maliyeti	Üretim hızı	İşçiliğin Önemi	Parçanın karmaşıklığı	Tekrar Üretilabilirliği
El yatırması	1	3	10	9	1
Vakumlu torba	2	2	10	9	3
Püskürtme yöntemi	4	4	10	8	1
Elyaf sarma yöntemi	6	6	2	4	9
Pulrüzyon	7	9	2	2	10
SMC	10	8	4	9	10
Merkezkaç döküm	9	7	3	3	6
Sürekli laminasyon	10	10	2	1	10
Enjeksiyon	10	10	2	10	10

2.1.4. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri

Kompozit malzemeler, matris ve takviye elemanı (elyaf) olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Kompozitin mekanik özellikleri ve davranışını tespit etmek için, içinde bulunan elyaf ve matris malzemenin özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Kompozit malzemeyi oluşturan elyaf ve matrisin önemli ve temel görevleri aşağıda verilmiştir.

Matris malzemelerin görevleri (Toğuşoğlu 2011).

- Elyafı bir bütün olarak tutar ve kaymasını önler.

- Kompozit üzerine gelen yükleri elyafa iletir.
- Kompozitin katı durmasını sağlar ve malzemenin şeklini verir.
- Çevresel faktörlerin verdiği zararlara karşı kompoziti korur.

Elyaf malzemelerin görevleri (Toğuşoğlu 2011).

- Kompozit üzerine gelen yükün büyük bölümünü elyaflar taşır.
- Elyaf lar kompozit malzemenin kararlı olmasını sağlarlar. Çünkü yüksek elastik modül, sertlik ve sıcaklık dayanımı gibi yapısal ve mekanik özellikleri mevcuttur.
- Kompozit malzemenin iletkenlik ve yalıtkan olma durumunu elyaflar tayin eder.

2.1.4.1. Matris Malzemeleri

Kompozitin ısıya, kimyasal maddelere ve neme karşı direncini sağlayan matrisler bu görevlerinin yanında başka birçok görevi de yerine getirirler. Kompozitlerde kullanılan polimer matrisler termoset ve termoplastik olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar (Mazundar 2002).

Termoset Matrisler

Termosetler, epoksi gibi bir reçine ve çapraz bağ yapıcı malzemeden meydana gelmektedir. Bu reçine ve çapraz bağ yapıcı malzemenin bir araya gelmesiyle düşük viskoziteye sahip yeni bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Yapının içinde oluşan veya dışarıdan uygulanan ısı ile bu düşük viskoziteli malzeme çapraz bağlanmaktadır. Bu malzemenin üretiminde ikinci bir ısıtma ve şekil verme durumu söz konusu değildir. Çünkü ilk ısıtmadan sonra yapı yüksek oranda sertleşmektedir.

Termosetler mekanik dayanım ve sıcaklık dayanımı bakımından termoplastiklere göre daha ileri düzeydedir. Fakat geri dönüştürülebilir olmadıkları için termoplastikler, termosetlerin yerini almaya başlamıştır.

Termoset matrisleri poliester, vinilester, epoksi, siyanat esterleri, poliididler ve fenolikler olarak sıralayabiliriz. Bunların arasında epoksi en çok kullanılan matristir malzemesidir (Miracle 2001).

Termoplastik Matrisler

Termoplastikler yüksek viskoziteli matrislerdir ve ısıtılarak çapraz bağlanmazlar. Gerekli ısı verildiğinde yumuşayabilir veya eriyebilirler. Dolayısıyla termosetlerin aksine birçok defa işleme tabi tutulabilirler. Çünkü termoplastiklerde sıcaklık değişimi ile sadece fiziksel özellikler değişir. Bunun nedeni ise termoplastik matris moleküllerinin düz zincirli olmasıdır.

Sanayide en çok kullanılan termoplastikler: akrilik, polivinil klorür, poliamid ve polipropilendir. Özellikle polipropilen birçok alanda farklı uygulamalarda özellikle otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir.

2.1.4.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları

Takviye elemanları yüksek elastisite modülü ve sertliğe sahiptir. Dolayısıyla kompozit malzeme üzerine gelen yükün büyük oranını taşır ve mukavemet sağlarlar. Kompozitteki mukavemet oranı takviye elemanı ve matris arasındaki bağlanma kuvvetine bağlıdır. Takviye elemanları tanecik veya elyaf formunda olabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar sürekli elyafların yoğun olarak kompozit malzemelerde kullanıldığı göstermektedir.

Kompozitteki mukavemet, elyafın tipine, üründeki oranına, yönleneşine ve oranına bağlıdır. Elyafın kompozite mukavemet kazandırması için matris malzeme ile bağlantısının iyi olması ve bağlantı yüzeyinin fazla olması gerekmektedir. Bu da ıslatma işleminin iyi olmasına bağlıdır. Kompozit malzemenin dayanımının yüksek olabilmesi için elyafların uygulanacak yük ile aynı doğrultuda olması beklenmektedir. Eğer yük elyaflara dik uygulanırsa kompozit istenen mukavemeti gösteremez. Yük birçok yönden gelecek ise kompozitteki elyafların yönleneşmesi 2 ya da 3 boyutta olabilir.

Son yıllarda kompozit yapılardan beklenen mekanik özellikler ve gelişen teknoloji takviye elemanlarının da geliştirilmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda bor, karbon, silisyum karbür ve aramid gibi elyaf türleri ortaya çıkmıştır (Hancox 1994).

Elyaf lar aşağıdaki özelliklere sahip oldukları için yüksek mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadır

- Mikro yapılarının üstün özellikte olması, tane boyutlarının kk olması ve kk çapta retilibilmeleri
- Boy/ap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaf lara iletilen yük miktarının artması.
- Elastisite modülünün yüksek olması.

Cam Elyaf lar

Endstrilerindeki hızlı gelişim hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımına ihtiyaç doğurmuştur. Cam elyaf, ağırlıklarına oranla yüksek mukavemete ve rijitliğe sahiptir. Bu doğrultuda cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere ihtiyaç artmış ve bu malzemeler üretilmeye başlamıştır (Türkmen 2013).

Cam elyaf ların maliyetleri de diğer malzemelere göre oldukça düşüktür. Bu nedenle elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında en fazla tercih edilen elyaf türüdür. Saflık oranı yüksek olan malzeme üretiminde kullanılmaktadırlar. Cam elyaf ların sıklıkla tercih edilme sebepleri aşağıda verilmiştir.

- Çekme mukavemeti ve özgül mukavemeti çeliğe göre yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür ve yanmazlar.
- Kimyasallara karşı dirençlidirler.
- Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyaf lı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir zlme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabılır.
- Elektriği iletmezler. Bu zellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyaf lı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanırırlar.

Bor Elyaf lar

Bor elyaf lar kendi ilerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan bir flamanın üzerine bor kaplanarak üretilirler. Bu durumun nedeni, borun oldukça sert ve

gevrek bir içyapıya sahip olmasıdır. Burkulma, çekme, basma mukavemetleri ve elastisite modülleri yüksektir. Fakat maliyetleri yüksektir. Elyaf çapı 0,1 ve 0,2 mm arasında değişmektedir. Üstün mekanik özellikleri olduğu için daha çok havacılık sektöründe uçak parçalarında kullanılmaktadırlar (Aran 1990).

Karbon Elyaf

Karbon elyaf darbelere dayanıklı ve düşük ağırlıkla rijitlik sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. Polimer matris içerisinde ıslanabilme özellikleri çok iyidir. Mukavemet ve diğer mekanik özellikleri cam elyaf ve aramide göre daha üstündür.

Karbon elyaf düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı, ürün değerleri yüksektir ve stratejik bir üründürler. Bu nedenle kompozit sektöründe kullanımı giderek artmaktadır.

Karbon elyaf, yüksek termal ve kimyasal kararlılık, mükemmel akma direncine sahip olmalarından dolayı sanayinin dikkatini çekmeyi başarmıştır. Ayrıca koroz dirençleri çok yüksektir ve yanmaya karşı dayanıklıdır. Bu nedenle askeri ve sivil uçak parçalarında özellikle otomotiv endüstrisinde sıklıkla karbon elyaf kullanılmaktadır.

Aramid Elyaf

Aramid isim olarak aromatik poliamid' ten türetilmiş bir elyaf türüdür. Aramidlerin çekme dayanımı çeliğe göre 5 kat daha üstündür. Bu durum aramidlerin balistik koruma amaçlı ürünlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Aşınma dayanımlarının çok iyi olmasına karşın basma dayanımları çekmede olduğu gibi yüksek performansta değildir. Uçak sanayisinde, yüksek basınca dayanıklı boruların yapımında kullanılmaktadırlar (Başdemir 2012).

Aramidlerin genel olarak özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Aramid, elyaf eksenine doğrultusunda üstün mekanik özellik göstermektedir.
- Aramidler, düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerindedirler.
- Aramid gevrekliği yüksek oranda olmadığı için şekil alma kabiliyetleri de iyidir.

- Darbeye karşı gösterdikleri direnç yüksektir.
- Asit ve alkalilerden etkilenmelerine karşın doğal kimyasallara karşı dirençlidirler.

Yüksek Sıcaklık Elyafı

Yüksek sıcaklık elyafı Al_2O_3 ve SiC gibi seramik malzemelerden üretilmektedirler. Bu elyafın paslanma direnci yüksektir. Özellikle SiC elyaf metal matrisler için mukavemet ve maliyet olarak en uygun elyafıdır. Bu elyaf yüksek çekme mukavemetlerine sahip değildir fakat basma mukavemetleri iyidir. Örneğin, alümina/epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ile 2413 MPa'dır (Chawla 1987).

2.2. Termoplastik Kompozitler

Termoplastik kompozitler molekül yapısı olarak zincirler ve gruplar ihtiva ederler. Molekülleri üç boyutlu yapıda değildir ve moleküller arasında zayıf Vander Wals bağı bulunmaktadır. Dolayısıyla rijit yapıda değildirler. Termoplastik malzemeler birbirine genellikle çok uzun karbon atomları ile bağlıdır. Asılı atomlar ve atom grupları bu ana zincir atomlarına ortaklaşa bağlanırlar. Termoplastiklerdeki molekül zincirleri doğrusaldır ve çapraz bağlanamazlar. Şekil vermek amacıyla ısıtılırlar. Sıcaklık ve basınç altında, yapılarında herhangi bir kimyasal değişiklik olmaz sadece fiziki yapıları değişir. Tekrar tekrar ısıtılmaları avantajdır ve kolay kalıplanabilme özellikleri sayesinde termoplastik kompozit kullanım oranı endüstride giderek artmaktadır.

Termoplastik kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki en önemli özelliklerinden biri düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Örneğin demirin yoğunluğunun $7,8 \text{ gr/cm}^3$ olmasına rağmen termoplastik matris malzemelerin yoğunlukları $1-1,5 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. Termoplastik malzemeler sıvı halde yüksek viskoziteye sahiptirler. Bu nedenle termoset malzemelere oranla ara yüzey bağı daha zordur.

Bu gruba giren plastikler ve kullanıldıkları yerler aşağıda verilmiştir;

- a) Asetol reçineler (şaft yatağı)

- b) Akrilikler (polimetik metakrilat) ışıklı reklamlarda
- c) Selilozik (seliloz asetat) ışıklı reklamlarda
- d) Florokarbon (polutetro floroetilen) teflon tava
- e) İzosiyonatlar (Poliüretan) ısı izolasyonunda
- f) Poliamidler (nylon) ip imalinde, çorap çamaşır
- g) Poliefinler (polietilen-polipropilen) nylon torba, meşrubat kasası
- h) Stiren (polistren) okul gereçleri, yoğurt kabı
- i) Vinil (poli vinil klorür, P.V.C.)
- j) Polikarbonat (trafik ışıkları)

2.2.1. Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Plastik malzemelerin çekme dayanımlarının düşük olması bazı mühendislik çalışmalarında istenmeyen bir özelliktir. Ama takviye malzemeleri ile elde edilen kompozitlerde yüksek çekme dayanımlar elde edilebilmektedir (Baydar 2012).

Termoplastikler üstün özellikleri nedeniyle fiber takviyeli kompozitlerde en uygun matris malzemesidir. Yüksek darbe dayanımı, çevresel etkilere karşı gösterilen direnç, kolay şekil alabilirlik ve geri dönüşüm kabiliyeti bu üstün özelliklerden bazılarıdır.

Termoplastik malzemeler, mühendislik termoplastikleri ve genel amaçlı termoplastikler olarak iki gruba ayrılırlar. Çizelge 2.4. ve Çizelge 2.5 'de bu malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Genel Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri (Smith 2012).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (izod, J/m)
Polietilen (düşük yoğunluk)	0.92-0.93	6.2-17.2	
Polietilen (yüksek yoğunluk)	0.95-0.96	20-37.2	21.35-747.3
Bükülmez PVC	1.49-1.58	51.7-62.1	53.38-298.9
Genel maksatlı PP	0.90-0.91	33-38	21.35-117.4
Stiren akrilonitril (SAN)	1.08	69-82.8	21.35-26.69

Genel maksatlı (ABS)	1.05-1.07	40.7	320.28
Genel maksatlı akrilik	1.11-1.19	75.9	122.7
Selüloz, asetat	1.2-1.3	20.7-55.2	133.45-213.52
Plitetrafloretillen	2.1-2.3	6.9-27.6	64.05-362.98

Çizelge 2.5. Mühendislik Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri (Smith 2012).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Farbe Dayanımı (izod, J/m)
Naylon 6.6	1.13-1.15	62.1.-82.8	106.76
Poliasetat	1.42	69	74.73
Polikarbonat	1.2	62.1	640.56-854.08
Polyester (PET)	1.37	71.7	42.7
Polyester (PBT)	1.31	55.2-56.5	64.05-69.39
Polifenilen oksit	1.06-1.10	53.8-66.2	266.9
Polisülfon	1.24	70.3	64.05
Poliefenilen sülfür	1.34	69	16.01

Plastik malzemelerin genel olarak sıcaklık dayanımları yüksek değildir. Erime sıcaklıkları genel olarak 50-170°C arasında değişmektedir. Fakat bazı termoplastik malzemeler daha yüksek sıcaklıklara kadar direnç gösterebilmektedir. Örnek olarak polieter eter keton 390°C'ye kadar dayanabilmektedir. Termoplastik reçineler erime ve ısıl işlem sıcaklıkları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Termoplastik reçineler erime ve işlem sıcaklıkları (Eker 2011)

Malzeme	Erime Sıcaklığı Aralığı (°C)	Maksimum İşlem Sıcaklığı (°C)
PP	160-190	110
PA	220-270	170
PES- Poli Eten Sülfon	-	180
PEI-polieterimid	-	170
PAI- Poliamid imide	-	230
PPS- Polfenilen Sülfid	290-340	240
PEEK-Polieter Eter Keton	350-390	250

2.2.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Termoplastiklerin avantajları;

- Sınırsız raf ömürleri vardır.
- İşlem süreci tekrarlanabilir ve yeniden şekil verilebilir.
- Nem miktarı düşüktür.
- Isıl şekil alma yeteneği vardır.
- Yüksek tokluğa sahiptirler.

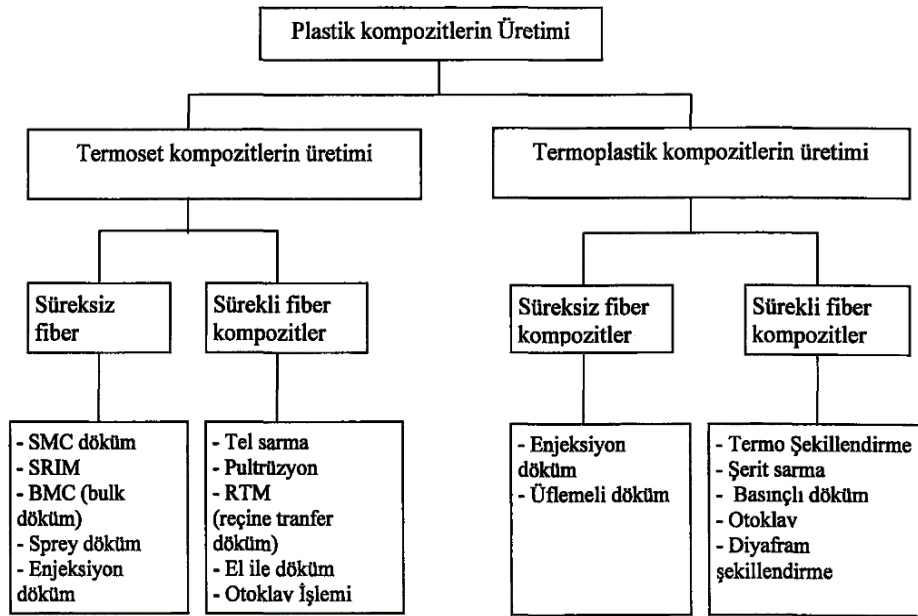
Termoplastiklerin dezavantajları;

- Vizkoziteleri yüksektir.
- İşlem sıcaklık noktaları yüksektir.
- Lif yüzey modifikasyonlarının gelişimi düşüktür.
- İşleme metotları sınırlıdır (Yılmaz 2011).

2.2.3. Termoplastik Kompozitlerin Üretim Metotları

Günümüze kadar termosetlerle alakalı daha fazla çalışma yapılmasına karşın yüksek performanslı termoplastik kompozit üretimi ile ilgili de son yıllarda önemli çalışmalar

yapılmaya başlanmıştır. Özellikle savunma sanayi ve otomotiv sektörü başta olmak üzere termoplastiklerin endüstriyel alanda kullanımı giderek artmaktadır. Geliştirilen üretim teknikleri termoplastiklerin daha kolay işlenmesi ve şekil değiştirilmesine katkı koymuştur. Ayrıca eritilmiş termoplastiklerin yetenekleri yeni üretim teknolojilerinin gelişmesine sebep olmuştur. Mevcut durumda ticari amaçlı üretilen termoplastik malzemelerde genellikle enjeksiyon yöntemi uygulanmaktadır. Termoplastiklerde üretim sırasında karşılaşılan bazı zorluklar da bulunmaktadır. Üretim esnasında termoplastik tabakalarda oluşan boşluklar ve ara yüzeylerinde meydana gelen hatalar ise yüksek sıcaklıklarda yeniden birleştirme ile ortadan kaldırılmaktadır. Aşağıdaki şemada, termoset ve termoplastik kompozitlerin üretim yöntemleri verilmiştir.



Şekil 2.9. Plastik kompozit malzemelerin işleme tekniklerini sınıflandırılması (Türkmen 2010)

2.2.3.1. Fiberlerin İşlenmesi

Kompozitlerde fiber ile matrisin ara yüzeyi arasındaki ıslatma işlemi çok önemlidir. Termoplastik fiber ile birleştirilmeden önce polimerizasyon gerçekleşir, nispeten soy hale getirilen fiber ile matris arasında iyi bir birleşmenin başarılması genellikle zordur.

Fiber takviyesi yapışmayı ilerleten ve güçlendiren bir metottur. Fiber takviyeleri üzerine yapılan çalışmaların çoğu yine termosetler ile ilgilidir. Fakat son zamanlarda termoplastik kompozitler için fiber takviye edilmesi yöntemleri güncelliğini korumaktadır ve bu konudaki çalışmalar oldukça ilerletilmiştir. Kompozit üretiminde kullanılacak termoplastik malzemenin çeşidi fiberin çeşidini belirlemektedir. Kullanılacak fiber termoplastik için uyumlu olmalıdır. Eğer bu uyum sağlanamazsa, ıslatma problemleri ortaya çıkar ve kompozitin mekanik özelliklerinde azalma görülür. Uygulamanın boyutlandırılması ve uygun bağlama boyutu için reaktif yerlerdeki fiberlerin temizliği, dağlanma durumu ve oksidasyonun önlenmesi önem arz etmektedir. (Muzzy 1988)

Bir boyutlandırmanın uygulanabilmesi; fiberin kolay uygulanabilmesine, matris ile uyumuna ve termal olarak kararlılığına bağlıdır. Termoplastikler işleme sıcaklıkları yüksektir. Bu yüzden boyutlandırma sırasında oluşan bozulmalar ciddi bir sorundur (Beland 1988).

2.2.3.2. Fiber ile Matrisin Birleşimi

Fiber ve termoplastik matrisin birleştirilmesinde birçok uygulama vardır. Bunlar eriterek kaplama, film yığma tekniği, toz ile kaplama ve fiber hibritleşme metotlarıdır. Bu yöntemlerden bazılarının termosetler için kullanıldığı da bilinmektedir.

Eriterek Kaplama

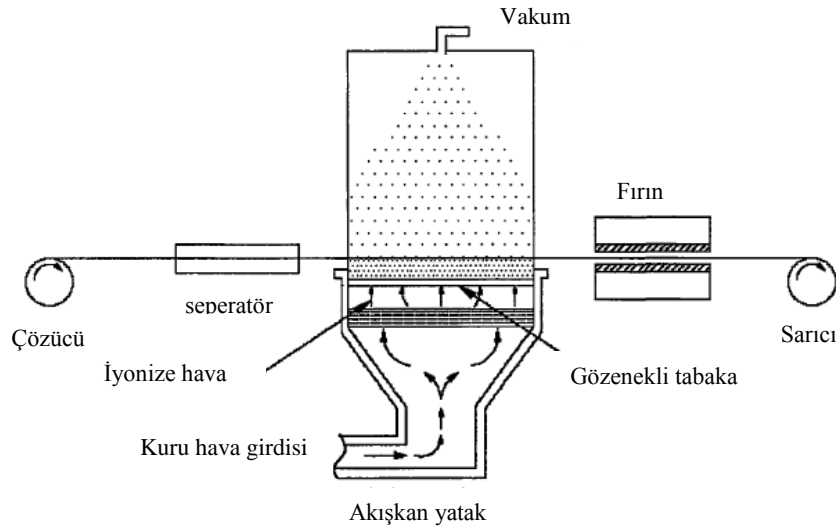
Fiber ve matris birleşiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi eriterek kaplamadır. Üretim aşamaları şu şekildedir; başlangıçta fiber çekilmek suretiyle makaradan çözülür. Daha iyi yönlendirebilme yapmak için taraftan geçirilir. Fiberlerin daha sonra makara veya hava jeti ile etkileşimi sağlanır. Böylelikle çok sayıda fiberi mümkün olan miktarda polimere yayma ve pre-preg malzemedeki boşlukların en aza indirme işlemi yapılmış olur. Erimiş polimer kalıp içerisine eklenerek veya kağıt üzerine döşenerek fiberler beslenir ve sonrasında kaldırılır.

Bu aşamada sadece fiber demetlerine ve fiberlere tek tek kaplama yapılması için eriyik üstüne basınç uygulanmaktadır. Fiberlerin tamamen emdirilmesi basıncın rolü burada

önemlidir. Kalıp çıkışında sıcak şerit soğutulur ve sarılır. Bu yöntem ile üretilen kompozitlerde istenilen ıslatma hassasiyeti gerçekleştirilir. Yüksek erime sıcaklığına sahip polimerler için bu yöntem uygun değildir.

Toz Kaplama

Toz kaplama yöntemi eriterek kaplama yönteminin tersine yüksek erime viskozitesine ve düşük çözünürlüğe sahip polimerlerin üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir. Toz kaplama prosesi şu şekildedir: İnce toz formundaki polimer yüklenir. Toz, elektrostatik bir yöntemle sıvılaştırılmış bir yataktan geçen çökertilir. Sıvılaştırılmış yataktan çıkan kaplanmış fiberler kısa süre içinde haddelenebilir veya polimerin fiber üzerinde eridiği bir fırına verilir. Sonrasında soğutulup haddelenir. Son halini alan ürün iyi kıvrımlara sahiptir ve bağlayıcı kullanılması durumunda iyi bir birleşme meydana gelmektedir. Eğer kaplanmış fiberler ısıtma ve eritme prosesine girmezse yoğunluğu düşük gerilme verilir. Ancak ileri tutuş esnasında tozun fiberlerden ayrılması önemlidir. Toz ayrılmasından kaçınmak için tutuş öncesi veya biriktirmeden önce pre-preg üzerine su verilebilir. Şekil 2.10'da toz kaplama yöntemi prosesi şematize edilmiştir.



Şekil 2.10. Toz kaplama yöntemi (Muzzy 1988).

Film Yığıma

Film yığıma (biriktirme) yönteminde matris materyali film şeklinde, takviye materyali ise lif şeklindedir. İstenilen nihai ürün kalınlığına göre en alt ve en üst tabaka matris materyali olacak şekilde matris ve takviye materyali yığılır. Üretim esnasında var olan sıcaklık ve basınç etkisiyle erime noktası daha düşük olan film eriyerek matris görevi görür. Kısmen yumuşayan diğer materyali ise takviye materyali görevi görmektedir (Matabola 2009).

Fiber Hibritleştirme

Matris malzemeler ile fiberlerin birleştirilmesinde ileri düzey çalışmaların yapıldığı fiber hibritleştirme metodunda; yüksek erime viskozitesi ve düşük çözünürlükte polimer kullanılması önerilir. Bu yöntemin esası fiber destekli bir tel ile termoplastik malzemedan bükülmüş bir telin birleştirilmesinden oluşmaktadır.

Birleştirme işlemi esnasında karmaşık yapılara, ön ısıtmasız ve tel ayırtmadan uygun örülmüş yapıların tasarımı yapılabilir. Isı ve basınç uygulandığında, termoplastik tel erir ve takviye fiberleri ıslatır. Fiberlerin iyi ıslatılması için karışık örgülerde birleşik yönlü termoplastik prepreglere göre daha uzun işlem süresi, yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulur.

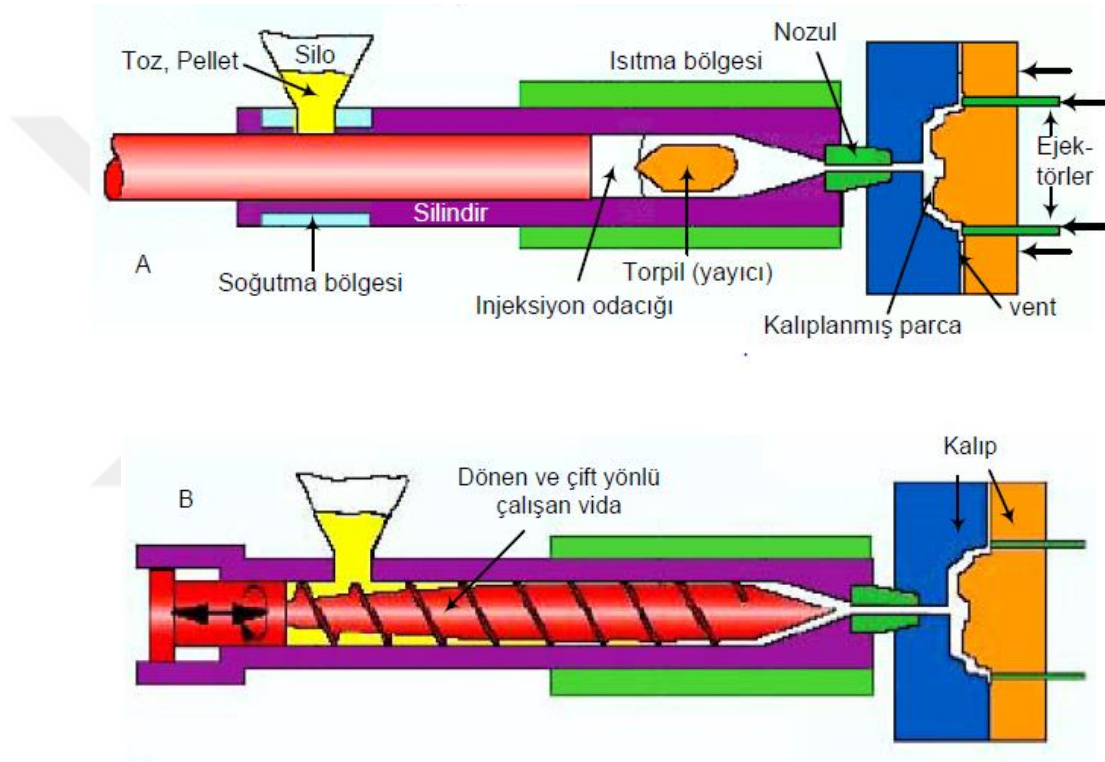
2.2.3.3. Şekillendirme Teknikleri

Kompozit malzemelerin farklı alanlarda kullanılması ve farklı görevlerdeki yapılarda kullanılmaları, bu malzemelerin şekillendirilme çalışmalarını önemli kılmıştır. Kompozitlerin şekillendirilmesi iki boyutlu bir yapının üç boyutlu hale getirilmesi olarak açıklayabiliriz. Üç boyutlu hale gelen malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri değişmez, geometrileri değişir.

Termoplastik malzemelerin üretiminde birden fazla şekillendirme metodu uygulanabilir. Fakat uygulanan her yöntem ile elde edilen ürün eşit özelliklerde olmayabilir. Ürün maliyeti ve kalitesi şekillendirme prosesi ile çok ilgilidir. Termoplastik malzemelerin şekillendirilmesinde uygulanan yöntemler aşağıda sıralanmış ve tanımlanmıştır.

Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama yüksek miktarlarda, büyük hacimli parçalar üretmek için kalıplar vasıtasıyla şekillendirme yapılan ve kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde farklı termoplastik malzemeler ile farklı mekanik özellikler elde edilebilir. Proses, granül haldeki plastik malzemenin, yüksek basınçla bir kalıp içine enjekte edilmesi esasına dayanır. Kalıp, elde edilmek istenen şeklin tersine geometridedir ve malzeme olarak da sertleştirilmiş takım çelikleri kullanılır.

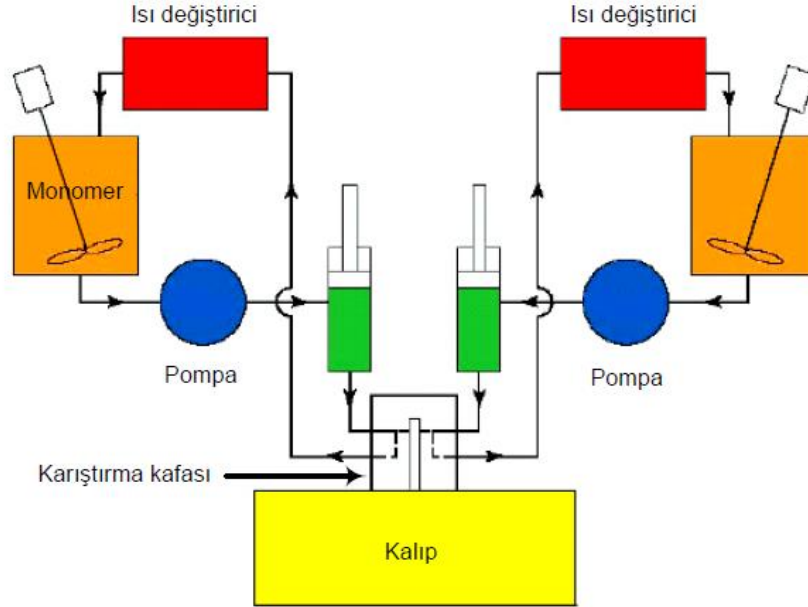


Şekil 2.11. Enjeksiyon kalıplama sistemleri: A, Plunger (dalma pistonlu) tip. B, Reciprotating (ileri-geri çalışmalı) vidalı tip (Beşergil 2012)

Reaksiyon Enjeksiyon kalıplama

Reaksiyon enjeksiyon kalıplama yöntemi poliüretan, epoksi ve diğer benzer sıvı kimyasal sistemlere uygulanan bir şekil verme uygulamasıdır. Bu yöntemde iki farklı yapıda sıvı kullanılır. Bu iki sıvı 1500- 3000 Psi arasında bir basınçla ayrı ayrı depolardan karışma odasına gelir. Yüksek hızda yoğun bir şekilde karışır. Karışım

karişma odasından yaklaşık atmosfer basıncında kalıbın içine akar. Bu yöntemle yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu parçalar üretilmektedir.



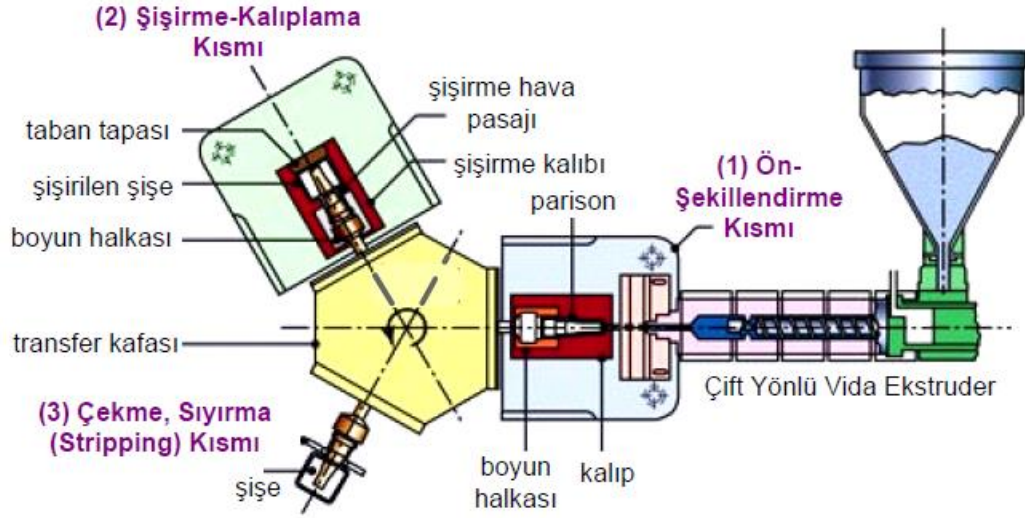
şekil 2.12. Reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (RIM) (Beşergil 2012)

Kaplama

Kaplama yönteminde ekstruderden çıkan plastik film veya levha kaplanacak malzeme örtüldükten sonra kompozit levha haddelenmektedir. Bu şekilde yapışma sağlanır ve tabak kalınlığı istenen seviyede elde edilmiş olur. Bu yöntemin önemi, tellerin üzerinin kaplamasında uygulanmasıdır. Kaplama hızı tel çapına göre değişmektedir.

şişirme

Büyük boyutlu içi boş kompozit ürünler bu metotla retilbilirler. şişirme prosesi diğer metotlara göre daha ucuzdur ve ürün elde etme metodu daha kolaydır. Üretim işlemlerinde ilk olarak yuvarlak kalıptan erimiş bir tp meydana getirilir. Sonra boruya iki parçadan oluşan kalıp içerisinde basıncılı hava üflenir. İşlemi sürekli hale getirmek için birden fazla kalıp kullanılabilir. Her şişirme işleminde belirli hacimdeki erimiş plastik malzeme şişirme ucuna iletilir. şişirme prosesinde hızlı soğuma sağlamak için sıvı CO₂, yüksek basıncılı hava kullanılmaktadır.



Şekil 2.13. Plastik şişe üretilen bir şişirme prosesi (Beşergil 2012).

Termoforming-Vakum veya Basınç Şekillendirme

Bu yöntemde termoplastik bir kompozit plaka yumuşama aşamasına gelene kadar ısıtılır. Daha sonra vakum ve basınç etkisi ile kalıp içerisinde şekil verme işlemi gerçekleştirilir. Termoforming- vakum ile çeşitli kalınlıklardaki levhalar kalıba yerleştirilir. Çift taraflı ısıtma işlemi sonrasında levhalara vakum uygulanır. Bu yöntemde ısı kaynağı olarak kızıl ötesi lambası kullanılmaktadır. Termoforming yöntemi derin çekme yöntemine benzemektedir. Kalıp tasarımında ve malzeme akışında bu benzerlik görülmektedir.

Pultrüzyon

Bu yöntem termoplastik kompozitler için hızla gelişmektedir. Pultrüzyon daha çok termoset kompozitler için uygun bir yöntemdir. Yüksek sıcaklık ve gerekli basınç değerleri yakalandığında geliştirilmiş aparatlarla termoplastikler için de uygun hale getirilebilir. Sürekliliği ve proses kolaylığından ötürü otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Prosesinde sıcak kalıp kullanılan bir profil çekme yöntemidir.

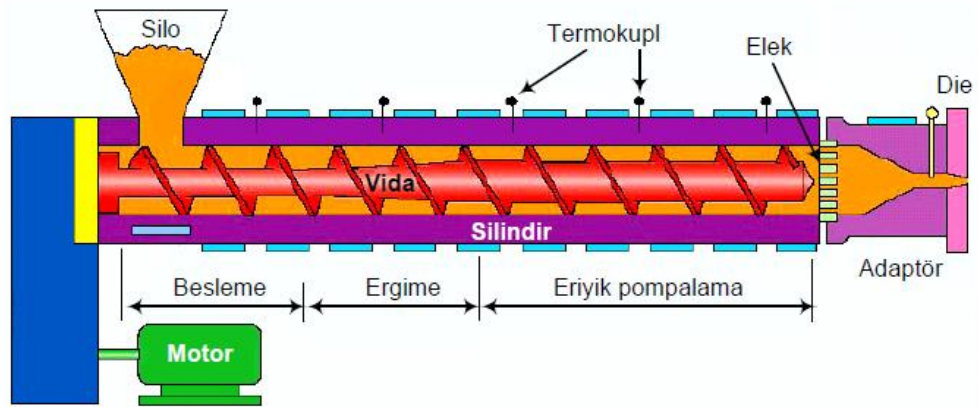
2.2.3.4. Termoplastik Kompozitlerin Tezgâh ile İşlenmesi

Termoplastik kompozitler klasik tezgâh takımları ile işlenebilirler. İşlemenin uygun sonuçlar vermesi için kullanılan takımların keskin olması ve çalışma devirlerinin yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca termoplastiklerin erime sıcaklıkları düşük olduğundan dolayı işleme sırasında soğutma sıvısı kullanılmalıdır. Aksi takdirde termoplastik malzemede deformasyonlar meydana gelmektedir.

Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, malzemenin basınç altında belirli profillerdeki matrisin içerisinde geçirilerek şekillendirme yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan makineye ekstrüder adı verilir. Ekstrüder kovan içerisinde dönen bir vidadan oluşmaktadır. Kullanılan plastik türü, granül geometrisi, plastik sıcaklığına göre vidanın devri ayarlanmaktadır. Ekstrüzyon, termoplastik kompozit şekil verme yöntemleri arasında en yaygın uygulananlardan biridir. Sıcak çekme ve soğuk çekme olarak iki tipte şekillendirme yapılabilir.

Ekstrüzyon prosesi şu şekilde gerçekleşmektedir; Granül haldeki malzeme bir havuzda ısıtılır ve yumuşama sağlanır. Sonsuz vida sistemiyle malzeme homojen hale gelir. Homojen hale gelen malzeme basınç etkisi ile ekstrüder kafasına bağlanan kalıba basılır. Elde edilmek istenen ürün geometrisine göre kalıplar değiştirilerek farklı ürünler üretilebilir.



Şekil 2.14. Ekstrüder şeması (Beşergil 2012)

2.2.3.5. Yeniden İşlenebilirlik

Termoplastik kompozitler, geri dönüşüm özelliklerinden dolayı endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Daha önce kullanılmış olan termoplastikler eritilerek eski haline dönüştürülebilirler. Yeni ürün olarak kullanmak adına, yeni kalıplarda şekil verilmektedir. Teorik olarak termoplastiklerin tekrar tekrar işlenebilme özelliği olduğu bilinse de bazı durumlarda termoplastiklerin termoset özelliği göstermektedir.

Belirli termoplastiklerde oluşan çapraz bağlanma, yeniden işlenebilirlik ve polimerizasyon derecesinin nasıl değiştiği, mekanik ve kimyasal özellikleri nasıl etkilediği araştırılmaktadır.

2.3. Kendinden Takviyeli (self-reinforced) kompozitler

Havacılık, otomotiv ve inşaat sektörleri başta olmak üzere diğer endüstri dallarının da talebi sonucu, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet değerleri nedeniyle polimer kompozitler özellikle termoplastikler önemli hale gelmiştir. Artan kullanım eğilimi, fiber takviyeli polimer kompozit malzeme bileşenlerinin geri dönüşümünü de önemli hale getirmiştir.

Cam ve karbon gibi elyafların geri dönüşümü mümkün olmadığı için kompozit malzemenin matris malzemesi termoplastik ise, ürün parçalanmalı ve düşük performanslı kısa elyaf takviyeli kompozit olarak kullanılmalıdır. Tekrar kullanılabilen elyaf takviyeli polimer kompozitlerin talebini karşılamak için polimer matris ile eriyebilen elyaflar kullanılmalıdır. Bu durum kendinden takviyeli kompozitlerin geliştirilmesine neden olmuştur. Performans maliyet dengesi ele alınarak çeşitli uygulama alanlarında kendinden takviyeli kompozitlerin geleneksel kompozitlerle rekabet edebileceği görülmüştür (Kmettya 2010).

Kendinden takviyeli kompozitlerde elyaf takviyesi ve matris malzemesi aynı malzemedен oluşmaktadır. Bu kompozitlerde elyafların yönlendirilmesi sonucu ürün elde edilmektedir ve polietilen tereftalat, poliamid, polipropilen gibi termoplastik polimerler bu ürünlerde kullanılmaktadır. Kullanılan termoplastik malzemeye göre nihai üründe elde edilen mekanik özellikler değişmektedir.

Polipropilen dışındaki malzemelerden üretilmiş kendi kendine takviyeli kompozitler henüz gelişim aşamasındadır ve piyasada bulunmamaktadır. Ayrıca kendi kendine takviyeli kompozitlerin rijitliğinin diğer kompozitlere göre fazla olduğu görülmüştür (Rein 2002). Bununla birlikte, mukavemet, darbe dayanımı, ısı altında şekil değiştirme sıcaklığı gibi mekanik özelliklerin de bu yöntemde geliştiği bilinmektedir.

2.3.1. Kendinden Takviyeli (Self-Reinforced) Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları

Kendinden takviyeli kompozitler elyaf takviyeli kompozitlerde geleneksel yöntemlere göre birçok avantaja sahiptir. Yüksek darbe dayanımı, geliştirilmiş geri dönüşüm kabiliyeti ve düşük ağırlık bu avantajlardan bazılarıdır. Geri dönüştürme işlemi kompozit malzemenin %100'üne uygulanabilmesi bu yöntemin en önemli avantajıdır.

Kendinden takviyeli kompozitlerde termoplastik kullanıldığı için geri dönüşüm işlemleri cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha kolaydır. Ürün ömrünün sonunda malzeme kolaylıkla eritilebilir ve granüller haline getirilebilir. Yeni ürün elde etmek için tekrar ısı verilecek istenen nihai ürün elde edilebilir.

Bu kompozitlerde en büyük ikinci avantaj yoğunluktur. Malzeme miktarı artsa da kompozitin yoğunluğu değişmeyeceği için, malzeme ağırlığında büyük bir artış olmamaktadır. Bu yöntemle çok hafif ürünler üretilebilmektedir.

Kendinden takviyeli kompozitlerde birçok avantaj olmasına rağmen bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlardan birincisi sıcaklık hassasiyetidir. Malzemenin geri dönüşümü sırasında takviye edilmiş malzemenin hasar görmemesi için matris malzemesi kontrol altına alınmalıdır. Bu işlem diğer geri dönüşüm işlemlerine göre nispeten daha zordur.

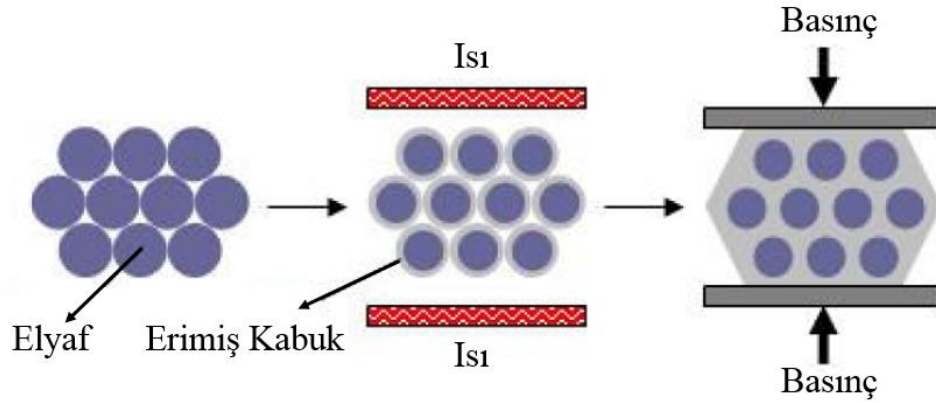
Termoplastikler yüksek sıcaklıklarda elverişli olmadıkları için bu yöntemle elde edilen ürünler de yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun değildir. Çünkü termoplastikler yüksek sıcaklıklarda kolay şekil değiştirmektedirler.

2.3.2. Kendinden Takviyeli (Self-Reinforced) Kompozitlerin Üretimi

Kendi kendine takviyeli kompozitlerin üretiminde iki yöntem bulunmaktadır. Bunlarda birincisi sıcak presleme, ikincisi ise koekstrüzyondur.

2.3.2.1 Sıcak Presleme

Sıcak presleme, yönlendirilmiş polimer bantların ısıtıldığı bir yöntemdir. (± 0.5 °) Bu yöntemde polimer bantların yaklaşık %10 erimektedir. Malzeme ısıtıldıktan sonra basınç uygulanmasıyla erimiş polimer sürekli bir matris oluşturmak için bantlar kafes içinde akar. Daha sonra matris tabakasının katılaşması ve sertleşmesi için yine basınç altında, malzeme soğutulmaktadır.



Şekil 2.15. Sıcak presleme prosesi (Morgan 2009).

2.3.2.2 Koekstrüzyon Prosesi

Bu yöntem sıcak presleme yöntemi kadar yaygın değildir. Yüksek oranda yönlendirilmiş polimer bantlar, seçilen polimerin erime sıcaklığına kadar haddelenir. Bu işlem sırasında aynı polimer grubunun düşük erime noktalı bir kısmı bant yüzeyinde ekstürüde edilir. Bu bantlar daha sonra bir kumaş olmak üzere dokunabilir.

2.4. Kompozit Malzemelerde Delik (Open-Hole) Etkisi

Son yıllarda büyük ölçekli kompozit yapılarda bağlantılı uygulamalar endüstride geniş yer kaplamıştır. Bağlantıya duyulan ihtiyaçların temel nedenleri; imalat kısıtlamaları ve yapısal bütünlük sağlama isteğidir (Mohammadi 2016).

Kompozitlerde kaynak ve yapıştırma yöntemi kullanılmakla beraber mekanik olarak bağlantı yöntemleri de günümüzde uygulanmaktadır. Mekanik bağlantı yöntemleri kompozitler için hem düşük maliyetlidir hem de daha fonksiyoneldir.

Kompozit malzemelerde delikli yapılarda, çekme basma gibi mekanik etkiler sonucu delik çevresinde gerilme yığılmaları oluşur. Gerilme yığılmaları çentik oluşturarak malzemenin mukavemetini azaltmaktadır (Awerbuck 1985). Deneysel incelemeler bir çentik çevresinde matris çatlaması ve delaminasyon gibi bazı hasar mekanizmalarının geliştiğini ortaya koymaktadır (Carlsson 1989). Bu hasarların boyutunu modelleme, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemleriyle kolaylıkla yapılabilir.

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Endüstride üretilen komponentlerin tasarım, analiz ve test evreleri vardır. Yapılan tasarımların fonksiyonelliğini ve ürünün performansını tespit etmek için analiz, test yöntemleri uygulanmaktadır. Testler için prototip ürünler gerekmektedir. Bu hem maliyetli hem de uzun zaman alan bir uygulamadır. Eğer tasarımsal bir problem varsa, analizler yardımıyla bu problem tespit edilebilmekte, komponent henüz tasarım aşamasındayken gerekli düzenlemeler yapılabilmektedir.

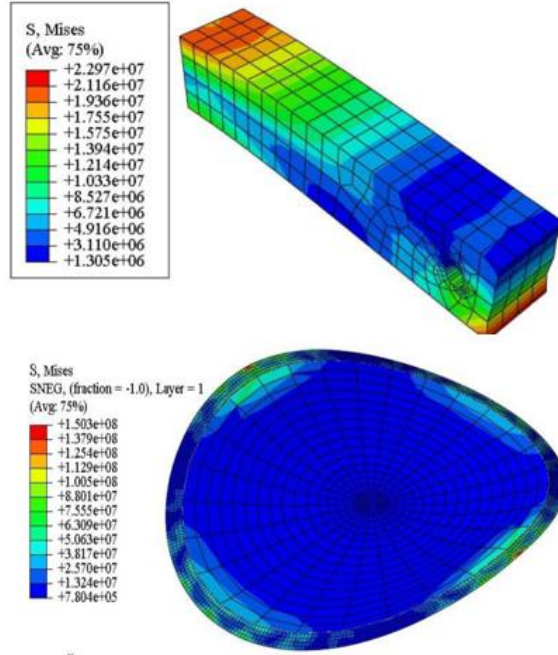
Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1943 yılında Richard Courant tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntem, ele alınan sistemi elemanlara bölerek geliştirilmiştir. Günümüzde bilinen sonlu elemanlar yöntemi de, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Top tarafından sunulmuştur. Bu yöntemde, perçin bağlantılı profil ve üçgenel iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanların bir uçağın analizinde kullanımı ele alınmıştır (Demir 2013)

Sonlu elemanlar yönteminin esası, uzun sürelerde çözülen problemlerin basite indirgenerek kısa sürelerde eşdeğer olarak çözümlenmesine dayanır. Problemlerin basite indirgenmesi sonuçların tam anlamıyla doğru çıkmasını engelleyebilir fakat genellikle iyi irdelenen problemler sonlu elemanlar yöntemiyle doğru sonuca yakınsamaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodlarının yazılım programlarıyla yapılmasıyla, daha kısa sürelerde doğru sonuca çok yakın değerler elde edilebilmektedir.

Bu yöntemde, çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı eleman çözüm bölgesini meydana getirmektedir. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (Demirsöz 2005).

Sonlu elemanlar yönteminde ele alınan sistem, sonlu sayıda elemana bölünerek bir eleman ağı oluşturulmaktadır. Bu elemanlar düğüm noktaları ile birbirine bağlanır. Daha sonra her eleman için gerekli diferansiyel denklemler yazılır. Bu diferansiyel denklemlerden bulunan değişken ifade her elemana uygulanır ve bir denklem takımı oluşturulur. Bu denklem takımının çözümü ise istenilen sonucu kullanıcıya göstermektedir. Yöntemin uygulama aşamasında eleman tipi, eleman geometrisi, sonlu elemanlar sayısı, düğüm noktalarının numaralarının yerleşimi ve problemin kaç boyutlu olarak ele alınacağı belirlenmelidir (Oldaç 2000).

Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı başlıca alanlar; yapısal problemler, akışkanlar mekaniği, ısı genleşme, yalıtım, dalga yayılımı, statik ve dinamik elastisite ve plastisite problemleri, gerilme analizleri, aerodinamik, balistik, yorulma analizleri, elektrik ve manyetik alanlar, olarak sıralanabilir.



Şekil 2.16. Bazı sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları.

Endüstride ve akademik alanda sonlu elemanlar yönteminin en geniş uygulama alanı gerilme analizi problemleridir. Gerilme analizi problemlerinde deplasman, kuvvet ve karma yöntem gibi üç yaklaşım bulunmaktadır. Deplasman yönteminde yer değişimleri, dönmeler ve deformasyonlar; kuvvet yöntemi yaklaşımında kuvvetler ve gerilmeler; karma yönteminde ise bilinmeyen veya serbest değişkenler çalışılmaktadır (Demir 2013).

Günümüzde sonlu elemanlar analizleri performansları yüksek bilgisayarlarda çeşitli yazılım programlarında yapılmaktadır. Yazılım programlarının bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yazılım programlarının avantajları şunlardır:

- Karmaşık geometriye sahip şekillerin basitçe incelenmesini sağlar. Çözümlemede değişik sonlu elemanlar kullanılabilir ve alt bölgelere bölerek çözümleme yapılabilir.
- Farklı özelliklerde doğrusal olmayan değişik ve karmaşık malzeme özellikleri rahatlıkla simülasyonlarda çalıştırılabilir.

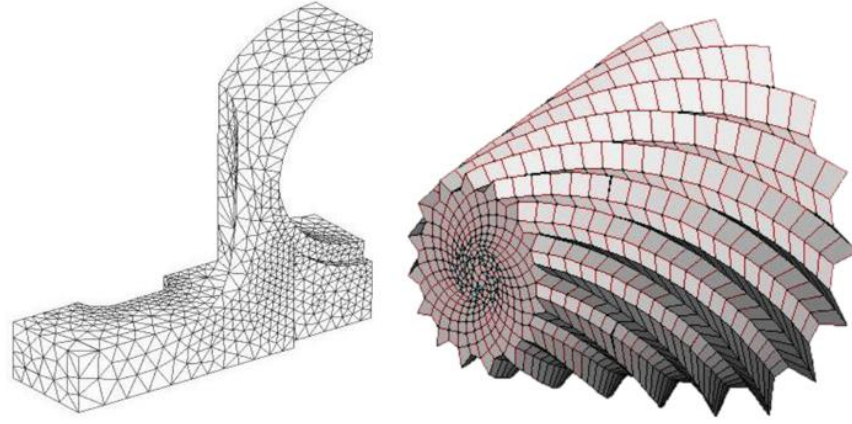
- Sürekli, süreksiz veya değişken yükler gibi sınır şartları, sistemlere uygulanarak parçanın gerçek koşullarındaki davranışlarını tahmin etmek için benzetim yapılabilir.
- Matematiksel olarak genişletilerek çok sayıda problemin çözümü için aynı model kullanılabilir.

Dezavantajlar da aşağıda sıralanmıştır.

- Bazı problemlere sonlu elemanlar modelinin uygulanmasında sınır koşulları benzetimi, elemanlarına ayırma gibi model kurma aşamalarında zorluklar yaşanabilir.
- Elde edilen verilerin doğruluğu girilen verilerin ve uygulanan yöntemin doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle veri girişlerinin dikkatli yapılması gerekmektedir. Problemin çözümünde uygulanacak yöntem, doğru tayin edilmelidir.
- Kabul edilebilir bir doğruluk için modelin elemanlara ayrıştırılması tecrübe gerektirir çünkü kötü veya yanlış eleman yapısı sonucun doğruluğunu olumsuz etkiler.
- Sonuca ulaşmak için zamana ve yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyaç vardır
- Bu yöntem bir yaklaşımdır. Tam olarak doğru sonuçlar veren bir yöntem değildir. Bu nedenle sonuçlar dikkatli yorumlanmalıdır (Bostancı 2002).

2.5.1. Sonlu Elemanlar Modeli Hazırlama

Sonlu eleman modeli hazırlanırken bazı detaylara dikkat edilmesi gerekir. Parçaların çözüm değerlerinin gerçek değerlere yaklaşık çıkabilmesi için modellemenin de gerçeğe yakın olması gerekmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizinde modelleme yaparken aşağıdaki detaylara dikkat edilmesi gerekir.



Şekil 2.17. Sonlu elemanlar ile modelleme örnekleri (Bostancı 2002)

- Modellenen parçanın ağ yapısı mümkün olduğu kadarıyla düzenli olmalıdır. Yükleme koşulları dikkate alındığında, gerilmelerin yoğun ve yüksek çıkacağı öngörülen bölgelerde daha sık bir ağ yapısı önerilir.
- Dörtgen yapıli elemanlar üçgen yapıdaki elemanlara göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedenle imkanlar dahilinde dörtgen yapıli elemanlar kullanılmalı, üçgen yapıli elemanlar tercih edilmemelidir. Eğer üçgen yapıli eleman kullanımı zorunlu ise, kenarların birbirleriyle olan oranlarına ve açılarının büyük olmasına dikkat edilmelidir. Bu durumda eşkenar üçgene yakın elemanların tercih edilmesi önerilmektedir.
- Elemanların kenar oranları model hazırlamada önemli bir husustur. Kenar uzunluklarının oranları deplasman hesaplamaları için 1/10, gerilme hesaplamaları için 1/5 oranını aşmamalıdır.
- Eğer analizi yapılacak olan yapı simetrik ise, modelleme tüm yapı için değil, yapının belli bir kısmı için yapılabilir. Bu durum modellemede avantaj sağlar.
- Anizotropik malzemelerde poisson oranı net bir şekilde tanımlanmalıdır. Kayma modülü ve elastik modül detaylı incelenmelidir.
- Büyük ve karmaşık sistemlerde gerilmelerin inceleneceği bölgeler dışındaki kalan yerlerin eleman ağ yapısı kaba olabilir. Gerilme değerlerinin inceleneceği bölgelere sık elemanların atılması modelle için yeterli olacaktır.

Bir sonlu elemanlar modeli hazırlarken, analizi yapılacak olan parça veya sistemin geometrisinin analize elverişli olmalıdır. Geometri temiz bir yapıda olmalı ve birbirine çok yakın çizgiler olmamalıdır. Eğer böyle bir durum varsa, geometri düzenlenmelidir. Çünkü birbirine yakın çizgiler geometriyi elemanlara bölerken karşımıza çıkacaktır. Bu durum beklenmedik yüksek gerilmeler oluşturabilir.

Bir sonlu elemanlar malzeme modeli hazırlanırken öncelikli aşama geometrinin analiz uygun olarak elde edilmesidir. Analizi yapılacak olan geometrinin temiz bir yapıda olması gerekmektedir. Birbirine çok yakın çizgilere sahip bir geometri varsa bu geometrinin temizlenmesi gerekir. Çünkü bu birbirine yakın çizgiler veya çok küçük radyüsler sonlu elemanlar modeli için geometriyi elemanlara bölerken önümüze çıkacaktır. Bu bölgelerde en boy oranı istenilen standartlarda olmayan küçük elemanlar oluşacaktır. Bu elemanlarda normal olmayan yüksek gerilmeler meydana gelebilir. Bu tekil gerilmeler analiz için doğru değerleri yansıtmayacaktır (Bostancı 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Deneysel Yöntem

Birçok endüstriyel alanda kullanımını artıran kompozit malzemelerin en önemli dezavantajlarından birisi de farklı malzemeler ile birleştirmesi esnasında meydana gelen mekanik kayıplardır. Bu nedenle gerek alternatif birleştirme teknikleri geliştirilmekte, gerekse standart birleştirme teknikleri ile birleştirilebilen kompozit yapılarda gerilme yığılması engellenmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle kompozit yapılarda delik bölgesinde yük esnasında meydana gelen gerilmelerin etkileri incelenmektedir.

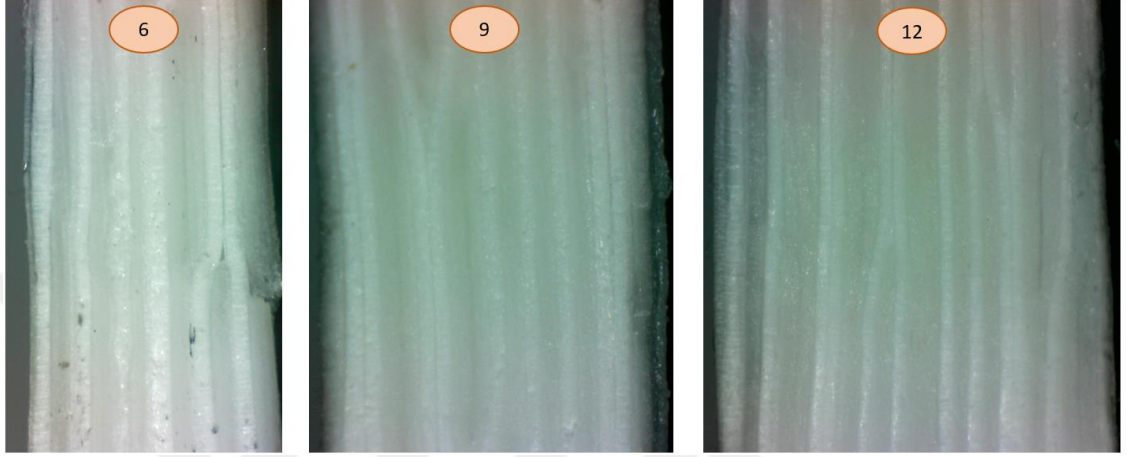
Bu çalışmada polipropilen esaslı kendinden takviyeli pre-preg kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla standart çekme deneyleri, delikli çekme deneyleri ve kayma deneyleri yapılmıştır. Delikli çekme deneyleri ile standart çekme deneyleri karşılaştırılarak delik çevresinde gerilme yığılmasından kaynaklanan mekanik kayıplar incelenmiştir. Ayrıca delik çevresinde kırılma esnasında meydana gelen hasar çeşitleri incelenmiştir. Standart ve delikli çekme verileri karşılaştırılarak deliğin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen malzeme sabitleri abaqus programına aktarılıp belirlenen analiz koşullarında delikli çekme test analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz esnasında meydana gelen gerilme yığılması çatlak başlangıç noktası ve maksimum gerilme değerleri delikli çekme testleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel olarak kullanılan kompozit prepreg plaka kendinden takviyeli olup matris ve takviye malzemesi olarak polipropilen polimer malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Polipropilen malzemenin mekanik özellikleri

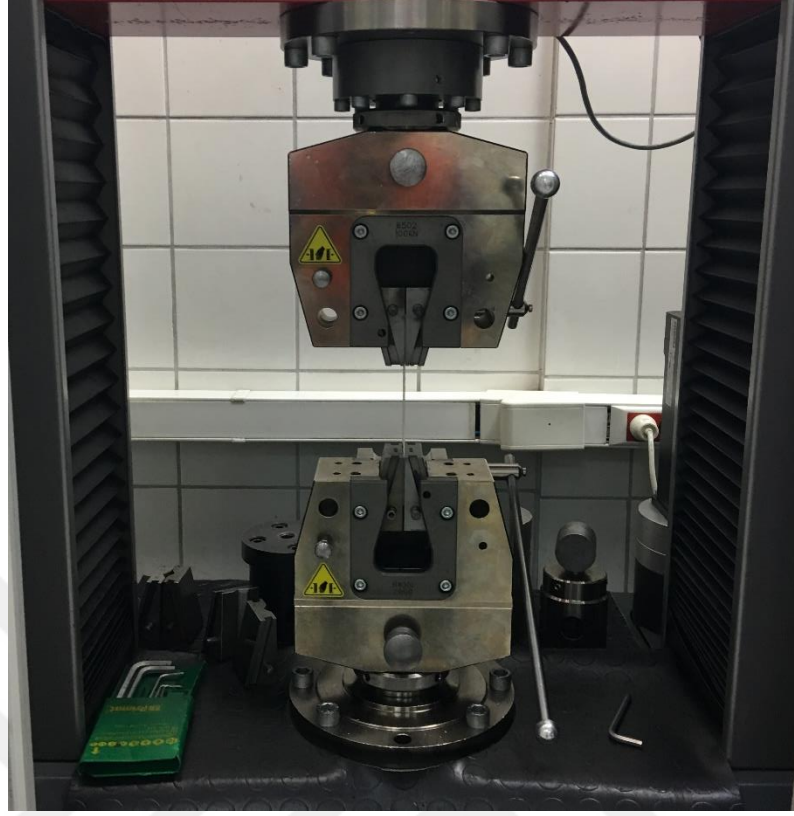
Matris ve Takviye Malzemelerin Mekanik Özellikleri						
Malzemeler	Yoğunluk (g/cm³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Charpy Çentik Darbe Dayanımı (kJ/m²)	Poisson Oranı
Polipropilen	0,90	23-33	110	43	14	0,45

Şekil 3.1’de gösterilen 6, 9 ve 12 katmanlı prepreg yapılar elde edilmiş olup her birisi için deneyler gerçekleştirilmiş ve katman sayısının yapının rijitliğine olan katkısı incelenmiştir.



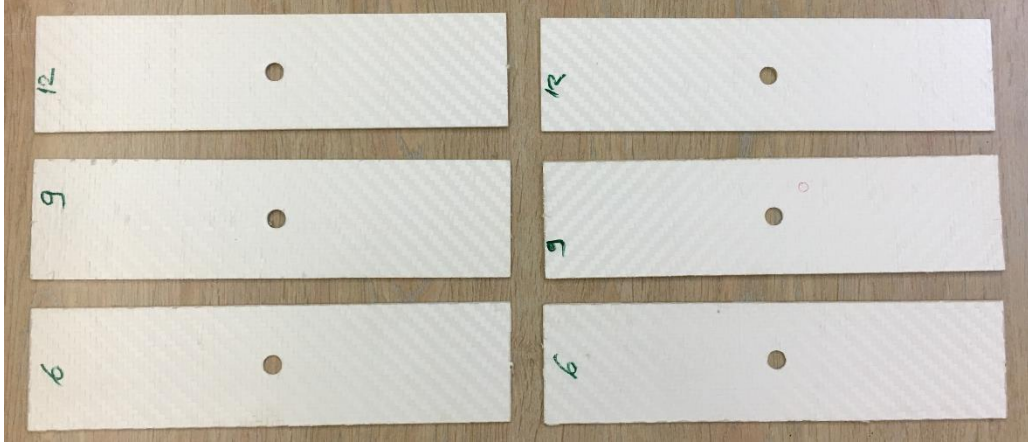
Şekil 3.1. Katmanları 6,9 ve 12 olan kendinden takviyeli pp termoplastik kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler diğer mühendislik malzemeleri gibi rijit malzeme olmadığından dolayı statik ve dinamik yükler altında elastik ve plastik şekil değiştirebilmektedir. Kuvvetler ve yükler altında malzemenin şekil değişimleri ve göstermiş oldukları tepki kuvvetleri malzemenin mekanik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Bu nedenle birçok mekanik test yapılmaktadır. Bu testlerden biri de çekme testidir. Çekme ve kayma deneyleri 100 kN ‘luk Zwickh marka çekme cihazında yapılmıştır. Deney cihazı şekil 3.2 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme Cihazı

Kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden birisi de çelik malzemelere alternatif malzemeler olarak kullanılmasıyla hafiflik sağlamasıdır. Fakat kompozit malzemeler gibi izotropik olmayan malzemelerde farklı eksenlerden gelen yüklemeler malzemede deformasyonlara ve delaminasyonlara yol açabilmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerinde kayıp yaşanmaktadır. Ayrıca bu malzemelerde standart bağlama yöntemleri kullanıldığında (civata pim vs.) delik çevresinde gerilme yığılması kaynaklı deformasyonlar görülmektedir. Bu durumda mekanik özelliklerinde kayba yol açabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada standart çekme ve delikli çekme numuneleri test edilmiş ve gerilme yığılması bölgesi, gerilme oluşumu gözlemlenmiştir. Delikli çekme numuneleri şekil 3.3 'de gösterilmiştir.



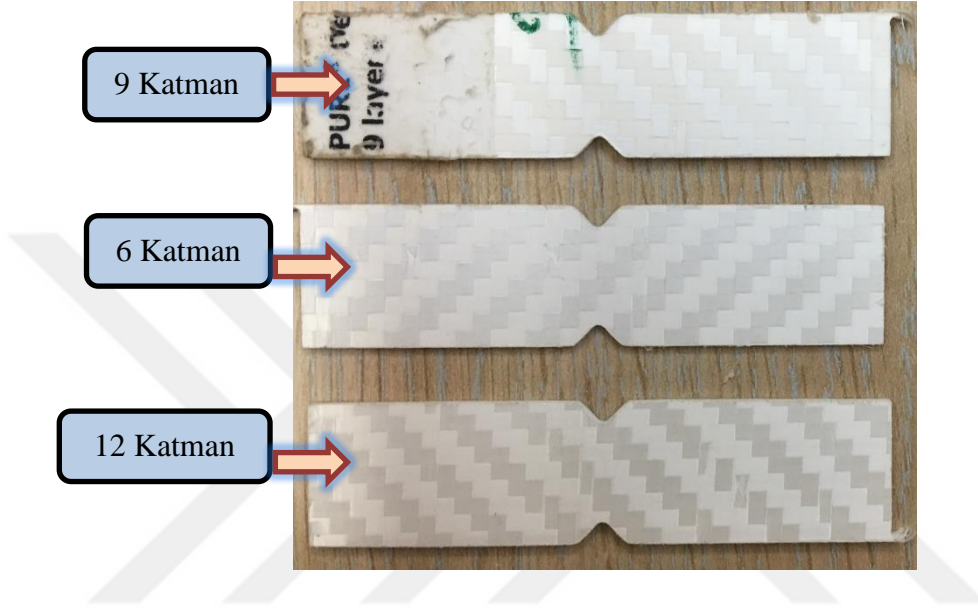
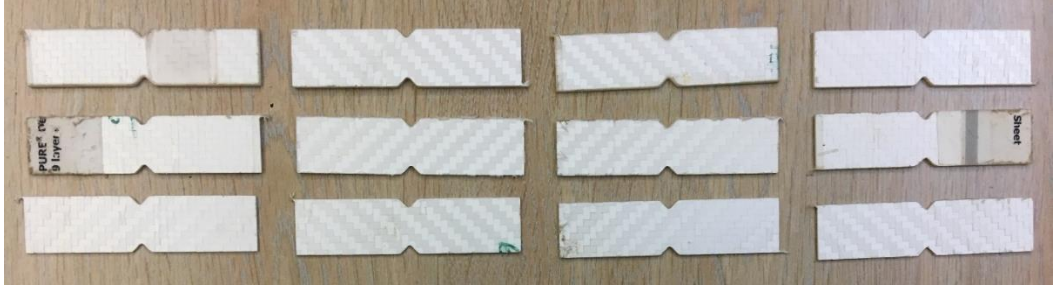
Şekil 3.3. Katmanları 6, 9 ve 12 olan çekme test numuneleri

Şekilde 3.4 te cihaz çenesine bağlanan test numuneleri görülmektedir. ASTM D5766 standartlarına göre hazırlanan delikli çekme numuneleri 200 mm x 50 mm x 0,85/1,27/1,7 mm boyutlarındadır. Delik çapı ise 8 mm 'dir.



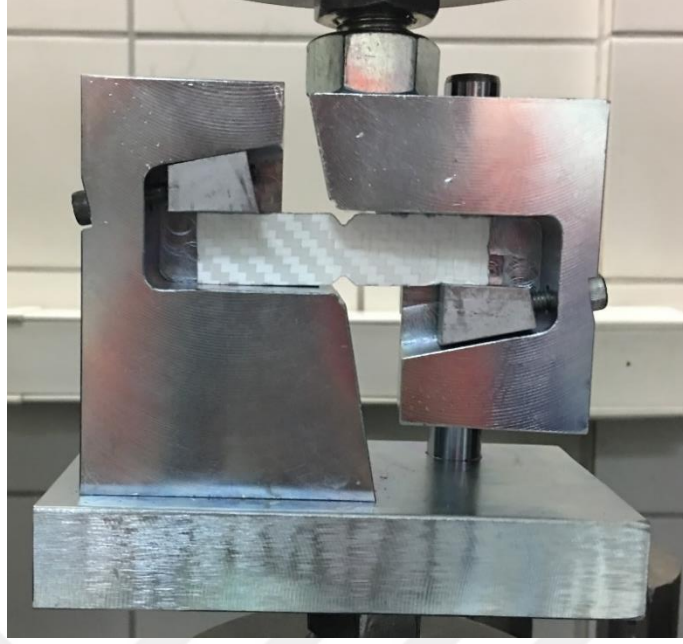
Şekil 3.4. Teste hazır delikli çekme numunesi

Deneyler için su jeti ile ASTM 5379 test standartlarına göre hazırlanan kayma test numuneleri şekil 3.5 'de gösterilmiştir. Numuneler 76 mm x 19mm x 0,85/1,27/1,7 mm boyutlarındadır.



Şekil 3.5. 6, 9, ve 12 katmanlı kayma test numuneleri

Kompozit malzemelerde kayma deneyleri konvansiyonel malzemelere göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle deneyler için özel olarak kayma aparatı üretilmiştir (şekil 3.6).

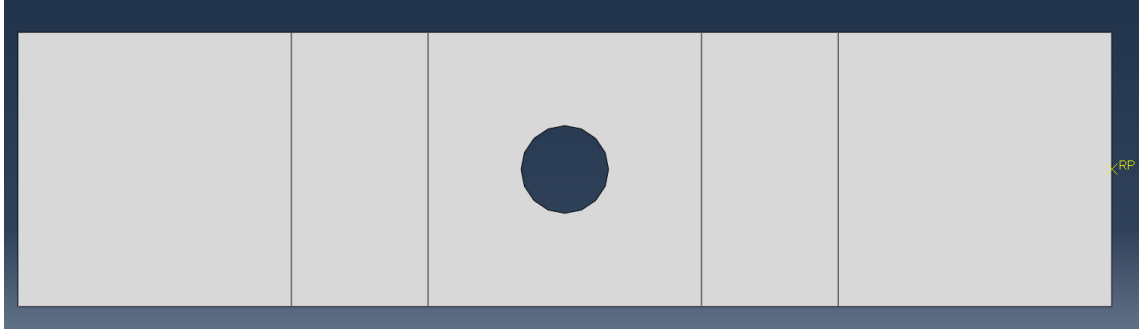


Şekil 3.6. Kayma test aparatı

3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

3.2.1. Delikli Çekme Testi için Ön İşlem Adımları

Bu bölümde Abaqus® yazılımı kullanılarak kendinden takviyeli polipropilen kompozit malzemenin delikli çekme testi benzetim çalışması için sonlu elemanlar modeli kurulumu anlatılmıştır. Çekme numunesi için oluşturulan geometri 3 boyutlu uzayda kabuk olarak oluşturulmuştur. Şekil 3.7 gösterildiği gibi delikli çekme testi numunesi boyutları 200x50 mm olarak modellenmiştir. Delik etrafından görülen ayırma çizgileri ağ yapısının daha kaliteli ve sık olarak atılması için kullanılmıştır. Kalınlık olarak ise 12 katmanlı kompozit plaka için her bir katman kalınlığı 0.142 mm olacak şekilde kesit kısımandan tabakalı kompozit tanımı yapılmıştır. Şekil 3.7 de ise kabuk geometrisi için kompozit kesit tanımlanması gösterilmektedir. [0/90] istifinde olacak şekilde 12 katmanlı kompozit kesiti oluşturulmuştur ve bu kesit kabuk geometrisine atanmıştır.



Şekil 3.7. Delikli çekme testi numunesi

Kullanılan malzeme olarak ‘SelfPP’ adında bir malzeme kartı oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri üretici firmanın vermiş olduğu veri sayfasından alınmıştır. Ayrıca yapılan deliksiz çekme testi sonucunda elde edilen elastik malzeme sabitleri hesaplanmıştır. Çözücü olarak Abaqus/Standart çözücüsü kullanılmıştır. Çözüm adımında step time olarak 1 girilmiştir. Zaman artım miktarı olarak başlangıç adımı 0.1 seçilmiştir. Analiz sonucunda çıktı olarak ise eşdeğer gerilmeler, uzamalar, toplam gerinim, logaritmik gerinim, reaksiyon kuvvetleri istenmiştir. Her bir çözüm ilerlemesi olarak sonuç verilmesi program çıktıları üzerinden istenmiştir (Şekil 3.8).

Edit Section

Name: Section-1
Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration: During analysis Before analysis


Layup name:

Basic **Advanced**

Thickness integration rule: Simpson Gauss

Symmetric layers

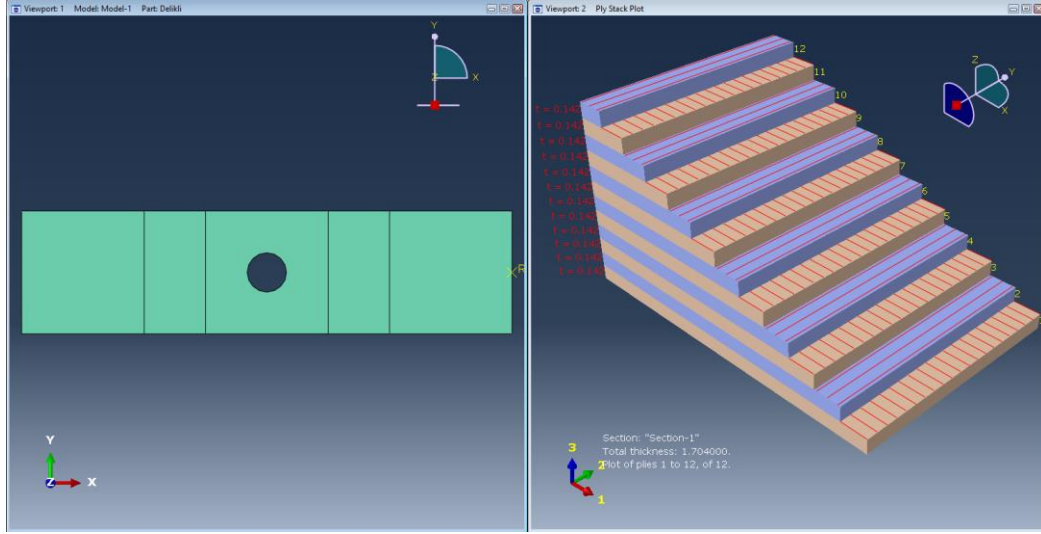
Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
SelfPP	0.142	0	3	1
SelfPP	0.142	90	3	2
SelfPP	0.142	0	3	3
SelfPP	0.142	90	3	4
SelfPP	0.142	0	3	5
SelfPP	0.142	90	3	6
SelfPP	0.142	0	3	7
SelfPP	0.142	90	3	8
SelfPP	0.142	0	3	9
SelfPP	0.142	90	3	10
SelfPP	0.142	0	3	11
SelfPP	0.142	90	3	12

Options: 

OK Cancel

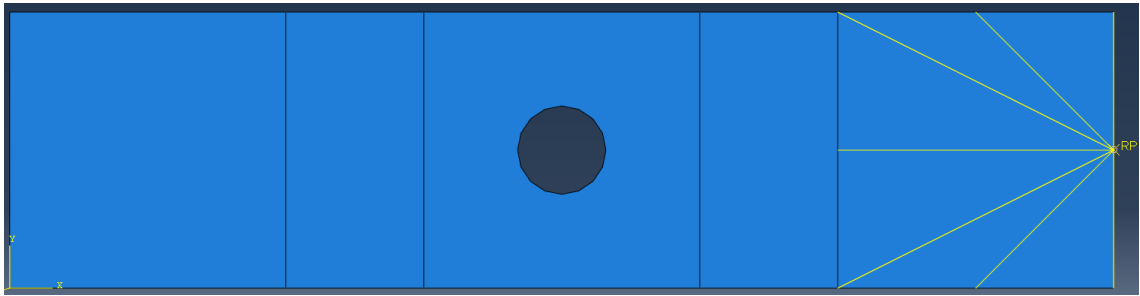
Şekil 3.8. Çekme testi için kompozit kesit tanımlanması

Şekil 3.9’te ise kabuk eleman için 12 katmanlı kendinden takviyeli polipropilen kompozit malzeme için katmanlar görsel olarak gösterilmiştir. 12 katmanlı kompozit malzemenin her bir katmanı 0.142 mm olarak toplam 1.7 mm olarak programa tanıtılmıştır.



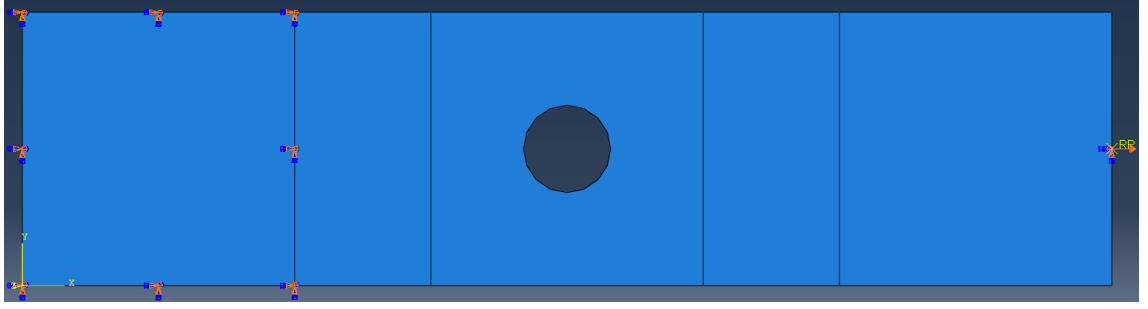
Şekil 3.9. 12 katmanlı delikli çekme numunesi

Sınır şartları olarak çeneler tarafından tutulan alt bölge için tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. Çekme çenesi tarafından çekilen bölge için ise bir referans noktası numunenin uç noktasına tanımlanmış ve bu nokta üst bölgeye etkileşim araç çubuğu kullanılarak her bir düğüm noktası kinematik olarak bu referans noktasına bağlanmıştır. Ayrıca bu referans noktasına çekme yönünde serbest hareket edebilecek şekilde bir sınır şartı atanmıştır. Şekil 3.10'te referans noktası ve bu noktanın üst bölgede düğüm noktalarına geometrik olarak bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Üst bölge sınır şartı bağlantısı

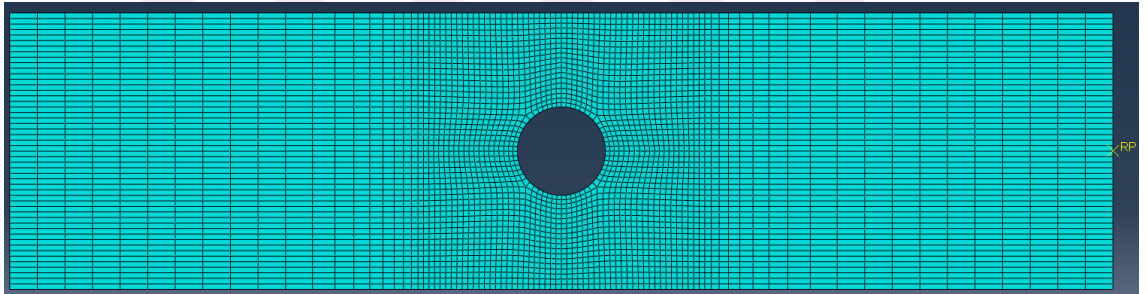
Yükleme olarak referans noktasından çekme yönünde deplasman sınır şartı uygulanmıştır. Uygulanan deplasman değerleri analizin yakınsama durumuna göre değiştirilmiştir. Şekil 3.11'te ise delikli çekme numunesi için sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Delikli çekme numunesi için sınır şartları

3.2.2. Delikli Çekme Testi için Ağ Yapısı

Delikli çekme numunesi için ağ yapısı Abaqus® yazılımının ağ modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Numune üzerinde delik etrafından oluşturulan bölümler delik etrafında daha ince ve kaliteli ağ yapısı oluşturulmak için yapılmıştır. Şekil 3.12’de ise numunenin ağ yapısı gösterilmiştir ve küçük kenar ayırımı olarak 1mm, en büyük ise 5 mm olarak girilmiştir.



Şekil 3.12. Delikli çekme numunesi ağ yapısı

Toplam düğüm noktası sayısı: 4528

Toplam eleman sayısı: 4360

4360 S4R lineer quadrilateral eleman kullanılmıştır.

Delikli çekme parçası için ağ yapısı bilgileri;

S4R elemanlar: 4360

Kesit Oranı > 10: 0 (0%)

Ortalama kesit oranı: 2.28

En kötü kesit oranı: 5

En kısa kenar < 0,01: 0 (0%)

Ortalama en kısa kenar: 0.983

En kısa kenar: 0.769

Katman kalınlığının ve delik boyutunun malzeme mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek için; 6,9 ve 12 katmanlı malzemeler için delik yarıçapları 2mm, 4mm ve 8 mm olacak şekilde yukarıda adımlar uygulanarak analizler yapılmıştır.

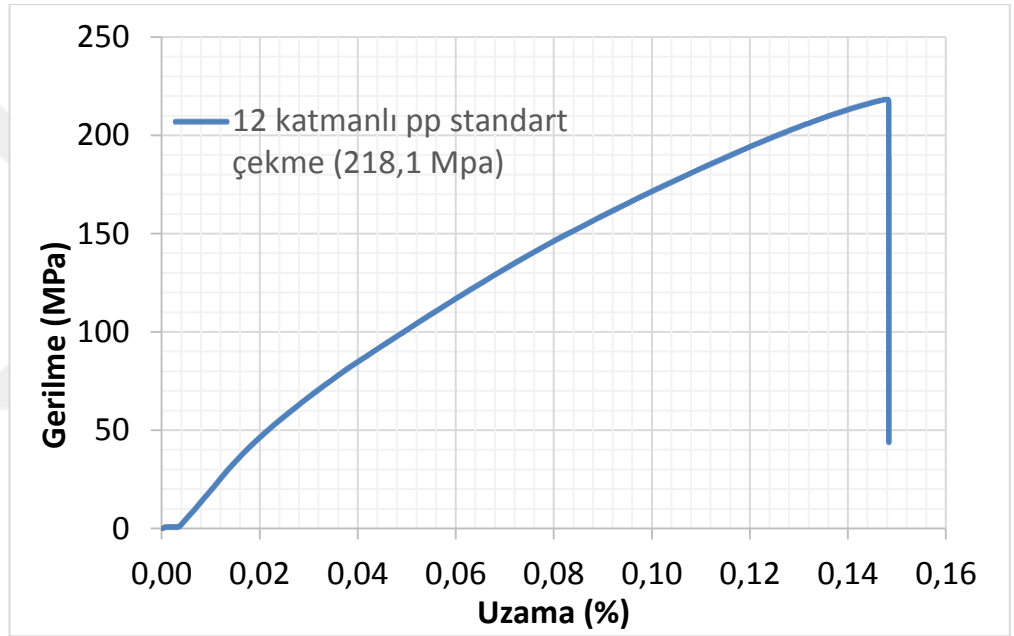


4. BULGULAR

4.1. Deneysel Sonuçlar

- **Standart ekme Deney Sonuçları**

Standart ekme Deneyleri ile malzemelerin statik yük altında elastik ve plastik Şekil değişimleri belirlenebilir. Deney numuneleri standartlara uygun olacak Şekilde 250 mm x 25 mm x 0,85/1,27/1,7 mm boyutlarında hazırlanmıŐtır. 5 mm/dk sabit hızla uygulanan statik yük sonucunda 218,1 MPa ekme gerilmesi elde edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin çekme deney sonuçları

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarından cam veya karbon elyaf yükleri altında oldukça gevrek davranır ve kullanıldığı kompozit malzemede oldukça dŐuk uzama değerleri görülmesine neden olur. Bu çalışmada kullanılan kendinden takviyeli kompozit malzemeler de ise diğer kompozit malzemelere oranla doğrusal olmayan eğri elde edilmiş olup kırılma daha sünektir.

Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.' te 12 katmanlı malzemede standart çekme deneyi sonrası meydana gelen hasar görülmektedir.



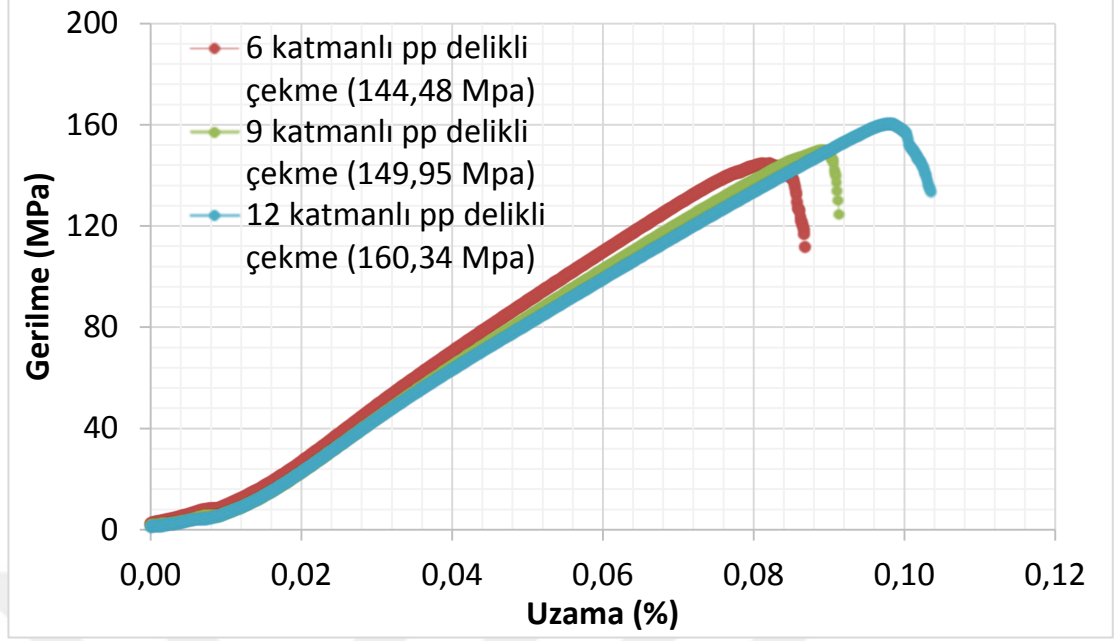
Şekil 4.2. Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin standart çekme deney sonuçları



Şekil 4.3. Kendinden takviyeli 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin standart çekme deney sonuçları

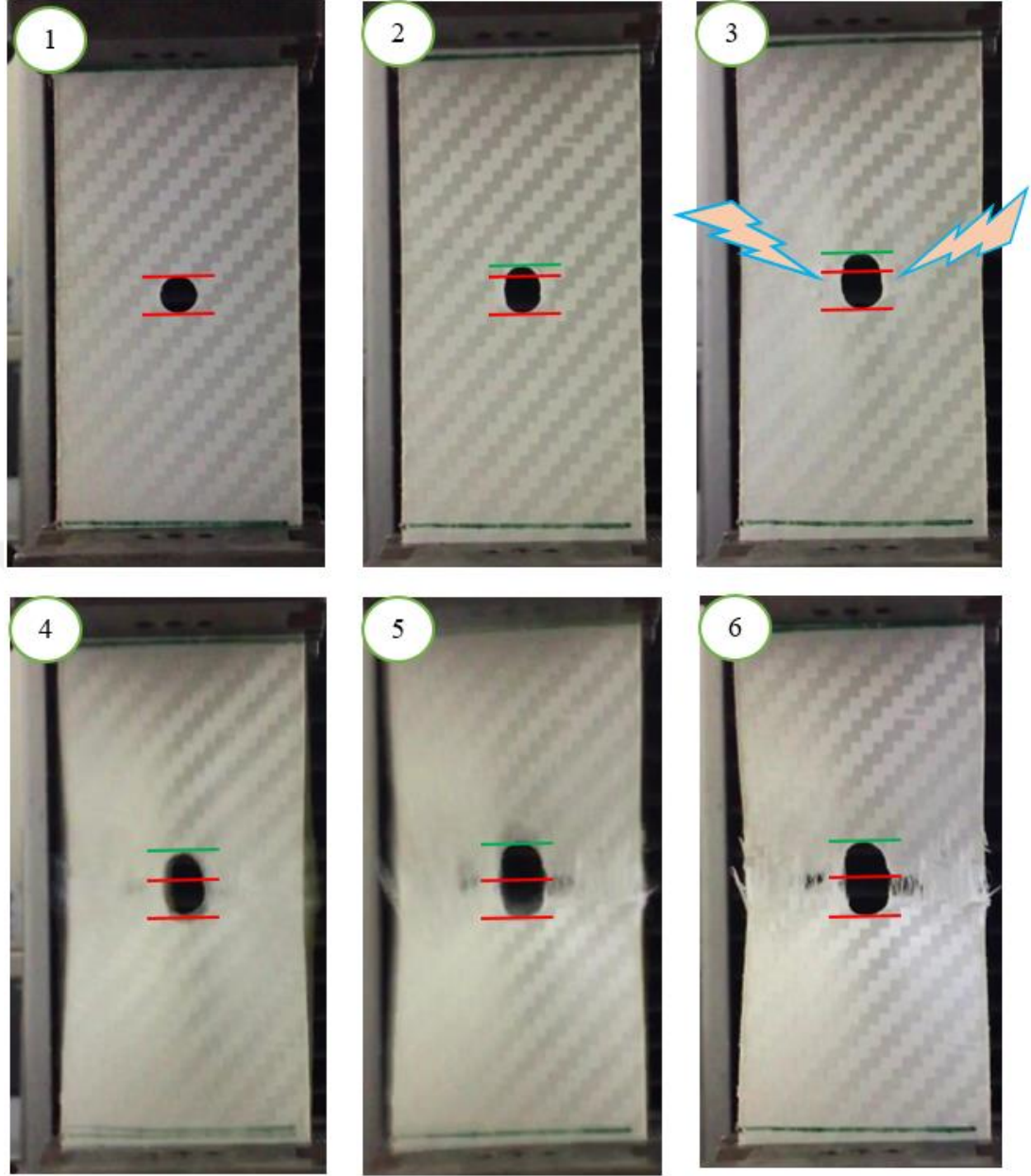
- **Delikli Çekme Deney Sonuçları**

Kompozit malzemelerin kullanılmasıyla standart bağlama yöntemlerinin kullanımı azalmaktadır. Bunun nedeni gerilme yığılmasıdır. Bu durum maliyet ve zaman açısından olumsuz etkiler meydana gelmektedir. Dolayısıyla çekme numunelerinin çekme sonuçları önem arz etmektedir. Bu çalışmada 5 mm/dk sabit hızla uygulanan statik yük sonucunda sırasıyla 12, 9 ve 6 katman için sırasıyla, 160.34, 149.95 ve 144.48 MPa çekme gerilmesi elde edilmiştir (Şekil 4.4).



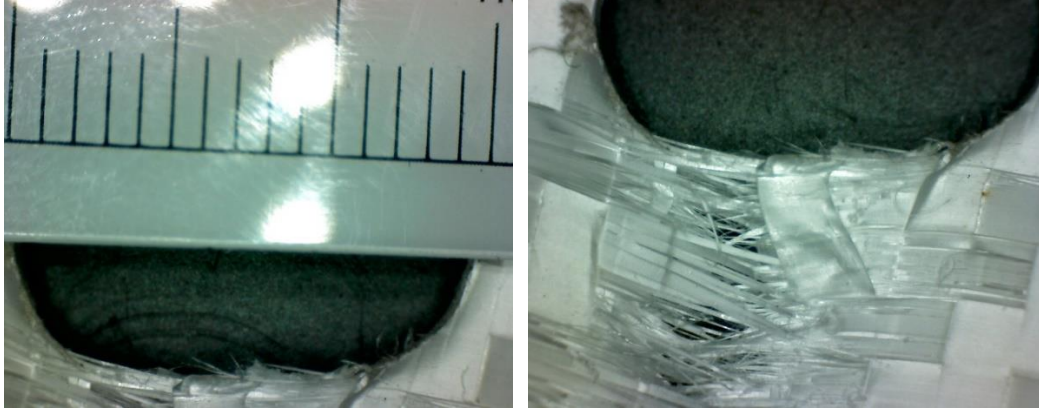
Şekil 4.4. Kendinden takviyeli 6, 9 ve 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin delikli çekme deney sonuçları

Delikli çekme deney sonuçları incelendiğinde delik çevresinde meydana gelen gerilme yığılması sonucunda malzemede gerilme kaybı gözlemlenmiştir. Malzeme deney esnasında delik çevresinden (gerilme yığılması bölgesi) dışarı doğru kırılma gerçekleşmiştir (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Delikli çekme deneyi kırılma esnasında gerilme yığılması bölgeleri ve malzeme davranışı

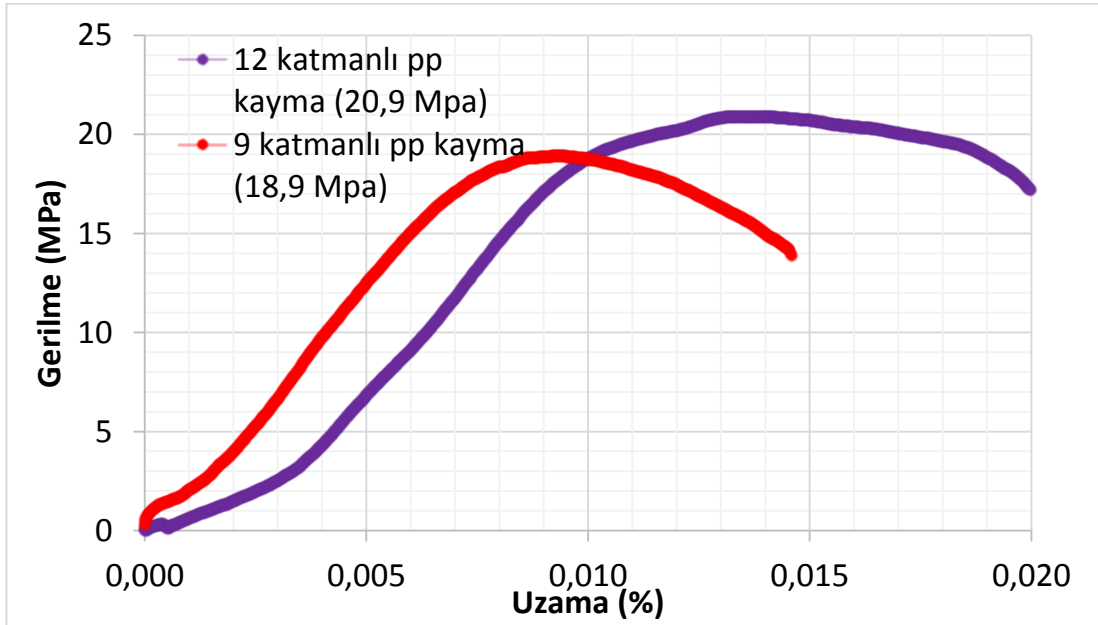
Kompozit plakaların deney esnasında katmanlara göre 8 ile 10 mm arasında uzama gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.6.). Standart çekme numunesinde ise yaklaşık 15 mm uzama görülmektedir.



Şekil 4.6. Delikli çekme deneyi kırılma esnasında gerilme yığılması bölgeleri ve malzeme davranışı

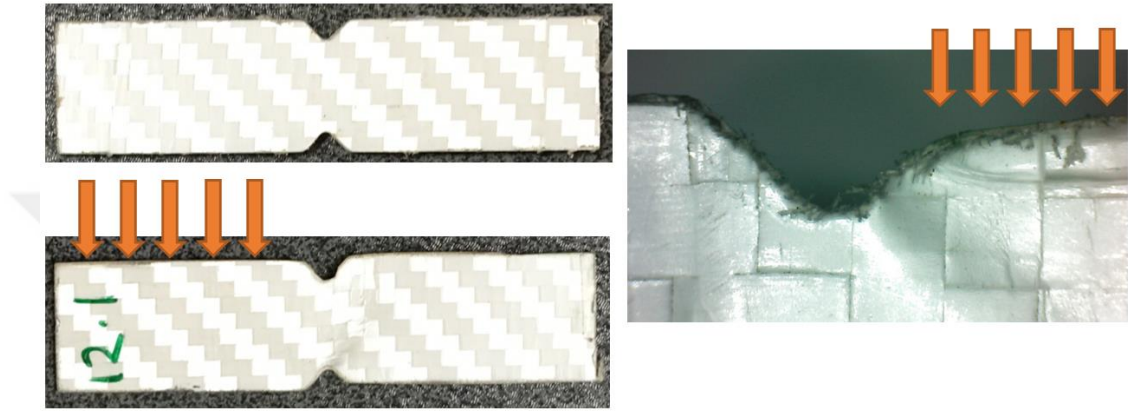
- **Kayma Denev Sonuçları**

Kayma deneyleri 12 ve 9 katmanlar için sırasıyla 20,9 MPa ve 18,9 MPa gerilme değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 4.7.). 9 katmanlı deney numunesi yaklaşık 0,9 mm anında tam deformasyona uğrarken 12 katmanlı deney numunesi 1,4 mm uzama anında tam deformasyona uğramıştır.



Şekil 4.7. Kendinden takviyeli 9 ve 12 katmanlı Pp kompozit malzemelerin kayma deney sonuçları

Sabit hızda gerçekleştirilen deneylerde statik yüklerin uygulanmasıyla malzeme kaymaya zorlanmıştır. Bu esnada fiber ile matris malzemesi aynı malzemeden üretildiğinden dolayı tabakalar arasında delaminasyonlar meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Burada farklı takviye elemanları ile üretilen kompozit malzemelerde sıklıkla karşılaşılan fiber ara yüzey ıslanma sorununun ortadan kalktığı görülmüştür (Şekil 4.8.).

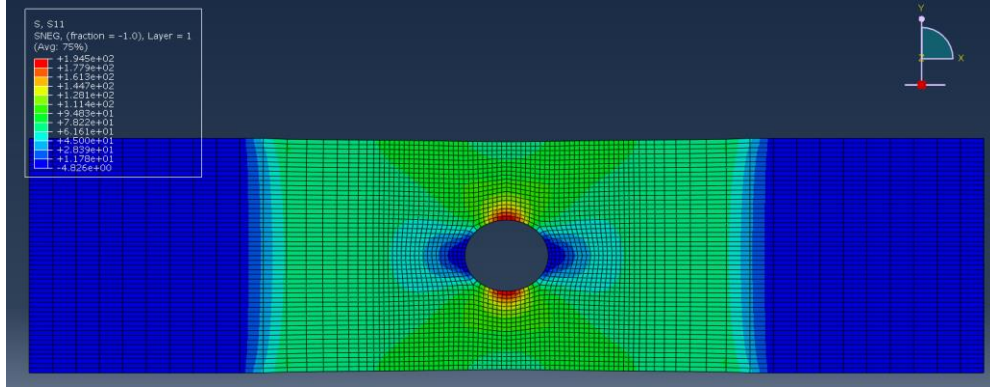


Şekil 4.8. Kendinden Pp takviyeli kompozit malzemelerin kayma deneyi esnasında şekil değişimleri

4.2. Sonlu Elemanlar Sonuçları

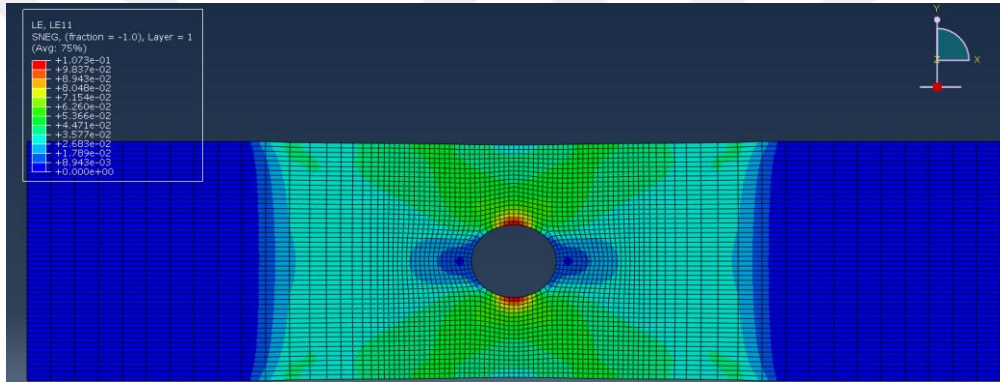
12 Katmanlı Kompozit Malzeme Analiz Sonuçları

Delikli çekme numunesi statik analiz sonuçları bu bölümde incelenmiştir. 6,9, ve 12 katmanlı malzemelerin delik yarıçapı 2mm,4mm ve 8 mm olacak şekilde analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Gerilme – gerinim eğrileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Delik etrafındaki gerilme yığılması incelenmiştir. Şekil 4.9.’da 12 katmanlı ve delik yarıçapı 8mm olan malzemenin çekme yönündeki eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Çekme yönündeki nominal gerilme dağılımı

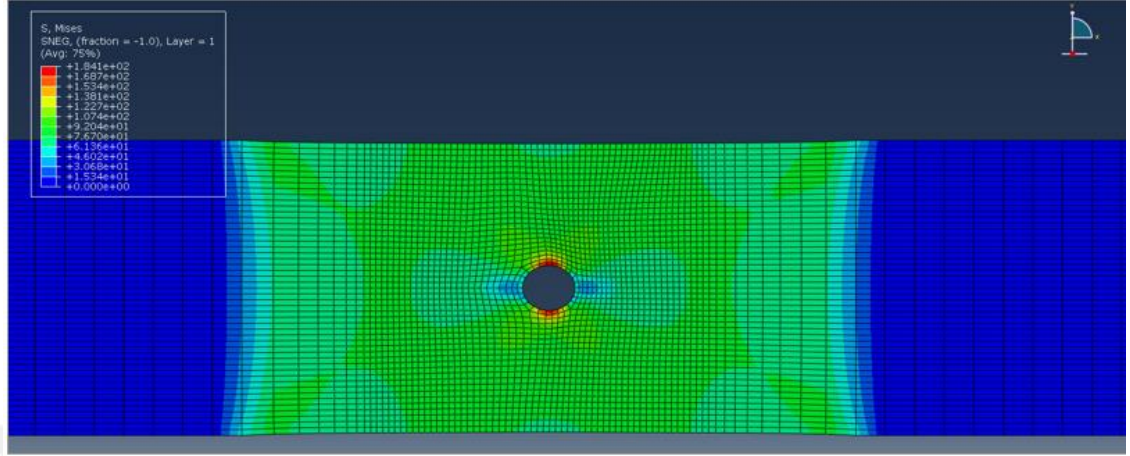
Şekil 4.10.'da ise çekme yönündeki logaritmik gerinim dağılımı gösterilmiştir.



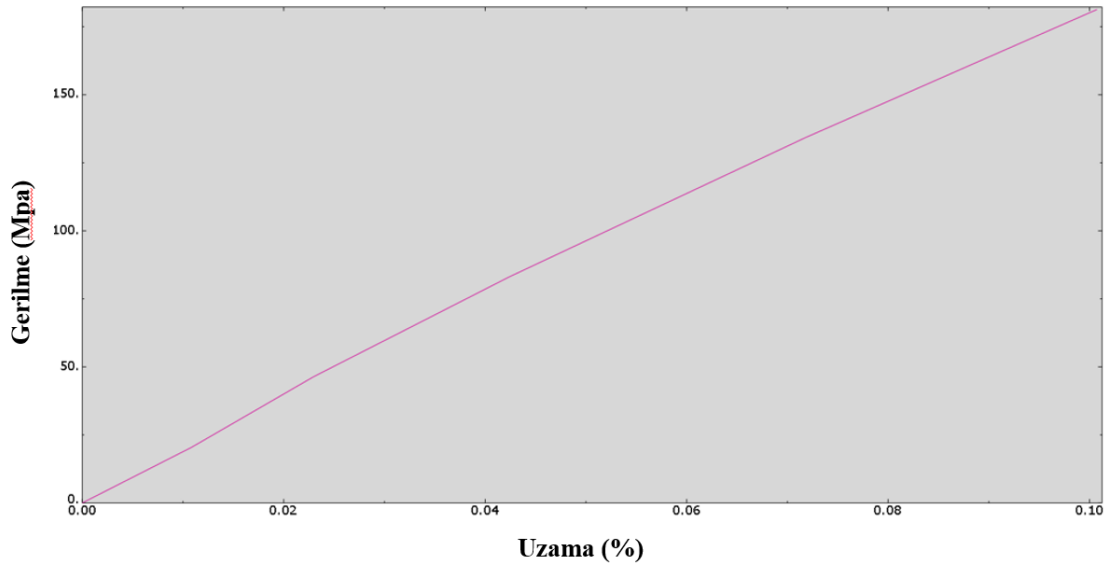
Şekil 4.10. Çekme yönündeki logaritmik gerinim dağılımı

Analiz ön işlemleri yapılırken malzeme kartından herhangi bir hasar kriteri gerilme değeri girilmediğinden hasar ilerlemesi incelenmemiştir. Elastik bölgeler üzerinden deneysel olarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Delik etrafındaki elemanlardan biri olan 1777 numaralı elemandan alınan gerilim-gerinim değerleri okunmuş ve Abaqus® yazılımının görüntüleme modelinde gerilim-gerinim grafiği çıkarılmıştır.

Şekil 4.11.'de 12 katmanlı ve yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



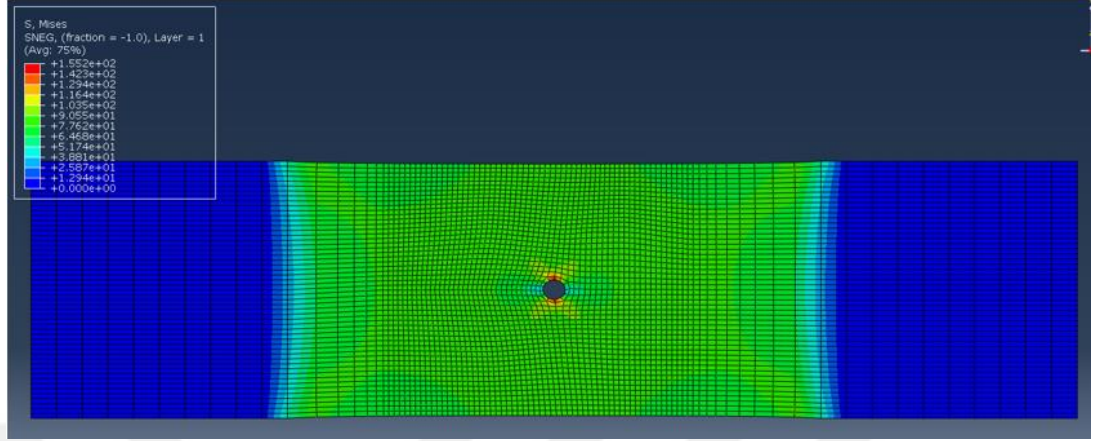
Şekil 4.11. 12 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu



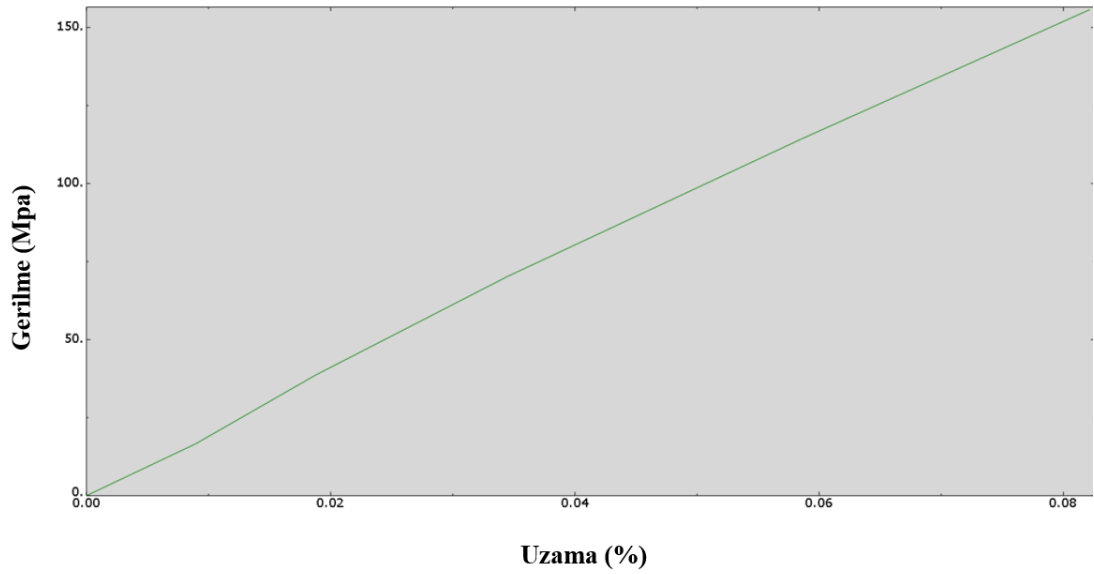
Şekil 4.12. 12 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri.

Maksimum gerilme 181.33 MPa ve maksimum gerinim 0.100735 bulunmuştur.

Şekil 4.13.'de 12 katmanlı ve delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.13. 12 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu

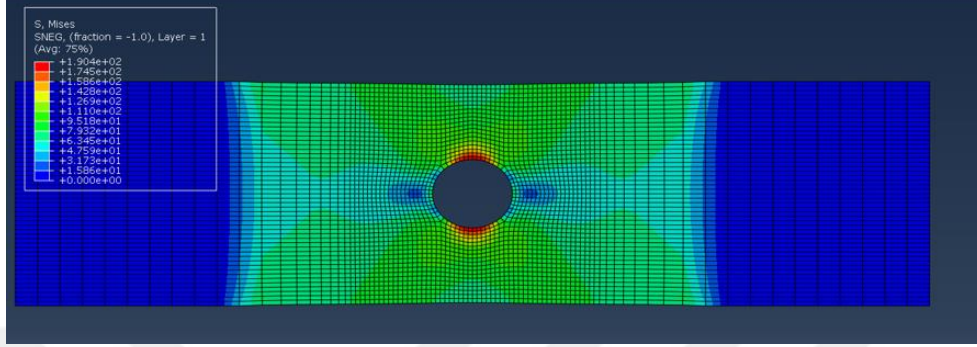


Şekil 4.14. 12 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri.

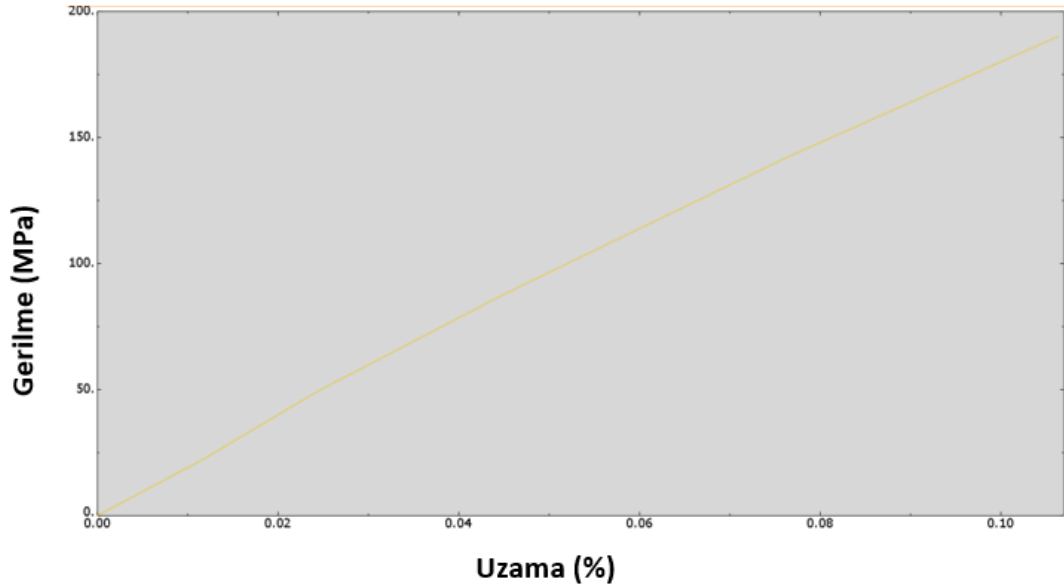
Maksimum gerilme 155.75 MPa ve maksimum gerinim 0.0821702 bulunmuştur.

9 Katmanlı Kompozit Malzeme Analiz Sonuçları

Şekil 4.15'te 9 katmanlı ve delik yarıçapı 8mm olan kompozit malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



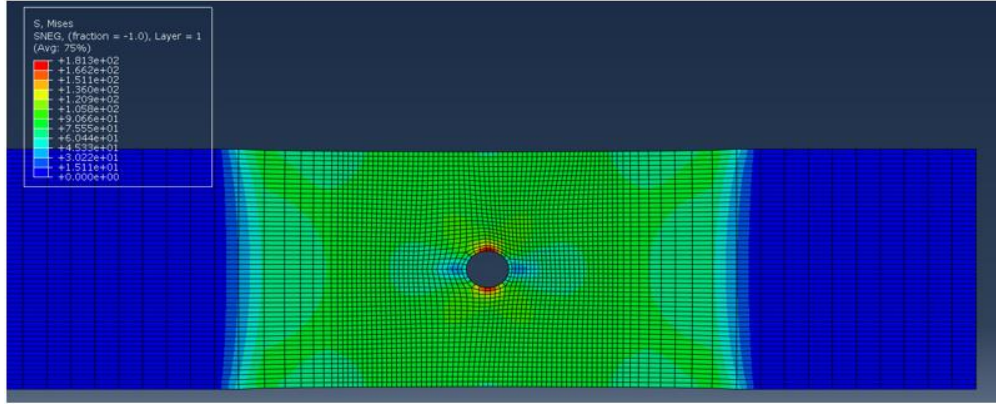
Şekil 4.15. 9 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz sonucu



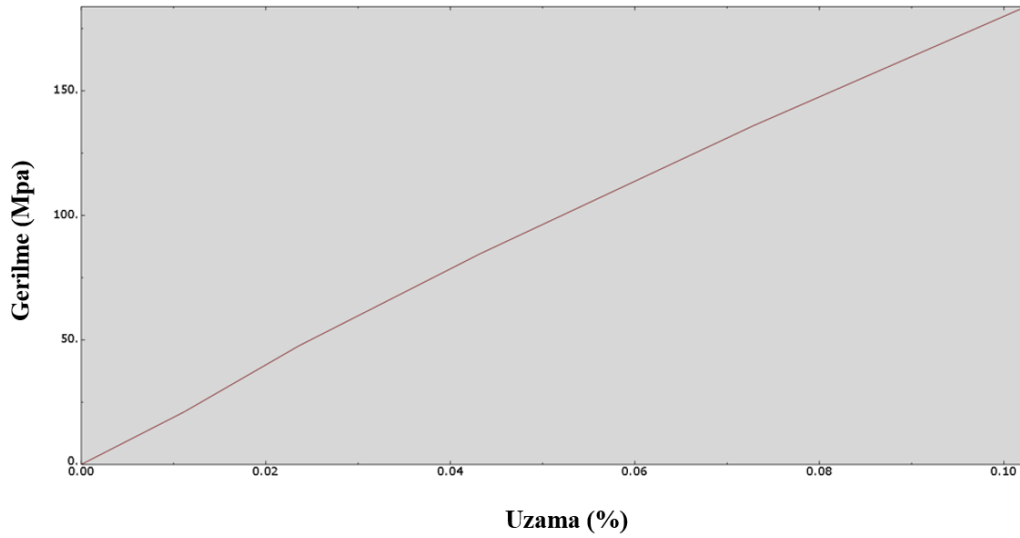
Şekil 4.16. 9 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz değerleri

Maksimum gerilme 190.302 MPa ve maksimum gerinim 0.106431 bulunmuştur.

Şekil 4.17'de 9 katmanlı ve delik yarıçapı 4mm olan kompozit malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



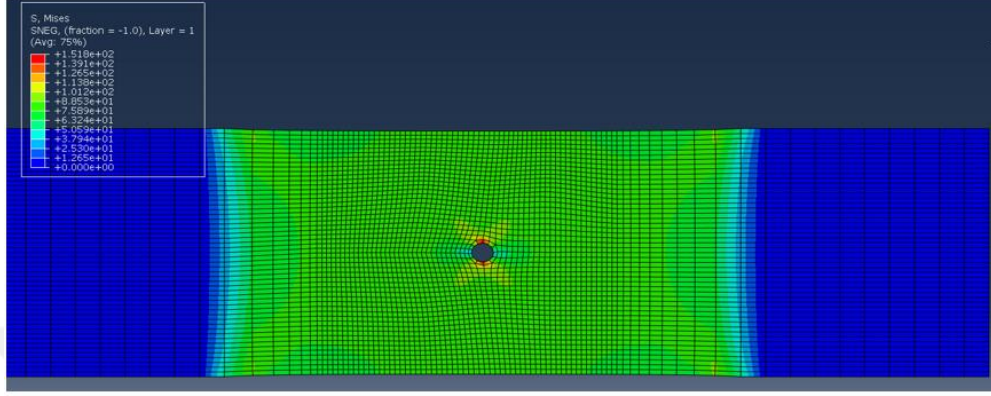
Şekil 4.17. 9 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu



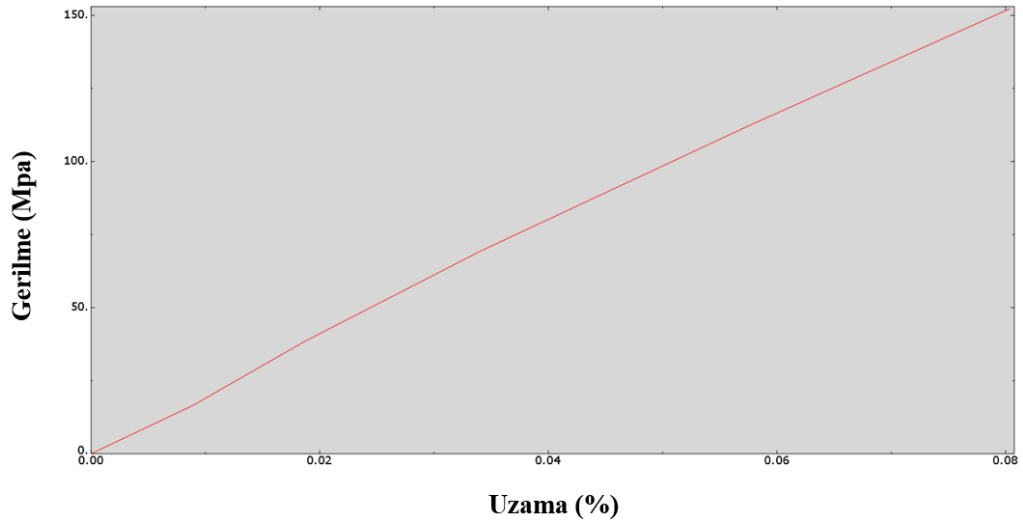
Şekil 4.18. 9 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri

Maksimum gerilme 182.903 MPa ve maksimum gerinim 0.101851 bulunmuştur.

Şekil 4.19'da 9 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.19. 9 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu

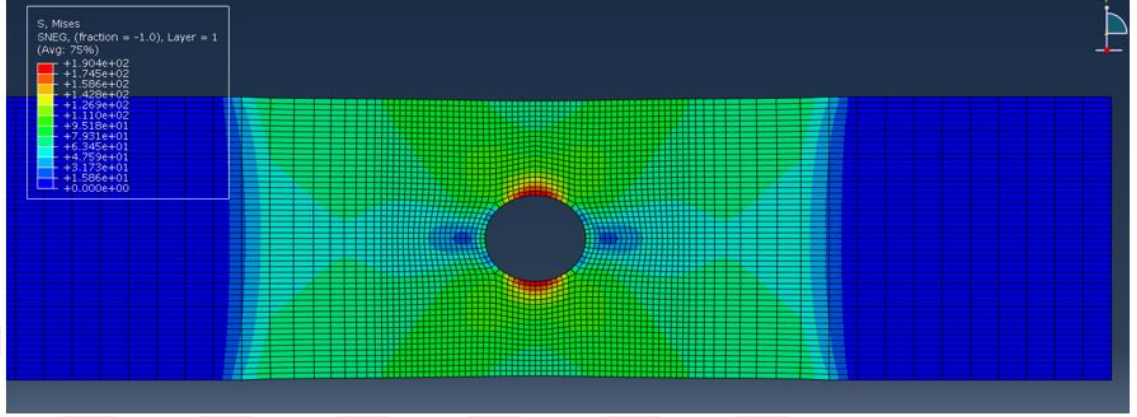


Şekil 4.20. 9 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri

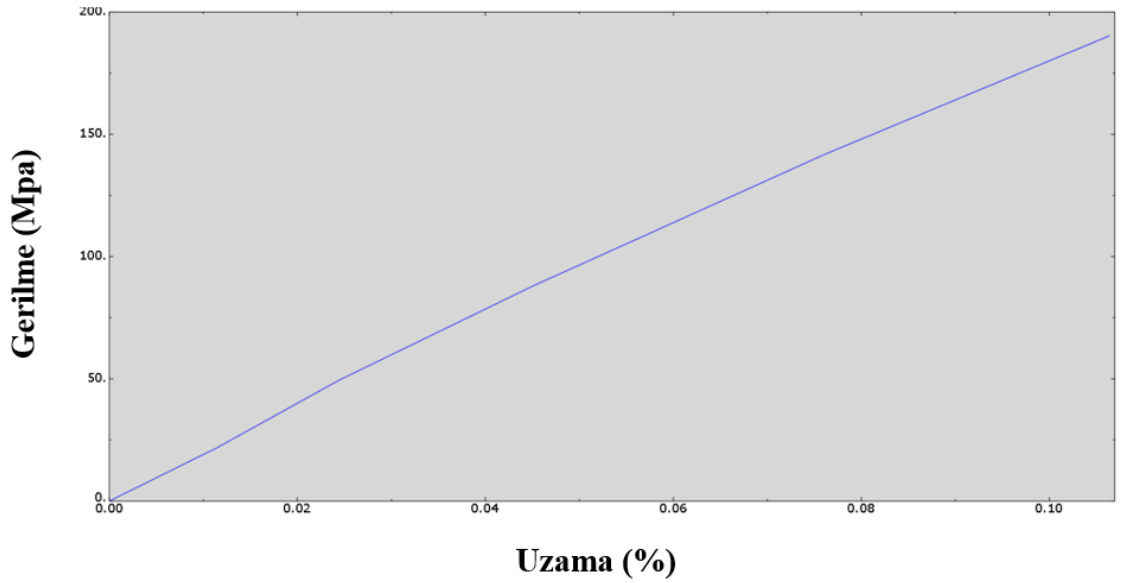
Maksimum gerilme 152.257 MPa ve maksimum gerinim 0.0803631 bulunmuştur.

6 Katmanlı Kompozit Malzeme Analiz Sonuçları

Şekil 4.21'de 6 katmanlı ve delik yarıçapı 8mm olan kompozit malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



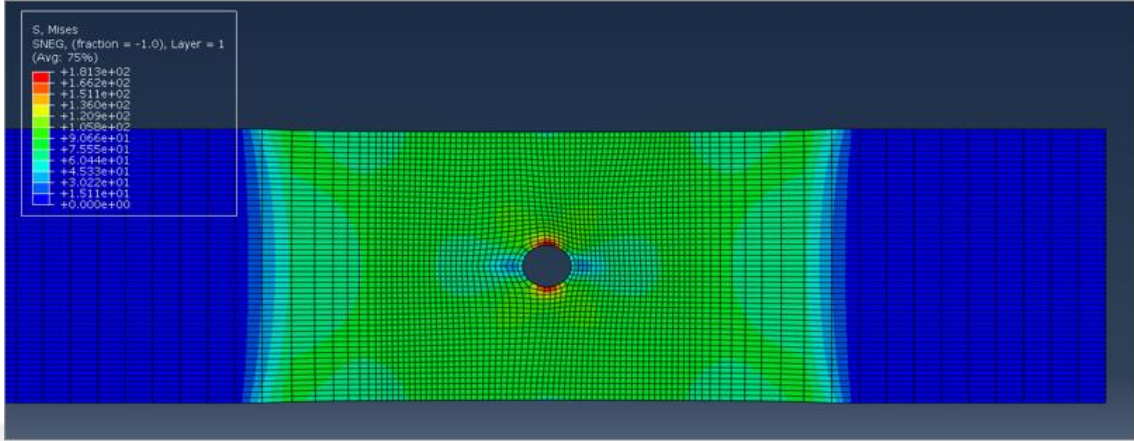
Şekil 4.21. 6 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz sonucu



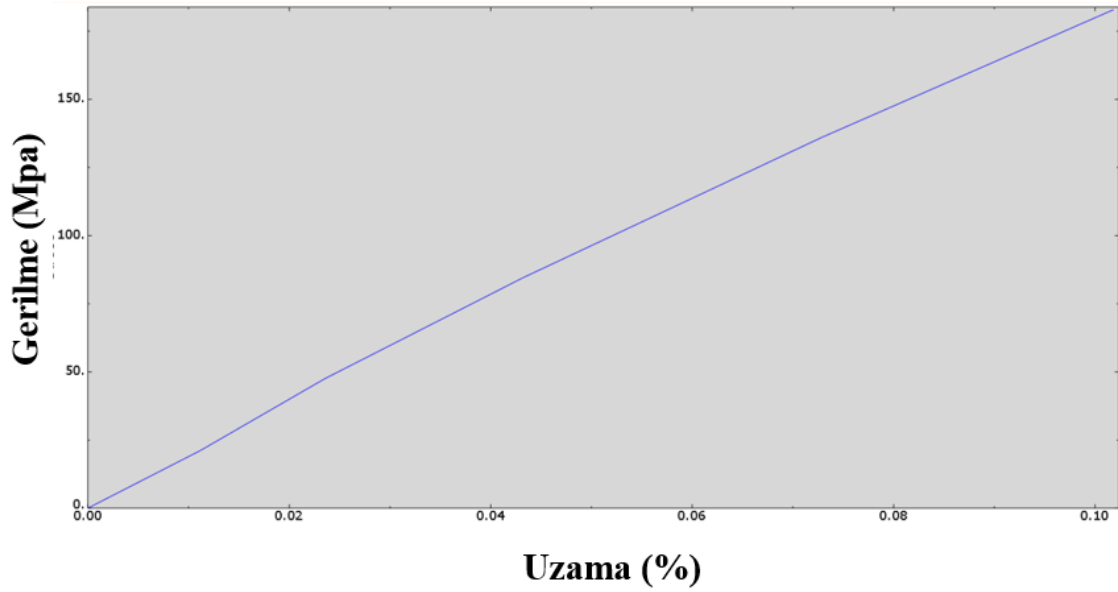
Şekil 4.22. 6 katmanlı delik yarıçapı 8mm olan malzemenin analiz değerleri

Maksimum gerilme 190.297 MPa ve maksimum gerinim 0.106428 bulunmuştur.

Şekil 4.23'te 6 katmanlı ve delik yarıçapı 4mm olan kompozit malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



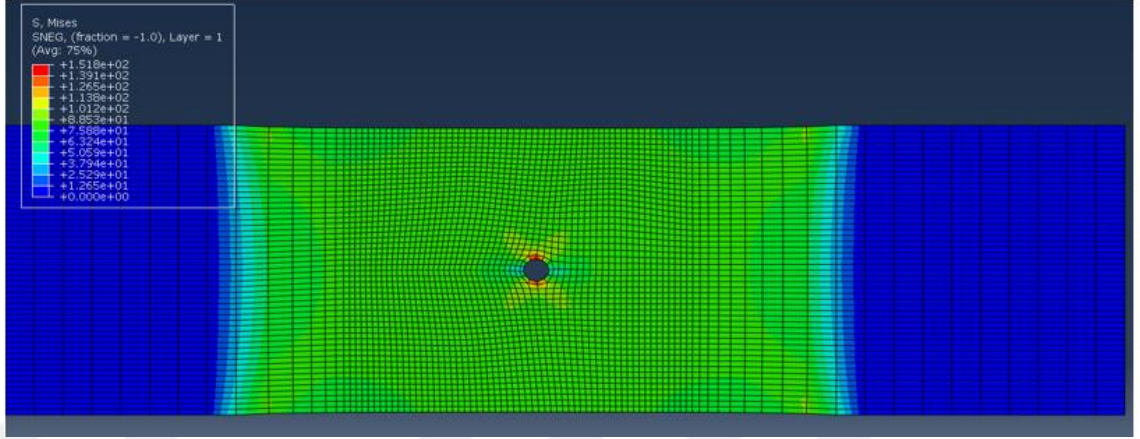
Şekil 4.23. 6 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz sonucu



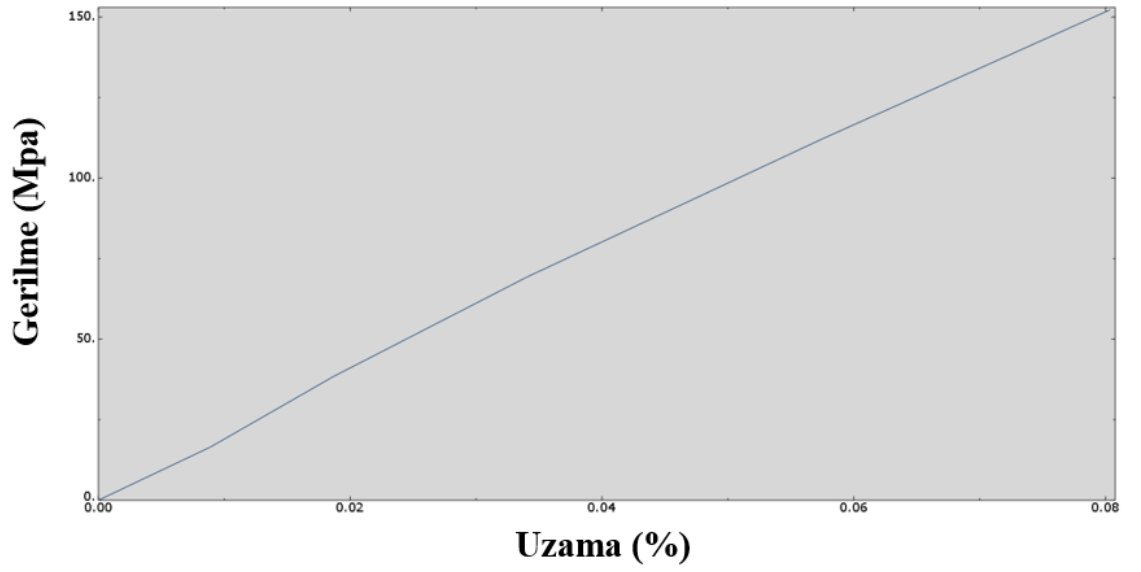
Şekil 4.24. 6 katmanlı delik yarıçapı 4mm olan malzemenin analiz değerleri

Maksimum gerilme 182.893 MPa ve maksimum gerinim 0.101845 bulunmuştur.

Şekil 4.25'te 6 katmanlı ve delik yarıçapı 2mm olan kompozit malzemenin analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.25. 6 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz sonucu



Şekil 4.26. 6 katmanlı delik yarıçapı 2mm olan malzemenin analiz değerleri

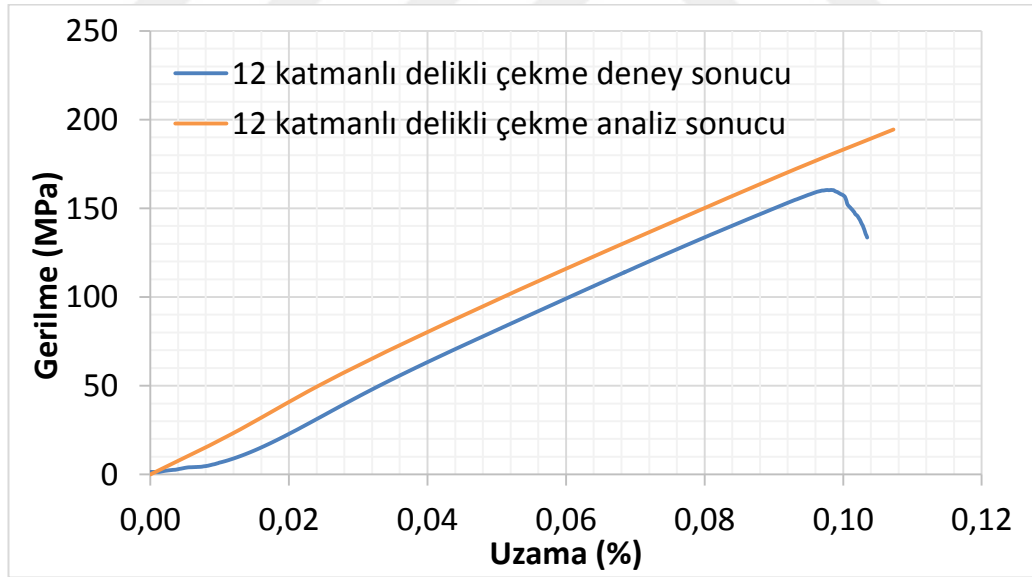
Maksimum gerilme 152.254 MPa ve maksimum gerinim 0.0803608 bulunmuştur.

Çizelge 4.1. 'de delik yarıçapları 2mm,4mm ve 8 mm olan 6 katmanlı kompozit malzemenin analiz sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Katman sayısı 6 olan kompozit malzemenin analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Delik Yarıçapı (mm)	Max. Gerilme (MPa)	Max. Gerinim (MPa)
2	152,25	0,080
4	182,89	0,101
8	190,29	0,106

Şekil 4.27.'de ise delikli çekme testi için yapılan sonlu elemanlar analiz sonucu ile yapılan deney sonucu karşılaştırılmıştır. Hasar kriteri tanımlanmadığından dolayı hasar davranışları karşılaştırılmamıştır fakat elastik bölgelerde birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.27. Deneysel sonuçların ve FEM sonuçlarının karşılaştırılması

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kendinden takviyeli PP kompozit malzemeler, konvansiyonel kompozit malzemelerden farklı olarak elasto-plastik şekil değiştirme davranışı gösterdiği görülmüştür. Bu davranış biçimi malzemenin katman sayısına bağlı olmaksızın gerçekleşmektedir. Uniform bir şekilde elasto-plastik şekil değiştiren malzeme limit değerine ulaştığı anda ani kırılma davranışı göstermektedir. Bu davranışın altında yatan neden olarak katmanlar ve elyaflar arası birleşme yüzeylerini oluşturan nisbeten zayıf ara yüzeylerin kopmasının bir sonucudur. Ancak ara yüzeylerde kopma gerçekleşene kadar yapının bir bütün halinde, kırılma olmayan davranış sergilemesi, malzemenin elasto-plastik şekil değiştirme davranışı delik etkisinin oluşturacağı gerilme yığılmalarını lokal şekil değiştirmelere müsaade ederek önemli ölçüde ortadan kaldırılmaktadır. Çatlağın başlaması ve ilerlemesi kuvvet doğrultusunda yük taşıyan elyafların bireysel kopmaları ile zayıflayan kesit doğrultusunda gerçekleşmektedir. Çatlağın oluşmasını ve ilerlemesini geciktiren elasto plastik davranış biçimine rağmen katmanlar arası ve lifler arası birleşim ara yüzeylerinde kopmalardan dolayı ayrışmanın olmasına engel olamamaktadır. Kendinden takviyeli 12 katmanlı delikli numunelere ait yapılan Sonlu Elemanlar analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırmasında da oluşan fark esasında bu davranıştan kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar analiz programında katmanlar arası ve elyaflar arası oluşan ara yüzey özellikleri mükemmel kabul edilmiştir. Bu nisbi zayıf bölgelerden kaynaklanacak erken hasar başlangıcı sonlu elemanlarda bu nedenle oluşmamış ve daha yüksek mukavemet elde edilmiştir. Deliksiz numunelerde meydana gelen gerilme dağılımının daha homojen olduğu ve homojenlik neticesinde yüksek gerilme değerlerine ulaşıldığı (218,1 MPa), aynı malzemeye açılan delik neticesinde oluşan ortalama gerilme değerinin 160,34 MPa değerine kadar düştüğü görülmektedir. Ancak bu düşüş oranı bu değerler gözlemlendiğinde hafiflik, geri dönüşebilirlik gibi avantajları ile konvansiyonel malzemeler yerine kullanılabilirliğe sahiptir.

Kendinden takviyeli termoplastik kompozit malzemenin kolayca kayma mukavemetinin ölçümü amacı ile yapılan kayma testleri sırasıyla 9 ve 12 katmanlı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve 18,9 MPa ve 20,9 MPa kayma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Takviye şeklinden dolayı düzlem içi iki doğrultuda [0/90] aynı çekme

özelliği gösteren malzeme, elyaf doğrultularında yüklendiğinde ulaştığı mukavemet değerinin çok altında bir kayma gerilmesi davranışı göstermektedir. Bu durum elyaf aksenal doğrultusunda dik kuvvetlerde görülen elyaf mukavemet düşüşünden kaynaklanmaktadır. Ancak kayma deneyi eğrilerindeki nonlinear davranış biçimi plastik Şekil değiştirme davranışının kayma doğrultusunda da etkisini gösterdiğini ifade etmektedir.

Yapı üzerinde delik etkisini delik yarıçapına ve katman sayısına bağlı olarak değişimini incelemek amacı ile Sonlu Elemanlar Analizleri gerçekteştirilmiştir. Kurulan modelin doğrulamasını yapmak amacı ile deney ile karşılaştırılarak aynı davranış ve yakın mukavemet değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre her bir katmanda delik çapı lineer bir Şekilde eşdeğer maksimum gerilmelerin yükselmesine neden olmakta ve başka bir ifade ile yapının mukavemetini düşürmektedir. 12 katmanlı yapı üzerinde gerçekteştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucunda deneysel sonuçlara oldukça yakın eğri ve mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak kendinden takviyeli kompozit yapılarda da deliğin mukavemet düşününe olan etkisi konvansiyonel yüksek mukavemetli elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapılara göre daha az etkilediği görülmüştür. Kendinden takviyeli kompozit yapının çok hafif, düşük maliyetli ve yüksek üretim hızı gibi özellikleri otomotiv savunma ve havacılık gibi kompozit yapıların sık kullanıldığı endüstrilerde farklı yapısal elemanlarda kullanımı için bir avantaj oluşturmaktadır.

Bu çalışmada literatürde çok sınırlı çalışmanın olduğu, kendinden takviyeli PP katmanlı kompozitler konusunda deneysel ve sayısal çalışma gerçekteştirilmiştir. Kendinden takviyeli PP malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak mukavemet değişiminin deneysel ve sayısal çalışılması, katmanlar arası kopmaya neden olan arayüzey mukavemeti, elyaflar arası arabirim mukavemeti değerlerinin elde edilmesi ve sıcak Şekil verilebilirliğinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, bu çalışmanın devamı ağıısından beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Aktaş, M. 2010. Kompozit malzeme ders notları. DEÜ Makine mühendisliği bölümü.

Baydar, D., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., Ünal, A. 2012. Production and characterization of continuous e-glass fiber reinforcement polypropylene composites. *Journal of Engineering and Natural Science.*, 30: 120-132.

Beşergil, B. 2012. Birsen Beşergil Ders Notları. CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Chawla, K.K. 1987. Composite Materials Science and Engineering. *Springer Verlag New York*, pp:140-283.

Chen, J.C., Wu, C.M., Pu, F.C., Chiu, C.H. 2011. Fabrication and Mechanical Properties of Self-Reinforced Polyethylene Terephthalate Composites. *Express Polymer Letters.* , 5(3): 228-237.

Chengcheng, G., Yu, L., Liu, H., Chen, L. 2011. Development of Self-Reinforced Polymer Composites. *Progress in Polymer Science.* 37: 767-780.

Demir, H. 2013. Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlarda Alt Modellemesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.

Eker, A. A. 2011. Plastik Matrisli Kompozitler Ders Notları. YTÜ Makine Mühendisliği Bölümü.

Güleşen, M. 2005. Fiber takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin bulunması. *Yüksek Lisans Tezi*, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.

Lubin, G. 1982. Handbook of Composites. pp: 788.

Martin, E., Leguillon, D., Carrere, N. 2015. An extension of the point-stress criterion based on a coupled stress and energy fulfilment: *Application to the Prediction of the Open-Hole Tensile Strength of A Composite Plate.* *Structural Integrity and Durability of Advanced Composites.* pp: 425-444.

Matabola, K.P., Vries, A.R.D., Moolman, F.S., Luyt, A.S. 2009. Single Polymer Composites: A Review. *Journal of Materials Science.*, 23,44: 6213-6222.

Mazundar, S.K. 2002. Composites manufacturing, materials, product, and process engineering. New York, 416 s.

Morgan, L.M., Weager, B.M.H. 2009. Self Reinforced Polymer Composites: Coming of Age. G.R. Bishop Netcomposites Ltd.

Özer, H. 2015. Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Öztürk, A. U., 2009. Sandviç Kompozitlerde Balpeteği Yapısının Optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Russo, P., Acierno, D., Simeoli, G., Lannace, S., Sorrentino, L. 2013. Flexural and impact response of woven glass fiber fabric/polypropylene composites. *Composites.*, 54: 415-421.

Seo, Y., Kim, J., Kim, K., Kim, Y. 2000. Study of the crystallization behaviors of polypropylene and maleic anhydride grafted polypropylene. *Polymer.*, 41: 2639-2646.

Smith, William F. 2012. Material Science and Engineering. Çeviri, Kınıkoğlu, Nihat, G. 900 s

Şahin, Y. 2006. Kompozit Malzemelere Giriş. 424 s

Şimşek, M. 1994. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri. *Mühendis ve Makine* : 35 414

Türkmen, İ. 2012. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa.

Toğuşoğlu, Ç. 2011. Cam fiber ve grafit takviyeli naylon 6 matrisli kompozit malzemelerin bazı mekanik özellikleri ve aşınma mekanizmaları deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

Toptaş, E. 2015. Sürekli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit İmalatında Ön Gerilmeden Kaynaklanan Mukavemet Kaybının İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Marmara Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Yazıcı, M., Özer, H., Karen, İ., Can, Y., Somyak, C. 2016. Mechanical Properties of 2D Cross-Ply EGlass Fiber Reinforced Thermoplastic Laminated Composite Materials. *Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering-CSM 2016*. 90-94.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Orhan KURTULUŞ

Doğum Yeri ve Tarihi : Kırcaali/BG 28.08.1987

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi, (2002-2006)

Lisans : Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü (2007-2012)

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2014-2017)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Şahinkul Makina, 2013-2014

-Rollmech Automotive, 2014-2016

-Maysan Mando, 2016-Halen

İletişim : orhankurtulus.msc@gmail.com

Yayınlar

- **Kurtuluş, O., Yavuz, C. 2015.** Examining the Modular End of Line Control Unit Design Criteria for Vehicle Sliding Door System Track Profile. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* (10):
- **Kurtuluş, O. 2015.** Hafif Ticari Araç Kayar Kapı Mekanizması Kızak Profilleri İçin Modüler Hat Sonu Kontrol Ünitesi Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi Ve

İmalatı. 8. *Otomotiv Yan Sanayi Sempozyumu ve Sergisi*. 13-14 Kasım 2015, Türkan Saylan Kültür Merkezi, İstanbul.

- **Kandırılmış, İ. K., Kurtuluş , O., Taş, M., Yazıcı, M. 2016.** Alternatif Malzemelerden Üretilmiş Hafif Ticari Araç Kapı Menteşesinin Karşılaştırmalı Sonlu Elemanlar Analizi. Otekon'16. 23-24 Mayıs 2016. Bursa.
- **Özer, H., Kurtuluş, O., Taş, M., Yazıcı, M. 2016.** Open- Hole Tensile Experiments of Thermoplastic Composite Laminates and Finite Element Analysis. *ICCESEN*. 19-24 October 2016. Antalya.
- **Kurtuluş, O., Ulu, E., Güneri, C. 2016.** Amortisör Üst Bağlantı Noktalarında Bulunan Kauçuk Parçaların Gürültü Davranışına Etkisinin İncelenmesi ve Burçlu Lastik Tasarımı. *IMSEC*. 26-28 October, 2016. Çukurova Üniversitesi, Adana.
- **Çetin, H., Kurtuluş, O., Ulu, E. 2016.** Binek Bir Araç İçin Geliştirilmiş Arka Aks Amortisörünün Sönümlenme Kuvvet Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi. *IMSEC*. 26-28 October, 2016. Çukurova Üniversitesi, Adana.