

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK YÖNLÜ TERMOPLASTİK PREPREGLERDE
ÜRETİM YÖNTEMİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alperen ORMAN

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ayşe Şükran DEMİRKİRAN

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK YÖNLÜ TERMOPLASTİK PREPREGLERDE
ÜRETİM YÖNTEMİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alperen ORMAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

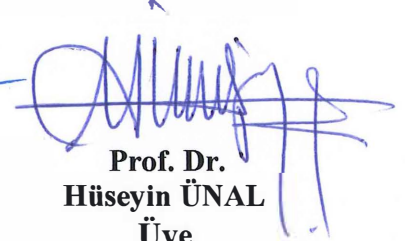
Bu tez 24.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr.
A. Şükran DEMİRKIRAN
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Süleyman Can KURNAZ
Üye



Prof. Dr.
Hüseyin ÜNAL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Alperen ORMAN

24.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışma sürecim boyunca katkılarından dolayı değerli tez danışmanım Doç Dr. Ayşe Őukran DEMİRKIRAN'a teşekkür ederim.

MİR Araştırma ve Geliştirme A.Ő. 'ye desteklerinden ve sunduğu imkanlardan ötürü teşekkür ederim. Bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren Dr. Mustafa DOĞU'ya, üretim çalışmalarında ve deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan Sedat ÇALIŐKAN, Osmancan ACET ve Tolga ÖZCAN'a müteőekkirim.

Benden hiçbir zaman desteğini esirgenemeyen canım eşim Sevinç ORMAN'a ve bu çalışmanın asıl mimarı olan sevgili AİLEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1. Polimer matrisli kompozitler.....	6
2.1.1.1. Termoplastik matrisli kompozitler.....	8
2.1.1.2. Termoset matrisli kompozitler.....	11
2.1.2. Takviye malzemeleri ve sınıflandırılması.....	12
2.1.2.1. Cam elyaflar.....	14
2.1.2.2. Karbon elyaf.....	15
2.1.2.3. Aramid elyaf.....	16
2.1.3. Kompozit ürün çeşitleri.....	17
2.2. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	20
2.2.1. Tek yönlü termoplastik matrisli prepreg üretim yöntemleri.....	20
2.2.1.1. Ekstrüzyon kaplama yöntemi.....	21
2.2.1.2. Film kaplama yöntemi.....	25

2.2.1.3. Toz kaplama yöntemi.....	26
2.2.1.4. Süspansiyon kaplama yöntemi.....	28
2.2.2. Termoplastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri.....	29
2.2.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	29
2.2.2.2. Termofom üretim yöntemi.....	30
2.2.2.3. Bant sarma üretim yöntemi.....	31
2.2.2.4. Otomatik termoplastik bant serme sistemleri (ATL).....	32
2.2.2.5. Otoklav üretim yöntemi.....	32
2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	33
2.3.1 Havacılık ve uzay yapıları.....	34
2.3.2. Denizcilik sektörü.....	39
2.3.3. Otomotiv endüstrisi.....	41
2.3.4. İnşaat.....	43
2.3.5. Spor eşyaları.....	45
2.3.6. Biyomedikal uygulamalar.....	45
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
3.1. Materyal.....	46
3.2. Yöntem.....	46
3.2.1. Tek yönlü termoplastik prepreg üretimleri.....	47
3.2.2. Otoklav prosesi ve test numunelerinin hazırlanması.....	50
3.2.3. Prepreglerin karakterizasyonu.....	53
3.2.3.1. Fizikokimyasal testler.....	53
3.2.3.2. Morfolojik testler.....	55
3.2.3.3. Mekanik testler.....	56
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA VE BULGULARI.....	60
4.1. Fizikokimyasal Test Sonuçları.....	60
4.2. Morfolojik Testler.....	64

4.2.1. Ekstrüzyon kaplama ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepregler.....	64
4.2.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepregler.....	66
4.2.3. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepregler.....	69
4.3. Mekanik Testler.....	70
4.3.1. Çekme testi.....	70
4.3.1.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin çekme testi sonuçları.....	71
4.3.1.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin çekme testi sonuçları.....	74
4.3.1.3. Ekstrüzyon kaplama üretimlerinin çekme testi sonuçları.....	77
4.3.2. Darbe testi.....	79
4.3.2.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları.....	80
4.3.2.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları.....	82
4.3.2.3. Ekstrüzyon kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları.....	84
4.3.3. Eğme testi.....	86
4.3.3.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin eğme testi sonuçları.....	86
4.3.3.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin eğme testi sonuçları.....	88
4.3.3.3. Ekstrüzyon numunelerinin eğme testi sonuçları.....	90
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ.....	93
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	103

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CF	: Karbon elyaf
CFRP	: Karbon elyaf takviyeli polimerler
GF	: Cam elyaf
GFRP	: Cam elyaf takviyeli polimerler
PA	: Poliamid
PA-12	: Poliamid-12
PAEK	: Poliarileterketon
PEEK	: Polieter-eter-keton
PEI	: Polieterimid
PFRP	: Pultrüzyon yöntemiyle üretilen fiber takviyeli polimer
PMK	: Polimer matrisli kompozit
PP	: Polipropilen
PPS	: Polifenilen Sülfid
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
UD	: Tek yönlü elyaf

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerde takviye ve matris elemanına göre gerilme- genleme.....	4
Şekil 2.2. Takviye elemanının göre sınıflandırılması 1-) Elyaf takviyeli kompozitler, 2-) Parçacık Takviyeli kompozitler, 3-) Tabakalı kompozitler.....	13
Şekil 2.3. Sürekli elyaf takviyeli kompozit yapı.....	14
Şekil 2.4. Kompozitlerde kullanılan ürün formları.....	18
Şekil 2.5. Tek yönlü prepreglerin serim açılarının gösterimi.....	19
Şekil 2.6. Ekstrüzyon kaplama sistemi şematik görüntüsü.....	22
Şekil 2.7. Ekstrüzyon kaplama sisteminde dik ve yatak konum.....	23
Şekil 2.8. Film istifleme yönteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.9. Enjeksiyon kalıplama yönteminin şematik görünümü.....	29
Şekil 2.10. Termoform üretim yönteminin şematik görünümü.....	30
Şekil 2.11. Bant sarma üretim yönteminin şematik görüntüsü.....	31
Şekil 2.12. Termoplastik bant serme sistemi.....	32
Şekil 2.13. Otoklav cihazı.....	33
Şekil 2.14. Kompozit malzemelerin dünya ölçeğinde dağılımı hacim ve değer olarak gösterdiği farklılıkları.....	34
Şekil 2.15. Maliyet ve performansın ileri malzeme kullanan sanayilerdeki göreceli önemini gösteren grafik.....	34
Şekil 2.16. Boeing 787'nin kompozit yapısı.....	35
Şekil 2.17. HexMC parçaları: pencere çerçeveleri, braketler, bağlantı parçaları, köşebentler, klipsler, tavalalar, Hexcel (ABD).....	36
Şekil 2.18. A350XWB'nin kompozit yapısı.....	36
Şekil 2.19. Tipik bir modern karbon fiber / epoksi gövde bölümü.....	37
Şekil 2.20. Denizcilikte kullanılan malzemelerin tarihsel gelişimi.....	40

Şekil 2.21. Reçinelerin yat sektöründeki kullanım yüzdeleri.....	41
Şekil 2.22. Elyafların yat sektöründeki kullanım yüzdeleri.....	41
Şekil 2.23. 10,7 m yükseklik x 10,7 m kare zeminde pultrüzyon yöntemiyle üretilen taret kulesi, Orlando, Florida, ABD.....	43
Şekil 2.24. a) Tamamı kompozit köprü güvertesi, b) kompozit malzeme kullanımı öncesi ve sonrası ağırlık, ABD.....	44
Şekil 2.25. Tamamı kompozit fiber optik kablo hattı, Danimarka.....	44
Şekil 3.1. Takip edilen işlem akış şeması.....	47
Şekil 3.2. Tek yönlü termoplastik prepreg üretim hattı şematik görüntüsü.....	47
Şekil 3.3. Ekstrüzyon kaplama.....	48
Şekil 3.4. Film kaplama.....	48
Şekil 3.5. Toz kaplama sistemi.....	49
Şekil 3.6. Prepreg çıktısı.....	49
Şekil 3.7. Serim işlemleri.....	50
Şekil 3.8. Paketleme işlemi.....	50
Şekil 3.9. Polipropilen matrisli otoklav çevrimi.....	51
Şekil 3.10. Poliamid-12 matrisli otoklav çevrimi.....	51
Şekil 3.11. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli test panelleri.....	52
Şekil 3.12. Test numuneleri.....	52
Şekil 3.13. Numunelerin karbon fiber tek yönlü levha veya teyp numunesi üzerine konumlandırılması örneği.....	54
Şekil 3.14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışma prensibi.....	55
Şekil 3.15. Morfolojik incelemelerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu.....	55
Şekil 3.16. Zwick Roell Z250 mekanik test cihazı.....	56
Şekil 3.17. Instron Ceast 9050 darbe test cihazı.....	56
Şekil 3.18. Çekme testi numune ve çene ölçüleri.....	57
Şekil 3.19. a) Darbe kenarı ve destek blokları, b) düzlemesine (flatwise) darbe.....	58
Şekil 3.20. Karbon elyaf için eğme testi düzeneği ve numune yerleşimi.....	59
Şekil 4.1. Ekstrüzyon ve film kaplama üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları.....	62
Şekil 4.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama sistemi için üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları.....	63

Şekil 4.3. Ekstrüzyon üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları.....	64
Şekil 4.4. 1850X büyütme ile çekilmiş SEM görüntüsü; Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş, a-) CFPP-1, b-) GFPP-1, ve film kaplama yöntemiyle üretilmiş c-) CFPP-2 ve d-) GFPP-2.....	66
Şekil 4.5. 1850X büyütme ile çekilmiş SEM görüntüsü; Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş a-) CFPA-1, b-) GFPA-1, ve toz kaplama yöntemiyle üretilmiş c-) CFPA-3 ve d-) GFPA-3.....	68
Şekil 4.6. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş; a-) CFPP-1 ve b-) GFPP-1 numunelerinin 1850x büyütme ile çekilmiş SEM görüntüleri.....	69
Şekil 4.7. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş a-) CFPA-1 ve b-) GFPA-1 numunelerinin 1850x büyütme ile çekilmiş SEM görüntüleri.....	70
Şekil 4.8. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin çekme mukavemetini gösteren grafik.....	72
Şekil 4.9. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin elastik modülünü gösteren grafik.....	73
Şekil 4.10. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin % uzama miktarı grafiği.....	73
Şekil 4.11. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin çekme mukavemeti grafiği.....	75
Şekil 4.12. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin elastik modülü grafiği.....	76
Şekil 4.13. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin % uzama grafiği.....	76
Şekil 4.14. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin çekme mukavemeti grafiği.....	78
Şekil 4.15. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin elastik modül grafiği.....	78
Şekil 4.16. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin % uzama grafiği.....	79
Şekil 4.17. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe mukavemeti grafiği.....	81
Şekil 4.18. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe enerjisi grafiği.....	81

Şekil 4.19. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe mukavemeti grafiği.....	83
Şekil 4.20. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe enerjisi grafiği.....	83
Şekil 4.21. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe mukavemeti grafiği	84
Şekil 4.22. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe enerjisi grafiği.....	85
Şekil 4.23. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği.....	87
Şekil 4.24. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme elastik modül grafiği.....	88
Şekil 4.25. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği.....	89
Şekil 4.26. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme elastik modül grafiği.....	90
Şekil 4.27. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği.....	91
Şekil 4.28. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme elastik modülü grafiği.....	92

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin spesifik gerilme ve spesifik modül değerleri.....	7
Tablo 2.2. Termoplastik ve termoset matrisli kompozitlerin karşılaştırılması.....	8
Tablo 2.3. Takviyesiz termoplastik matrislerin özellikleri.....	10
Tablo 2.4. Takviyesiz termoset matrislerin özellikleri.....	12
Tablo 2.5. E ve S cam elyafının özellikleri.....	15
Tablo 2.6. Elyaf ve bazı malzemelerin mekanik özellikleri.....	16
Tablo 2.7. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer matrisler.....	38
Tablo 2.8. Havacılık uygulamalarında yaygın kullanılan takviye fiberleri.....	39
Tablo 2.9. Kompozit parçaların otomobillerde kullanım örnekleri.....	42
Tablo 2.10. Spor ekipmanlarında kullanılan fiber takviyeli kompozit uygulamalarına örnekler.....	45
Tablo 3.1. Çekme testi numune ölçüleri.....	57
Tablo 3.2. Darbe testi için numune ölçüleri.....	58
Tablo 3.3. Cam elyaf takviyeli kompozitler için metot A(üç nokta eğme) için test numunesi boyutları.....	59
Tablo 3.4. Karbon elyaf için eğme testi düzeneği ve numune boyutları.....	59
Tablo 4.1. Deneme üretimleri sonrası numune kodlama sistemi.....	60
Tablo 4.2. Prepreg çıktılarının fizikokimyasal test sonuçları.....	61
Tablo 4.3. Çekme testi sonuçları.....	70
Tablo 4.4. Darbe testi sonuçları.....	79
Tablo 4.5. Eğme testi sonuçları.....	86

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tek yönlü prepreg, film kaplama, ekstrüzyon kaplama, toz kaplama, termoplastik

Bu çalışmada, farklı üretim yöntemlerinin tek yönlü termoplastik matrisli prepreglerin özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir.

Prepregler ekstrüzyon kaplama, toz kaplama ve film kaplama olmak üzere üç farklı üretim yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bunun yanı sıra çalışmalarda karbon elyaf ve cam elyaf olmak üzere iki farklı takviye malzemesi ile polipropilen ve poliamid-12 olmak üzere iki farklı matris malzemesi kullanılmıştır. Farklı kaplama yöntemleriyle üretilen karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli termoplastik prepregler fizikokimyasal testler, morfolojik testler ve çekme, eğme ve darbe gibi mekanik testler ile karakterize edilmiştir.

Araştırmada elde edilen sonuçlar, her iki takviye malzemesi ve matris malzemesi için, en iyi kaplama yönteminin ekstrüzyon kaplama yöntemi olduğunu göstermiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PRODUCTION METHOD IN UNIDIRECTIONAL THERMOPLASTIC PREPREGS

SUMMARY

Keywords: Unidirectional prepreg, powder coating, film coating, extrusion coating, thermoplastic

In this study, it was aimed to investigate the effect of different production methods on the properties of unidirectional thermoplastic matrix prepregs.

Prepregs were manufactured using three different production methods: extrusion coating, powder coating and film coating. In addition, two different reinforcement materials including carbon fiber and glass fiber and two different matrix materials such as polypropylene and polyamide-12 were used in these studies. Carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastic prepregs produced by different coating methods were characterized by physicochemical tests, morphological tests and mechanical tests such as tensile, bending and impact.

The results obtained from the study showed that the best coating method was the extrusion coating method for both reinforcement material and matrix material.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler günümüzde kullanım alanı gittikçe genişleyen yenilikçi malzemelerdir. Geleneksel malzemelere göre çok daha hafif, üstün mukavemet ve performans değerleri göstermektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin sağlamış olduğu tasarım ve üretim esnekliği büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler gün geçtikçe geleneksel malzemelerin yerini hızla almaktadır.

Kompozit malzemeler genel olarak iki ya da daha fazla malzemenin kimyasal bir bileşim göstermeden, fiziksel olarak birleşmesiyle oluşmuş malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre üç farklı grupta toplanmaktadır. Bunlar;

- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler ve
- Polimer matrisli kompozitlerdir.

Polimer matrisli kompozitler genel olarak kompozit malzeme kullanımının büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Polimer matrisli kompozitler içerisinde takviye malzemesi olarak genellikle elyaf takviyeleri kullanılmaktadır. Karbon, cam ve aramid olmak üzere üç farklı elyaf türü mevcuttur. Ayrıca polimer matrisli kompozitlerin elyaf takviye malzemesinin boyut ve şekline göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlar;

- Süreksiz elyaf takviyeleri,
- Sürekli elyaf takviyeleri,
- Dokuma elyaf takviyeler gibi sıralanabilmektedir.

Polimer matrisli kompozitler kendi içerisinde termoplastik matrisli kompozitler ve termoset matrisli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde termoset matrisli kompozitler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak termoplastik matrisli kompozit malzemeler, üretim yöntemlerinin gelişmesi ve buna bağlı olarak sağladığı üstün özelliklerin fark edilmesiyle birlikte termoset matrisli kompozitlerin yerini almaya başlamıştır.

Bu çalışmada, tek yönlü termoplastik matrisli farklı prepreg üretim yöntemleriyle elde edilen prepreglerin çeşitli özelliklerine üretim yöntemlerinin etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında ekstrüzyon, film ve toz kaplama sistemi olmak üzere üç farklı üretim yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda çalışmalar karbon ve cam olmak üzere iki farklı takviye malzemesi ve iki farklı termoplastik matris türü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

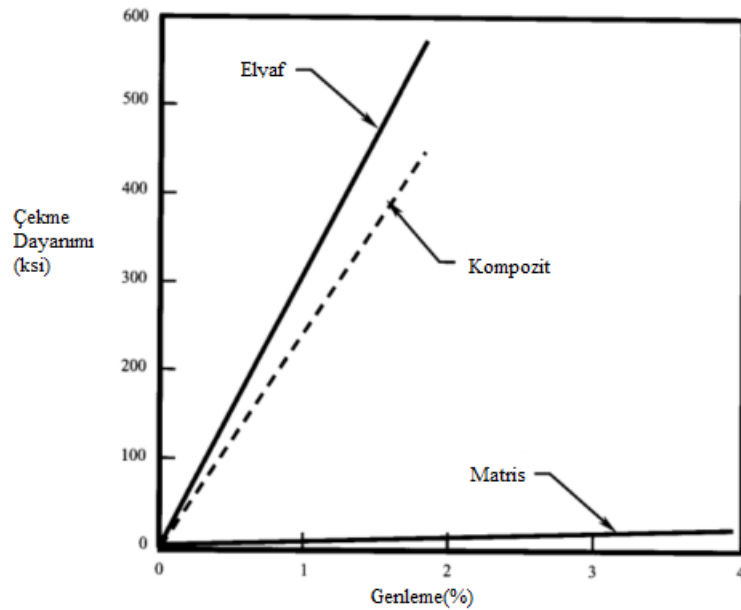
İki ya da daha fazla malzemenin birbiri içerisinde çözünmeden makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Metal alaşımlarının aksine her malzeme kendi fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini korumaktadır (Campbell, 2004).

Kompozit malzemeler ilk olarak insanlar tarafından oluşturulmuş malzemeler değildir. İlk örnekleri doğada mevcuttur. Kompozit malzemeler doğada selüloz maddesi ile ağaç liflerinin oluşturduğu ahşap, salyangoz ya da midye gibi omurgasız canlıların dış kabuklarında görülebilmektedir. Omurgasız canlılarda bulunan bu kabuklar, insan yapımı kompozitlere göre daha sağlam ve dayanıklıdır. Ayrıca midye ve salyangozda olduğu gibi, örümcek ağlarında bulunan liflerin de yapay liflere göre daha güçlü olduğu bilinmektedir (Mazumdar, 2002).

Kompozit malzemeler insanlık için önemli bir yer tutmakta ve geçmişi çok eskilere dayanmaktadır. İlk kompozit örneklerinden biri olan kerpiç evler, daha dayanıklı hale getirebilmek için, inşaatçılar tarafından kırılğan malzemelerin içerisine lifler konarak yapılmıştır. Ticari açıdan polimerik malzemelerin kompozitlerde kullanılmaya başlamasıyla, tarih boyunca birçok alanda zaten kullanılan kompozit malzemelere olan ilgi daha da artmıştır. 1930'lu yıllarda polimer işleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte polimer malzemelerin üstün özellikleri dikkat çekmeye başlamıştır. Bunun yanı sıra, aynı dönemde cam elyaf malzemelerin bulunması, polimerin yapısal özelliklerini iyileştirmek için kullanılmasına olanak sağlamıştır. Böylece, yapısal dayanımı yüksek malzemelere ihtiyaç duyan ve bu nedenle alternatif malzeme arayışına giren ABD'li yerel havacılık sektörü, kompozit

malzemeleri havacılık sektöründe kullanmaya başlamıştır (Mazumdar, 2002; Sönmez, 2009).

Kompozit malzemeler takviye malzemesi ve matris olmak üzere iki ana yapı bulunmaktadır. Takviye elemanı kompozit yapı içerisinde yükü taşınmasını sağlamaktadır. Bunun yanında kompozit yapı içerisinde matris malzemesinin rijitliğinin artmasını ve dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Genel olarak takviye malzemesi olarak karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf gibi elyaf türleri kullanılmaktadır. İkinci bileşen matris malzemesinin ana görevi ise elyaf demetlerini bir arada tutarak, elyaf demetleri üzerinde yükün homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Yük altında malzemenin kopmasını geciktirerek plastik deformasyona uğramaya başladığı an malzeme üzerinde oluşacak çatlak ilerlemelerini önlemektedir (Vatangül, 2008; Sönmez, 2009). Takviye ve matris elemanına göre kompozit malzemelerdeki genel gerilme-genleme diyagramı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerde takviye ve matris elemanına göre gerilme-genleme (Campbell, 2004)

Kompozit malzemeler hafif olmalarının yanı sıra yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları da büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle kompozit yapılar birçok metal parçasının yerini hızla almaktadır. Havacılık, otomotiv gibi sanayilerde üstün

özellikleri sebebiyle kullanım alanı hızla genişlemektedir. Kompozit malzemelerin avantajları şöyle sıralanabilir;

- Hafif malzemelerdir,
- Spesifik mukavemetleri yüksektir,
- Korozyon ve kimyasal dayanımı yüksektir,
- Tasarım esnekliği sunmaktadır,
- Elektriksel özellikleri iyidir,
- Kolay şekillendirilebilirler,
- Karmaşık parçalar rahatlıkla üretilebilir,
- Titreşime karşı dayanımları yüksektir.

Kompozit malzemelerin üstün özelliklerinin yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin dezavantajları da şöyle sıralayabiliriz;

- Hammadde maliyetleri çok yüksektir.
- Standartlaşmış bir ürün kalitesi yoktur. Ürünün kalitesi üretim yöntemine bağlıdır,
- Yüksek üretim kapasiteleri için üretim yöntemleri geliştirilmeye devam etmektedir (Mazumdar, 2002; Vatangül, 2008; Sönmez, 2009) .

Kompozit malzemeler günümüzde birçok şekilde sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma şekli matris malzemelerine göre sınıflandırmadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre 3 ana grupta sınıflandırılmaktadır;

- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler ve
- Polimer matrisli kompozitler.

Üretim kolaylıkları, düşük proses sıcaklıkları gibi birçok avantaj sebebiyle günümüzde en çok kullanılan polimer matrisli kompozitlerdir.

2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer malzemeler yapılarında hidrojen, karbon ve metalik olmayan elementlerin birleşimlerinden oluşan organik malzemelerdir. Polimer malzemeler dünya tarihi için çok uzun bir geçmişi olmamasına karşın hayatımızın hemen hemen her bölümünde yer almaktadır. Polimerlerin bu kadar tercih edilmesinin sebebi ise göreceli olarak ucuz oluşları ve hammadde tedariklerinin kolay olmasıdır. Ayrıca sıcaklık ve basınç altında kolayca işlenebilmeleri, karmaşık parçaların bile kolayca şekillendirilmesine imkan sağlaması polimer malzemeleri tercih edilir hale getirmiştir (Hüner, 2008; Sönmez, 2009).

Polimerik malzemelerin üstün malzeme özelliklerinin olması sanayide tercih edilen bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Yoğunluklarının düşük olması nedeniyle hafif olan bu malzemeler renksizdir. Böylece, metal malzemeler gibi artı bir renklendirme işlemine ihtiyaç duymaksızın, parça üretimi sırasında istenilen renkte rahatlıkla üretilebilirler. Polimer malzemelerin kimyasal dirençleri çok yüksektir. Bu sayede metal malzemeler gibi paslanmazlar, çözücü solventlere karşı dayanıklıdırlar. Polimer malzemeler bu gibi üstün özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler (Hüner, 2008).

Kompozit malzemelerin en önemli bileşenlerinden bir tanesi matris malzemesidir. Matris malzemesi takviye elemanını bir arada tutarak, yükün takviye malzemesi içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle Kompozit malzemeler için matris malzemesi seçimi çok önemlidir. Matris malzemesinin takviye elemanını çok iyi sarması ve takviye malzemesine iyi bağlanması gerekmektedir. Homojen bir dağılım için matris içerisinde takviye elemanının homojen dağılmasına olanak sağlamalıdır (Campbell, 2004)

Polimer matrisli kompozitler en çok tercih edilen kompozit malzeme türüdür. Polimer matrisli kompozitlerin birçok tercih edilme sebebi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi yüksek spesifik mukavemet ve yüksek spesifik modüldür. Polimer matrisli

kompozitler hafif olmalarının yanı sıra mukavemet olarak çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir (Tablo 2.1.).

Tablo 2.1. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin spesifik gerilme ve spesifik modül değerleri(Wang, Zheng and Zheng, 2011)

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm³)	Gerilme Mukavemeti (GPa)	Elastik Modül (10² GPa)	Spesifik Gerilme (10⁶)	Spesifik Modül (10⁸)
Çelik	7,8	1,03	2,1	1,3	2,7
Alüminyum alaşımı	2,8	0,47	0,75	1,7	2,6
Titanyum alaşımı	4,5	0,96	1,14	2,1	2,5
Cam elyaf alaşımı	2,0	1,06	0,4	5,3	2,0
Karbon elyaf 1/epoksi kompozitler	1,45	1,5	1,4	10,3	9,7
Karbon elyaf 2/epoksi kompozitler	1,6	1,07	2,4	6,7	15
Organik elyaflar/epoksi kompozitler	1,4	1,4	0,8	1,0	5,7
Bor elyaf/epoksi kompozitler	2,1	1,38	2,1	6,6	10
Bor elyaf/alüminyum matrisli kompozitler	2,65	1,0	2,0	3,8	7,5

Polimer matrisli kompozitlerin diğer üstün özelliği ise iyi bir yorulma dirençleri ve yüksek hasar toleransına sahip olmalarıdır. Polimer matrisli kompozitlerde karbon elyaf takviyeliler için yorulma dayanımları yaklaşık olarak çekme dayanımlarının %70 ile %80 aralığında değere denk gelmektedir. Metal malzemeler için ise bu değer %30 ile %50 arasında kalmaktadır. Bu nedenle polimer matrisli kompozitlerin yorulma dirençleri daha yüksektir (Wang, Zheng and Zheng, 2011).

Polimer matrisli kompozitlerin darbe dayanımlarının yüksek olması, kimyasal dirençlerin çok yüksek olması, ürün tasarımları anlamında tasarımcıya rahatlık sağlaması diğer üstün özellikleridir. Aynı zamanda polimer matrisli kompozitlerin şekillendirilmesi ve parça üretimleri anlamında avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle polimer matrisli kompozitler en çok tercih edilen kompozit malzeme türlerindedir.

Polimer matrisli kompozitler, termoplastik matrisli kompozitler ve termoset matrisli kompozitler olmak üzere iki farklı gruba ayrılmaktadır. Bu matrislerin ısı davranışları birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Termoplastik matrisli kompozitlerin ve termoset matrisli kompozitlerin karşılaştırması Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Termoplastik ve termoset matrisli kompozitlerin karşılaştırılması

Termoplastik Matrisli Kompozitler	Termoset Matrisli Kompozitler
Polimer zincirlerinden oluşurlar	Çapraz bağ yaparlar
Yeniden şekillendirilebilirler	Yeniden şekillendirilemezler
Düşük sıcaklıklarda sertleşirler	Yüksek sıcaklıklarda işlem gördükten sonra sertleşirler
Üstün kırılma tokluğu, yüksek sertlik ve çarpma dayanımı gösterirler	-
Hammadde raf ömürleri uzun soğutucu odalara gerek yoktur	Raf ömürleri kısadır. Soğuk odalara ihtiyaç vardır
Geri dönüştürülebilirler	Geri dönüştürülemezler
Sertleşme süresince organik çözücülere ihtiyaç duyulmaz	Organik çözücüler ve sertleştiricilere ihtiyaç vardır.
Güvenli çalışma ortamı	Güvenli çalışma ortamı oluşturulmalıdır. Ekstra işletme maliyeti gereklidir.
Üretimleri zordur, yüksek sıcaklık ve basınç isterler	Proses edilebilirlikleri kolaydır
Hammadde maliyetleri yüksektir	Hammadde maliyetleri düşüktür

2.1.1.1. Termoplastik matrisli kompozitler

Polimer malzemeler arasında en çok kullanılan polimer çeşidi termoplastik polimerlerdir. Polimer malzemeler ile endüstride üretilen ürünlerin %90'ı termoplastik polimerlerden oluşmaktadır. Termoplastik malzemeler, darbe direncinin yüksek olması, tekrar işlenebilirliği, kolay şekillendirilebilmesi, yüksek tokluk gibi üstün özelliklerinden dolayı termoset malzemelerin yerini almaktadır. Termoplastik malzemeler camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) üzerinde amorf yapılarından dolayı viskoz bir davranış göstermektedir. Raf ömürlerinin olmaması, geri dönüştürülebilir

olmaları termoplastik malzemelerin en çok tercih edilmesinin nedenlerinin başında gelmektedir (Şahin, 2013).

Termoplastik malzemeler sıcaklık ve basınç altında kolayca şekillendirilebilmektedir. Ayrıca termoplastik malzemelerin şekillendirme işleminin ardından ekstra maliyet oluşturacak işlemlere gerek kalmayabilir. Termoplastik parçalar, enjeksiyon kalıplama, termoform, üfleli kalıplama gibi en yaygın üretim yöntemleriyle üretilmektedir (Mallick P. K., 2010).

Termoplastik malzemeler termosetler gibi çapraz bağ içermemektedir. Termoplastikler şekilsiz ya da yarı kristalin halinde bulunabilirler. Termoplastiklerde moleküller düzenli bir şekilde sıralanmakta ya da dallanma yapabilmektedir. Moleküllerin kompleks yapısı nedeniyle hiçbir zaman %100 kristalin olamamaktadırlar. Bu nedenle termoplastik malzemeler esnek yapıdır ve yeniden şekillendirilebilir. Ancak düşük sertlikleri ve mukavemet değerleri sebebiyle yapısal uygulamalar için iyi bir dolu malzemesi ile takviye edilmelidirler (Mazumdar, 2002).

Termoplastik matrisli kompozitler, termoplastiklerin üstün özellikleri ve takviye malzemesinin kazandırdığı mukavemet değerleri ile en çok tercih edilen ve araştırma yapılan malzemeler haline gelmişlerdir. Termoplastik matrisli kompozitler, kompozit malzemeler içerisinde birçok üstünlüğe sahiptir. Kimyasal dirençlerinin yüksek olması, hasar dirençlerinin yüksek olması, parçaların birbirine kaynaklanma kabiliyetlerinin yüksek olması, geri dönüştürülebilir olmaları, parça tamirlerinin daha kolay ve maliyetsiz şekilde yapılabilmesi gibi özellikler üstün özellikleri arasındadır (Mallick P. K., 2010).

Termoplastik matrisli kompozit malzemeler endüstriyel parça üretimlerinin çok başında olan yeni nesil malzemelerdir. Bu nedenle araştırmacıların dikkatini çekmekte ve günümüzde üretim yöntemleri üzerine halen çalışmalar devam etmektedir. Termoplastik matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye türü kısa elyaflardır. Çünkü otomotiv sektöründe enjeksiyon kalıplama yöntemi ile yarı yapısal parçalar üretilmektedir.

Termoplastik malzemelerin üretimlerini zorlaştıran en temel neden termoplastiklerin viskozitelerinin yüksek olmasıdır. Termoplastik matrisli kompozitlerin bu özelliği takviye malzemesinin içerisine tam anlamıyla emdirilmesini zorlaştırmaktadır. İmpregnasyon işleminin tam anlamıyla gerçekleşmemesi kompozit yapıda hataya sebep olacaktır. Bu nedenle termoplastik matrisli kompozitlerin üretimlerinde kontrolü bir sıcaklık bölgesi ve yüksek basınca ihtiyaç duyulmaktadır (Mallick P. K., 2010). Termoplastik matrisli kompozitlerde kullanılan mühendislik polimerlerinin özellikleri Tablo 2.3.'te verilmektedir.

Tablo 2.3. Takviyesiz termoplastik matrislerin özellikleri (Mazumdar, 2002)

Matris malzemesi	Yoğunluk(g/cm ³)	Gerilme modülü GPa	Gerilme
			Mukavemeti MPa
PA	1,1	1,3-3,5	55-90
PEEK	1,3-1,35	3,5-4,4	100
PPS	1,3-1,4	3,4	80
Polyester	1,3-1,4	2,1-2,8	55-60
Polietilen	0,9-1,0	0,7-1,4	20-35
Teflon	2,1-2,3	-	10-35

- Poliamidler (PA): Endüstriyel anlamda en çok kullanılan polimer çeşitlerinden biridir. Geleneksel olarak naylon olarak adlandırılırlar. Poliamid 6, poliamid 6,6, poliamid 12 gibi birçok çeşidi bulunmaktadır. Poliamidlerin bu şekilde ayrılmasının en önemli sebebi ise moleküler bağ yapılarından kaynaklanmaktadır. Poliamidler yataklar, dişliler gibi parçalarda kullanılmaktadırlar. Poliamidler kendi kendini yağlama özelliğine sahiptir. Sürtünme miktarının az olduğu ve yağlanma ihtiyacı bulunmayan parçalarda kullanılmaktadır. Poliamid malzemelerin belirgin bir diğer özelliği ise nem tutma özelliğidir (Sönmez, 2009).
- Polipropilen (PP): Tüm termoplastik malzemeler içerisinde en düşük yoğunluğa sahip (0,9g/cm³) malzemedir. Sertlik, dayanıklılık, kimyasal direnç, yorulma direnci gibi birçok malzeme özelliklerinde üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca maliyet bakımından ucuz malzemelerdir. Makine parçaları, fanlar, otomotiv parçaları, paneller gibi birçok parçanın üretiminde kullanılmaktadır. PP matrisinin ergime sıcaklığı değişkenlik göstererek 175°C

sıcaklık civarında değişebilmektedir. Mekanik özelliklerini ise yüksek servis sıcaklıklarında nispeten koruyabilmektedirler (Mazumdar, 2002; Hüner, 2008).

- Polieter-eter-keton (PEEK): Mühendislik polimerleri arasında en üst seviyede bulunan ve yüksek servis sıcaklığı sağlayan yeni nesil bir polimer malzemedir. Kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmasıyla havacılık ve uzay sanayinde kendisine geniş bir yer bulmaktadır. Camsı geçiş sıcaklık 143 °C ve erime sıcaklığı 343 °C'dir. Proses sıcaklıkları 400 °C-500 °C arasında değişmektedir (Mazumdar, 2002).
- Polifenilen Sülfid (PPS): Mühendislik polimerleri arasında en üst seviyelerde bulunan PPS, maksimum %65 kristanile sağlayan ve yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı veren bir malzemedir. Camsı geçiş sıcaklığı 85 °C ve ergime sıcaklığı ise 285 °C'dir. PPS termoplastik reçine 300 °C ile 345 °C arasında proses sıcaklığında işlem görebilmektedir. PPS matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve kimyasal direnç göstermektedirler (Mazumdar, 2002).

2.1.1.2. Termoset matrisli kompozitler

Termoset malzemeler günümüzde en çok kullanılan matris türüdür. Kompozit malzemeler için termoset matrislerin tercih edilmesinin sebebi sıvı halde bulunmaları ve takviye malzemesine impregnasyon işleminin daha kolay yapılabilmesidir.

Termoset matrisler bir katalizör ya da kürleyici madde katılması ile kimyasal reaksiyona sokularak çapraz bağlanma oluşturulması sağlanmaktadır. Çapraz bağlanma reaksiyonu sıvı halde bulunan polimeri kimyasal bir tepkimeye sokarak sertleşmesini sağlamaktadır. Termoset malzemelerin bu sert yapıları yüksek sıcaklık ve sürtünmelere karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda yüksek kimyasal direnç kazanmalarına sebep olmaktadır.

Termoset malzemelerin kullanımlarını sınırlayan belirli durumlar bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi sertleştirme malzemesi olarak kullanılan sıvıların kimyasal

içerikli olması ve insan sağlığını tehdit edebilmektedir. Bu nedenle termoset malzemelerin kullanıldığı üretim tesislerinde yatırım maliyetleri çok yüksektir. Ayrıca sertleştirme malzemesinin katılma miktarına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak, termoset malzemelerin proses süreleri uzayabilmektedir. Ayrıca işlem süresi termoset malzemelerin mukavemetine doğrudan etki etmektedir.

Termoset malzemelerin bir diğer sınırlayıcı özelliği ise geri dönüştürülememesi ve yeniden şekillendirilememesidir. Bu nedenle termoset malzemeler ile üretilmiş parçaların tamiri çok masraflı ya da hiç olamamaktadır. Ayrıca termoset malzemelerin ömürlerinin sınırlı olması sınırlayıcı başka bir özellikleridir (Mallick P. K., 2010). Termoset matrisli kompozitlerde kullanılan mühendislik polimerlerinin bazı özellikleri Tablo 2.4.'te verilmektedir.

Tablo 2.4. Takviyesiz termoset matrislerin özellikleri (Mazumdar, 2002)

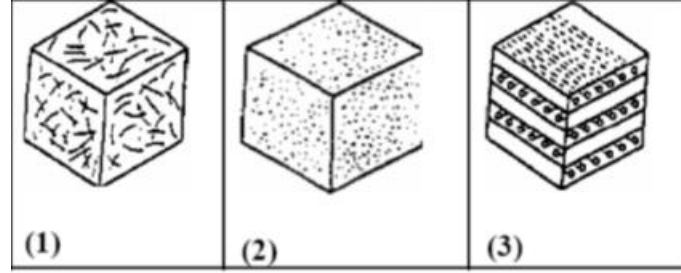
Reçine malzemesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Gerilme Modülü (GPa)	Gerilme Mukavemeti (MPa)
Epoksi	1,2-1,4	2,5-5	50-110
Fenolik reçine	1,2-1,4	2,7-4,1	35-60
Polyester	1,1-1,4	1,6-4,1	35-95

2.1.2. Takviye malzemeleri ve sınıflandırılması

Daha önce kompozit malzemelerin iki ana malzemedan oluştuğu belirtilmişti. Bunlardan bir tanesi matris malzemesiyken diğeri takviye malzemesidir. Takviye malzemeler, kompozit yapıya doğrudan güçlendirici etki yapmaktadır. Takviye malzemesiyle kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artması beklenmektedir. Doğru takviye malzemesi ve oryantasyon ile kompozit malzemesi yüksek mukavemet ve yüksek modül değerleri gibi mekanik özellikler kazanmaktadır (Wang, Zheng and Zheng, 2011).

Kompozit malzemeler elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere 3 ana grupta toplanmaktadır (Şekil 2.2.). Parçacık takviyeli kompozitler

mekanik anlamda minimum katkı yapabilen malzemelerdir. Ancak parçacık takviyeli malzemelerin ucuz olmaları ve kolay bulunabilir olmaları en önemli avantajlarıdır. En çok kullanılan parçacık takviye elemanları silikatlar, killer, karbonatlar vb. malzemelerdir. Kompozit malzemelerin içerisine daha çok toz halinde katılmaktadır (Karadağ, 2014).

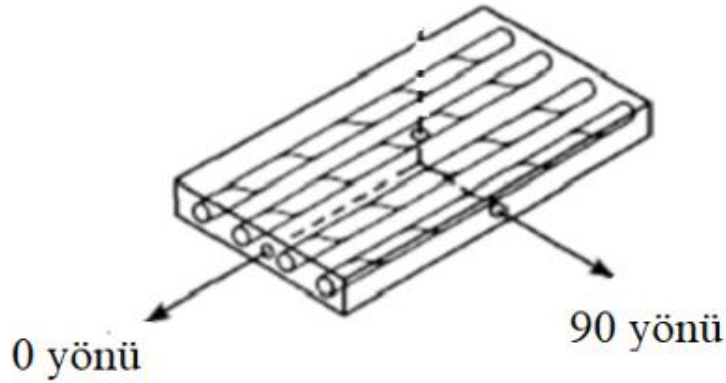


Şekil 2.2. Takviye elemanının göre sınıflandırılması 1-) Elyaf takviyeli kompozitler, 2-) Parçacık Takviyeli kompozitler, 3-) Tabakalı kompozitler (Karadağ, 2014)

Polimer matrisli kompozitler için en çok kullanılan takviye türü elyaflardır. Elyafar genel olarak dairesel ya da dairesele yakın yapıda bulunmaktadır. Ayrıca kompozit malzemeye en iyi mekanik performans kazandıran takviye çeşididir. Polimer matrisli kompozit malzeme içerisinde doğru dizilim ile çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmektedir. Elyaf takviyelerinin mukavemet değerlerinin yüksek olmasının sebebi ise çekilerek üretilmeleridir. Böylelikle moleküler zincir yapıları çok düzgün çıkmakta ve mukavemet değerleri yüksek olmaktadır (Campbell, 2004).

Elyaf takviyeleri genel olarak sürekli elyaf takviyeli ve süreksiz elyaf takviyeli olmak üzere 2 ana grupta toplanmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde en yüksek mukavemet değeri sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Elyaf boyuna, matris içerisinde homojen dağılmasına ve yönlenmesine göre kompozit malzemenin mukavemet değeri etkilenmektedir.

Sürekli elyaf takviyeli kompozitler belirli bir yönde elyafların kesintisiz bir şekilde dizilmesiyle oluşan yapılardır (Şekil 2.3.). Elyafarın kesintisiz bir şekilde ve belirli bir yönde sıralanmış olması, kompozit parça üzerinde yükü taşıyacak yönde belirli olması demektir. Bu nedenle sürekli elyaf takviyeleri kullanılması parça tasarımlarında rahatlık ve avantaj sağlamaktadır (Jones, 1999).



Şekil 2.3. Sürekli elyaf takviyeli kompozit yapı (Jones, 1999)

Polimer matrisli kompozitlerde genel olarak 3 farklı elyaf türü kullanılmaktadır. Bunlar;

- Cam elyaflar
- Karbon elyaflar
- Aramid elyaflardır.

2.1.2.1. Cam elyaflar

Cam elyaf, polimer matrisli kompozitler içerisinde en yaygın kullanıma sahip elyaf türüdür. Cam elyafların maliyetleri çok düşüktür. Silis-kum (SiO_2) cam elyafların ana hammaddesidir. Bunun yanı sıra sodyum, kalsiyum, bor, alüminyum gibi malzemelerin oksitlerinden oluşmaktadır. Cam elyaflar, gündelik yaşamımızda bildiğimiz camın, mikron mertebesinde çaplarda çekilerek üretilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Cam elyaflar polimer matris içerisinde üstün özellik göstermektedirler (Yıldızhan, 2008). Bunlar;

- Isıl dirençleri yüksektir.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- Nem absorbe etme özellikleri yoktur,
- Elektriği iletmezler,
- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler ve birim ağırlık başına mukavemeti çeliğe göre yüksektir.

Polimer matrisli kompozitler için yaygın olarak kullanılan 2 adet cam elyaf türü bulunmaktadır. Bu cam elyaf türleri E ve S cam elyaftır. E- cam elyaf sürekli elyaf takviyeli kompozitler için en yaygın kullanılan elyaf türüdür. E- cam elyaf düşük sodyum ve potasyum bulunduran, kireç-alüminyum ve bor silikattan oluşan bir malzemedir. Elektriksel direnci çok fazladır. E- cam maliyet performans açısından sektörde en çok tercih edilen cam elyaf türüdür. S- cam elyaf ise daha yüksek mukavemet isteyen spesifik yerlerde kullanılmaktadır. S- camı daha çok askeri ve havacılık alanlarında kullanılmakta ve cam elyaflar arasında maliyeti en yüksek olan cam elyaf türüdür. Yüksek mukavemet değerinin yanında aşınmaya karşı dayanıklı, aşırı sıcaklık altında çalışabilen bir elyaf türüdür (Khagendra Kumar and Singh Lohchab, 2016). E-cam elyaf ve S- cam elyafın bazı malzeme özellikleri Tablo 2.5.'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5. E ve S cam elyafın özellikleri (Khagendra Kumar and Singh Lohchab, 2016)

	E- Cam Elyaf	S- Cam Elyaf
Çekme Dayanımı (GPa)	3,44	4,48
Basınç Dayanımı (GPa)	1,080	1,600
Elastisite Modülü (GPa)	72	89
Yoğunluk (g/cm³)	2,54	2,53
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	846	1056

2.1.2.2. Karbon elyaf

Karbon elyaflar kompozit tarihinde en eski ve yaygın kullanılan elyaf türüdür. Yüksek performanslı elyaflar olmaları sebebiyle birçok yapısal kompozit parça içerisinde kullanımları mevcuttur. Üretim yöntemlerine göre birçok karbon elyaf türü elde edilebilmektedir. Ancak en yaygın kullanılan karbon elyaf üretim yöntemleri PAN ve zift bazlı karbon elyaf üretimleridir (Nesrin ve ark., 2017).

Karbon elyaflar yüksek mukavemetli ve göreceli olarak düşük yoğunlukta oldukları için ideal mühendislik malzemeleridir. Yüksek mukavemetlerinin yanında yüksek sertlik, yüksek tokluk, elastik davranış gösterebilen ve sürtünmeye karşı dirençli malzemelerdir. Ayrıca karbon elyaflar hasarlanmalara karşı dirençli ve yüksek

oksitleyici ortamlar dışında kimyasal dirençleri yüksek olan malzemelerdir. Karbon elyaflar bu üstün özellikleri sebebiyle polimer matrisle birleştirilerek, birçok yapısal malzemede kullanılabilir. Havacılık, uzay sanayi, otomotiv sanayi gibi sektörlerde önemli yer tutmaktadır. Karbon elyafların bu üstün özelliklerinin yanında darbe dirençlerinin düşük olması ve basma mukavemetlerinin çekme mukavemetlerine göre düşük olması bir dezavantaj olarak görülmektedir. Bunun yanında cam elyaflara nazaran daha pahalı olan malzemelerdir. Bu nedenle maliyet yerine yüksek performansın daha önem kazandığı yerlerde kullanılmaktadır (Campbell, 2004).

2.1.2.3. Aramid elyaf

Aramid elyaf ilk olarak Dupont tarafından piyasaya sunulmuştur. Bu nedenle endüstriyel anlamda aramid elyaf Kevlar ticari ismiyle anılmaktadır. Aramid elyafı yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle birçok alanda kullanılmaktadır. Sıcak yapışma özelliklerinin düşük olması, iyi emdirilebilme özelliği ve birçok polimer ile kullanılabilir olması özellikle balistik kullanımlarda tercih edilen bir elyaf haline gelmesini sağlamıştır. Darbe dayanımlarının çok yüksek olması ve zor hasarlanmaları sebebiyle savunma sanayi, otomotiv, denizcilik gibi bir çok sektörde tercih edilmiştir (Sönmez, 2009).

Tablo 2.6. Elyaf ve bazı malzemelerin mekanik özellikleri (Mazumdar, 2002)

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Spesifik Modül	Spesifik Mukavemet	%Kopma uzaması
E-Glass	2,54	70	3,45	27	1,35	4,8
S-Glass	2,5	86	4,5	34,5	1,8	5,7
Grafit, Yüksek Modül	1,9	400	1,8	200	0,9	1,5

Tablo 2.6. (Devam)

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Spesifik Modül	Spesifik Mukavemet	%Kopma uzaması
Grafit, Yüksek Mukavemet	1,7	240	2,6	140	1,5	0,8
Boron	2,6	400	3,5	155	1,3	-
Kevlar29	1,45	80	2,8	55,5	1,9	3,5
Kevlar49	1,45	130	2,8	89,5	1,9	2,5
Çelik	7,8	208	0,34-2,1	27	0,04-0,27	5-25
Alüminyum	2,7	69	0,14-0,62	26	0,05-0,23	8-16

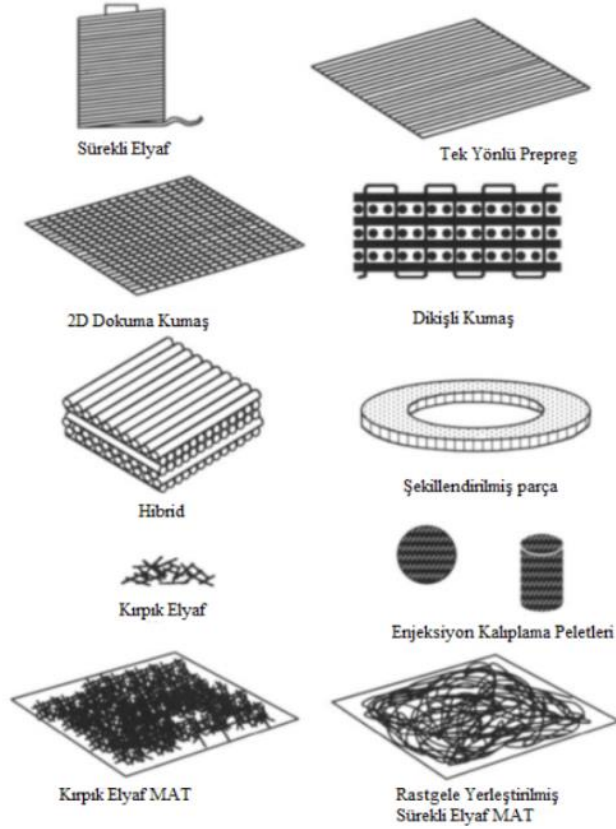
2.1.3. Kompozit ürün çeşitleri

Kompozit parçaların üretimleri her zaman tek aşamadan oluşmamaktadır. Kompozit yapılar birçok malzeme türünden oluşabilmektedir. Bu nedenle kullanılan malzeme çeşitlerine göre kompozit yapıların üretim yöntemleri değişmekte ve işlem içerikleri çoğalabilmektedir. Kompozit parça imalatında kullanılan malzeme çeşitleri Şekil 2.4.'te gösterilmektedir. Ürün formları takviye malzemesinin biçimine göre farklılık göstermektedir. Malzemeler takviye malzemesinin sürekli ya da süreksiz olmasına göre değişmektedir.

Süreksiz elyaflar, son ürün için birçok proses aşaması istemeden enjeksiyon kalıplama gibi üretim yöntemleri kullanılarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Süreksiz elyaf takviyeli yapılarda elyafın boyutuna göre mukavemet dayanımları değişmektedir. Elyaf boyu ne kadar uzun ise dayanım miktarı o kadar artmaktadır (Mallick P. K., 2010).

Kompozit parçalar için birçok ön hazırlık aşamasına karşın en yüksek dayanım değerini veren elyaf türü ise sürekli elyaf takviyeli ürün formlarıdır. Sürekli elyaf takviyeli ürünler elyaf yönlenmelerinin belirli bir doğrultuda olması ve homojen yerleştirilmesi nedeniyle en iyi mukavemet değerini vermektedir. Ayrıca elyaf yönlenmelerinin belirli olması kompozit parça tasarımcısı için kolaylık sağlamaktadır. Böylelikle tasarım doğru yönlenmeler ile çok yüksek dayanımlara sahip yapısal malzemeler elde edebilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler

kuru elyaf olarak serilebilmekte veya matris malzemesi ile ön emdirme işlemi(prepreg) uygulanarakta kullanılmaktadır (Mallick P. K., 2010).



Şekil 2.4. Kompozitlerde kullanılan ürün formları (Campbell, 2004)

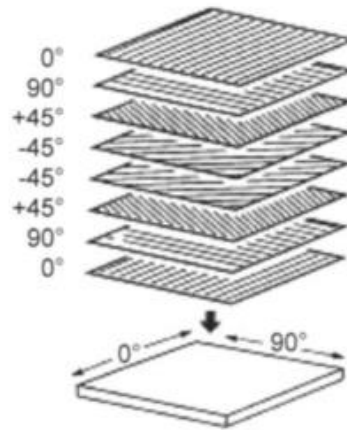
Sürekli elyaf takviyeli kompozitler dokuma kumaş ve tek yönlü prepregler olmak üzere iki halde bulunmaktadır. Dokuma kumaşlar, kuru elyafların örgü yöntemine göre 0° ve 90° olarak dokunmasıyla oluşturulan malzemelerdir. Dokuma kumaşlar kuru şekilde serimleri gerçekleştirilerek, ardından matris malzemesi belirli üretim yöntemleri ile içine emdirilebilmektedir. Kuru kumaş yerine dokuma prepregler de bulunmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Dokuma prepregler, hassas bir üretim gerektiren ve yapısal dayanımının yüksek olması gereken kompozit parçalarda kullanılmaktadır (Campbell, 2004).

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde tek yönlü elyafların genel olarak kuru şekilde serim işlemlerinin gerçekleştirilmesi zordur. Bu nedenle tek yönlü kuru elyaflara ön

emdirme işlemi uygulanmaktadır. Elde edilen malzeme tek yönlü prepreg olarak adlandırılmaktadır (Campbell, 2004).

Tek yönlü prepreglerin sürekli elyafların bir araya getirilerek, akış sırasında matris emdirilmesiyle elde edilmektedir. Tek yönlü prepreglerde kuru elyaf noktası kalmayacak şekilde matris ile ıslatılması ve elyafların matris içerisinde homojen dağılması çok önemlidir. Tek yönlü prepreglerde kullanım yerine göre elyaf matris oranı belirlenerek üretimleri gerçekleştirilmektedir.

Tek yönlü prepreg malzemeler tek başlarına kullanılamamaktadır. Bu nedenle ikinci bir işlem uygulanarak lamine haline getirilirler. Tek yönlü prepreglerin ya da dokuma prepreglerin üst üste serilmesiyle, otoklavlama gibi ikinci bir işlem tabii tutulmasıyla oluşturulan kompozit yapıya lamine denilmektedir. Laminelerde serim işlemleri parçaya uygulanacak kuvvetin yönüne göre gerçekleştirilmektedir. Kompozit parçanın dayanım ihtiyacı tasarımcılar tarafından hesaplanarak, etkisi altında kalacağı kuvvetin yönüne göre lamine serimleri yapılmaktadır. Kompozit parça üzerindeki yoğun yükün oluşacağı eksene göre sürekli elyaf yönünde serimler gerçekleştirilmektedir. Serim yönlenmeleri ve isimlendirilmesi Şekil 2.5.'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Tek yönlü prepreglerin serim açılarının gösterimi (Campbell, 2004)

Polimer matrisli kompozitler kapsamında matris malzemesine göre iki farklı tek yönlü prepreg bulunmaktadır. Bunlar termoset matrisli prepregler ve termoplastik prepreglerdir. Termoset matrisli prepregler günümüzde en yaygın kullanım alanına sahip prepreglerdir. Ancak günümüzde termoplastik prepreg üretim yöntemlerinin geliştirilmesiyle, termoplastik prepregler termoset prepreglerin yerini almaktadır.

Termoplastik prepreglerin günümüzde araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Termoplastik prepreglerde en çok kullanılan matris malzemeleri PEEK, PPS, PA, PEI gibi üstün mühendislik polimerleridir. Termoplastik matrisli prepregler tasarımcıya birçok üstün özellik kazandırmaktadır. Termoplastik matrisli prepreglerin sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Raf ömürleri yoktur,
- Genellikle reçine işlem sıcaklığında işlem görür,
- Yeniden şekillendirilebilme ve tekrar tekrar işlem görebilme özelliğine sahiptirler,
- Yüksek kimyasal direnç gösterirler,
- Daha az işlem döngüsüne ihtiyaç duyarlar,
- Daha yüksek tokluk ve darbe direnci gösterirler,
- Daha iyi tamir edilebilirlik gibi üstün özellikleri bulunmaktadır.

Termoplastik matrisli prepreglerde avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Termoplastik matrisli prepreglerin üretiminde yüksek basınç ve sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Matris emdirme işlemi çok zor gerçekleştirilmektedir (Mazumdar, 2002).

2.2. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

2.2.1. Tek yönlü termoplastik matrisli prepreg üretim yöntemleri

Tek yönlü termoplastik matrisli kompozitler günümüzde gelişimi devam eden yenilikçi malzemelerdir. Bu nedenle termoset matrisli kompozitlerin üretim

yöntemlerine göre literatürde daha az araştırma bulunmaktadır. Tek yönlü termoplastik matrisli kompozitler yüksek dayanımları ve geri dönüştürülebilir olmaları gibi üstün özellikleri sayesinde ön plana çıkmaktadır. Tek yönlü termoplastik matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak PEEK, PPS, PEI, PA, PP gibi mühendislik polimerleri kullanılmaktadır.

Tek yönlü termoplastik matrisli kompozitlerin bilinen 4 farklı üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- Ekstrüzyon kaplama yöntemi,
- Film kaplama yöntemi,
- Toz kaplama yöntemi,
- Solüsyon kaplama yöntemi genel bilinen yöntemlerdir (Cattanach, Guff and Cogswell, 1986).

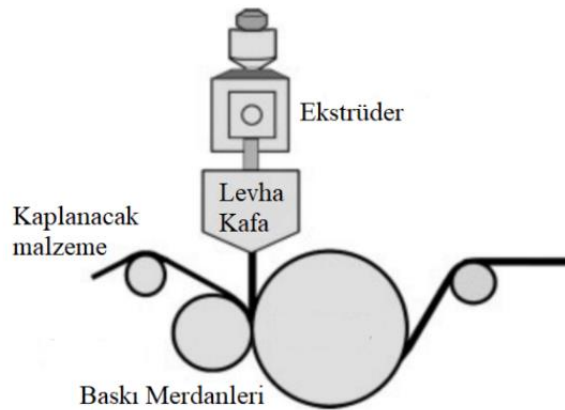
2.2.1.1. Ekstrüzyon kaplama yöntemi

Ekstrüzyon kaplama yöntemi bir ekstrüder ve yarı levha kafa adı verilen bir kafa yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ekstrüder içerisinde eriyik hale getirilen termoplastik malzeme bir levha kafa içerisine basılarak, eriyik polimerin bir film şeklinde çıkışı sağlanmaktadır. Bu şekilde kaplanmak istenen bölge yüzeyine kafa ağız bölgesi yaklaştırılarak, polimer kaplanacak malzemenin üzerine eriyik bir film şeklinde aktarılmaktadır. Ekstrüzyon kaplama sistemi genel olarak kâğıt yüzeyi, ambalaj sektörü, karton sektörü gibi alanlar da kullanılmaktadır (Wagner, Mount and Giles, 2014).

Ekstrüzyon kaplama yöntemi kompozit malzemeler içinde önemli bir yer kaplamaktadır. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin (Prepreglerin) üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Ancak Ekstrüzyon kaplama sistemlerinin daha da iyileştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir (Dogu and Gurkaynak, 2015).

Ekstrüzyon kaplama sistemi gene olarak bir ekstrüder, sıcak levha kafa, iki adet baskı merdanesinden oluşmaktadır. Şekil 2.6.'da Ekstrüzyon kaplama sisteminin şematik görünümü gösterilmektedir. İlk olarak bir boşaltıcı yardımıyla kaplanacak malzeme hatta beslenmekte ve ardından eriyik polimer malzeme, kaplanacak malzemeye baskı merdanelerinin arasında film formunda eriyik polimer verilmektedir. Böylece eriyik polimer malzeme, kaplanacak malzeme ile buluşmakta ve baskı merdanelerinin yardımıyla kaplanacak malzeme içerisine işlemesi ya da kaplanacak malzemenin yüzeyine yapışması sağlanmaktadır. Ekstrüzyon kaplama sisteminde dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır;

- Reçine ergime sıcaklığı,
- Reçine viskozitesi,
- Eriyik film ve kaplanacak malzemenin uyumu,
- Kaplama hızı ve,
- Kaplama kalınlığıdır (Wagner, Mount and Giles, 2014).



Şekil 2.6. Ekstrüzyon kaplama sistemi şematik görüntüsü (Kouda, 2008)

Doğu ve Gürkaynak tarafından yapılan çalışmada eriyik polimerin levha kafa çıkışında akış hızının homojen olmasının çok önemli olduğu ve böylece kaplama yüzeyi üzerinde homojen bir kaplama elde edileceği ifade edilmiştir (Doğu and Gurkaynak, 2015). Yine aynı referansta kafa tasarımında homojen bir basınç oluşturarak, akış oluşmasının önemine vurgu yapılmış ve çalışma kapsamında yeni kafa tasarımları üzerine gidilerek, CFD analiz programı ve sonlu elemanlar yöntemi

ile akışkanlar dinamiği hesaplanmış ve polimer reolojisi dikkate alınarak inceleme yapılmıştır (Dogu and Gurkaynak, 2015).

Ding ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise ekstrüzyon kafasının kaplama yüzeyine olan konumu araştırılmıştır. Gerçekleştirilen denemeler sırasında ekstrüzyon kafası kaplama yüzeyine paralel ve dik konumda tutularak kaplama denemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7.). Denemeler sırasında paralel konumda iken kaplamanın, kaplanacak malzemenin akış sırasında oluşan çekme kuvvetine çok bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ancak dik konumda kaplama sırasında bu belirsizlik ortadan kaldırılarak, çekme kuvveti ve kaplama malzemesinin hızı belirlenebilmektedir (Ding, Giacomini and Slattery, 2001).



Şekil 2.7. Ekstrüzyon kaplama sisteminde dik ve yatak konum

Ekstrüzyon kaplama sistemi üzerine gerçekleştirilen başka bir çalışmada kaplama kafasından çıkan eriyik polimerin kaplama kalınlığının, kafanın konumuna ve malzeme alt yüzeyinin hızına bağlı olarak oluşumu incelenmiştir. Kalınlık oluşumu için formülasyonlar çıkarılarak parametrelerin etkisi incelenmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir (Weinstein and Gros, 2005).

Nam and Carvalho tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise kaplama yüzeyi üzerine aynı anda iki farklı malzeme kaplanabilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar için özel bir Ekstrüzyon kafa tasarımı gerçekleştirilmiş ve iki akışkan aynı kafa üzerinden verilerek kaplanması amaçlanmıştır (Nam and Carvalho, 2010).

Ekstrüzyon kaplama için gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise çift yarıkli bir kafada düşük viskoziteli çözeltiler ile minimum kaplama kalınlığının elde edilebilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Düşük viskoziteli bir çözeltinin alt

taşıyıcı katman olarak kullanılmasının asgari kalınlığı azaltacağı tespit edilmiştir (Yu, Liu and Yu, 1995). Ekstrüzyon kaplama yöntemlerinin geliştirilmesi adına kafa tasarımları, levha kafa konumlandırmaları, levha kafa akış sistemleri gibi parametrelerde bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Liu, 1992; Ning, Tsai and Ta-Jo, 1996; Kouada, 2008; Bhamidipati, Didari and Harris, 2012; Ding, Fuller and Harris, 2013; Park, Shin and Lee, 2014).

Ekstrüzyon kaplama yöntemi kompozit malzeme üretimlerinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde ekstrüzyon kaplama sistemi hakkında gerçekleştirilen akademik çalışmalar sınırlıdır (Sun ve ark., 2014; Turner and Gold, 2015; Liu ve ark., 2017). Termoplastik matrisli kompozitlerde karşılaşılan zor emdirilme problemi, ekstrüzyon kaplama ile rahatlıkla çözülebilmektedir. Bijsterbosch and Gaymans tarafından ekstrüzyon kaplama sistemi ile gerçekleştirilen bir çalışmada cam elyaf lar içerisine eriyik PA malzeme emdirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sırasında impregnasyon derecesine etki eden parametreler incelenmiş ve elyaf yayılma miktarının impregnasyonu ne kadar etkilediği gözlemlenmiştir. Elyaf kalınlık ve gerginliklerinin impregnasyon derecesini az miktarda etkilediği, ancak elyaf yüzeyinde oluşturulan baskı kuvveti ile impregnasyon derecesinin arttırılabileceği tespit edilmiştir (Bijsterbosch and Gaymans, 1993).

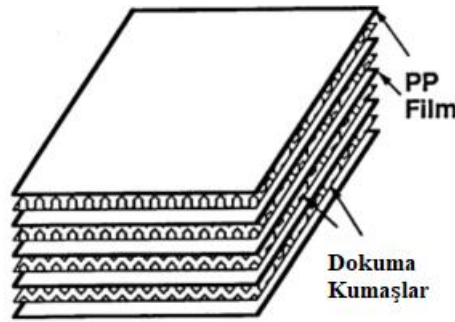
Gattinger ve arkadaşları tarafından, biomedikal ürünler için dalgalı elyaf takviyeli elastomerlerin ekstrüzyon yöntemiyle üretilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmada, çapraz kafa kaplamalı bir tasarımın bu tür malzemelerin üretimi için uygun olacağı ifade edilmiştir (Gattinger, Kirsch and Kirchebner, 2018).

Kompozit malzemeler ile gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise eriyik polimer emdirme üzerine iki farklı yöntemin etkisi araştırılmıştır. Bunlardan biri ekstrüzyon kaplama, diğeri ise farklı bir prototip işlemdir. Yapılan çalışmalar sırasında elyaf gerginliklerinin, eriyik polimer etkisinde kalma süresi, eriyik polimer sıcaklığı gibi bir çok parametrenin etkisi incelenmiştir (Peltonen ve ark. , 1992).

2.2.1.2. Film kaplama yöntemi

Film kaplama yöntemi kompozit üretimleri için uzun zamandır kullanılan bir yöntemdir. Literatürde film istifleme olarak bilinen yöntem kompozit parça üretimlerinde uzunca yıllar kullanılmış ve uzun bir süre en yüksek performansa sahip kompozit yapıların oluşturulmasına fırsat tanımıştır.

Film istifleme yöntemleri ile üretimlerde daha çok sürekli elyaf takviyeli dokuma kumaşlar kullanılabilir. Üretimde, ilk önce kompozit parçanın elyaf-matris oranına göre film kalınlığı belirlenmekte, ardından kuru kumaş ve polimer film parçaları üst üste dizilerek, yüksek sıcaklık ve basınç altında kompozit parça üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.8.). Ancak büyük boyutlu parçaların üretimine olanak sağlamaması ve üretim maliyetlerinin çok yüksek olması sebebiyle tercih edilen bir üretim yöntemi değildir (Cattanach, Guff and Cogswell, 1986).



Şekil 2.8. Film istifleme yönteminin şematik gösterimi (Ramakrishna, Hamada and Cuong, 1994)

Yapılan bir çalışmada, cam elyaf takviye kompozit malzeme ekstrüzyon ve film istifleme yöntemi ile üretilmiş, emdirme işlemi incelenmiş ve modellenerek mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Ekstrüzyon kaplama teknolojisinde numuneler ergime sıcaklığı ve merdane sıcaklığına bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermiştir. Film istifleme işleminde ise impregnasyon için kalıplama sıcaklığı ve polimerin viskozitesi ile ilişki olduğu gözlemlenmiştir (Ali, Iannace and Nicolais, 2003).

Film istifleme yöntemiyle gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise LDPE (düşük yoğunluklu polietilen), HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen), PE (polietilen) ve PP (Polipropilen) polimerleri kullanılarak lamineler elde edilmiştir. En iyi proses parametrelerinin bulunması için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Film istifleme yönteminde yüksek kalıplama sıcaklıklarına ihtiyaç duyulması sebebiyle su emme özelliklerinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle suyun uzaklaştırılmasının etkileri de çalışma kapsamında incelenmiştir (Karmaker and Hinrichsen, 1991).

Kim and Lee tarafından gerçekleştirilen bir diğer film istifleme yöntemi ile ilgili çalışmada 3 farklı PP film kullanılarak değişik işlem sürelerinde kompozit parçalar üretilmiştir. PP filmler viskozite değerlerine göre proses parametreleri incelenmiş ve proses parametrelerinin kompozit yapıların mekanik değerlerine etkileri incelenmiştir (Kim and Lee, 2016).

Film istifleme işlemi ile gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise PA6,6 film çift taraflı baskı uygulayan cam elyaf ve karbon elyaf kumaşlara impregnasyon miktarı incelenmiştir. Elyaf demetlerinin enine geçirgenliğinin analitik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından sıcaklık değerleri, proses etki süresi, konsolidasyon basıncı gibi parametreler üzerine çalışılarak, matrisin impregnasyon derecesi araştırılmıştır (Mayer, Wang and Neitzel, 1998).

2.2.1.3. Toz kaplama yöntemi

Termoplastik prepreg üretim yöntemlerinden biri de toz kaplama teknolojisidir. Termoplastik matrisler 10-100 µm aralığına kırılarak toz formuna getirilir ve toz formundaki termoplastik matris kuru bir şekilde çeşitli yöntemlerle hat akışı sırasında püskürtülerek elyaf demetlerinin içine emdirilmeye çalışılır. Toz emdirilmiş elyaflar daha sonra termoplastik matrisin erimesi için sıcak işleme tabii tutulur. Sıcak işlemin ardından termoplastik matris elyaf demetlerinin içerisine işleyerek, termoplastik matrisli prepreglerin oluşmasına imkân sağlar.

Toz kaplama yöntemi için geliştirilmiş üç farklı kaplama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- Elektrostatik Kaplama,
- Akışkan Yatak Kaplama ve
- Toz serpmeye işlemleridir.

Ramani ve arkadaşları tarafından toz kaplama işlemleri için yapılan çalışmalarda elektrostatik kaplama sistemi kullanılarak sistem içerisinde sürekli elyafların kaplanma kalitesi gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sırasında iki parametre göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan biri statik elektrik sağlayan korona voltajı, diğer ise hat hızının toz kaplama üzerindeki etkisidir (Ramani, Woolard and Duvall, 1995).

Toz kaplama işlemi ile gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise yeni bir elektrostatik akışkan yatak sistemi ile PEEK reçineli prepreg üretim çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında karbon elyaf ve cam elyaf için denemeler yapılmıştır (Muzzy ve ark. 1989).

Başka bir çalışmada ise elyaf demetleri içerisine toz matris elektrostatik sprey ile emdirilmeye çalışılmış ve kaplanmış elyaf demetleri infrared bir ısıtıcı ile ısıtılarak kristallenme oranları üzerine araştırılmıştır (Zaniboni and Ermanni, 2006).

Toz kaplama işlemlerinden toz serpmeye işlemi kullanılarak PEEK (Poli-eter-eter-eton) ve dokuma karbon elyaf kumaş üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Homojen bir yapı elde edilebilmesi ve hassas bir üretim gerçekleştirilebilmesi için toz emdirme işlemi uygulanmıştır (Mitschang, Blinzler and Wöginger, 2003).

Akışkan yatak sistemi ile gerçekleştirilen bir çalışmada ise PA12 tozları sürekli aramid elyaf demetleri içerisine emdirilmiştir. İşlem sırasında PA12 tozlarının sürekli akışkan halde bulunduğu bir akışkan yatak sistemi kullanılmıştır. Elyaf lar akışkan

yatak içerisinden geçirilerek, kuru PA12 tozlarının elyaf demetleri içerisine emdirilmesi sağlanmıştır (Rath, Kreuzberger and Hinrichsen, 1998).

Termoplastik prepreg üretimlerinde kuru toz kaplama sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Kuru toz kaplama yöntemlerinin seçilmesinin en büyük etkeni yatırım maliyetlerinin göreceli düşük olmasıdır. Bu nedenle birçok bilimsel araştırma ve patent çalışması bulunmaktadır (Hartness and Carolina, 1988; Iyer and Drzal, 1990; Miller and Gibson, 1996; Padaki and Drzal, 1999; Silva ve ark., 2009).

2.2.1.4. Süspansiyon kaplama yöntemi

Termoplastik matrisli prepreg üretimleri için bir diğer yöntem ise süspansiyon kaplama yöntemidir. Süspansiyon kaplama yönteminde iki farklı şekilde uygulanmaktadır. İlk olarak çözücü solvent yardımıyla termoplastik matris çözelti içerisine alınır. Daha sonra çözelti elyaf yüzeyine emdirilir. Emdirilme işleminin tamamlanmasının ardında kontrollü ortam altında uygun yöntemle çözücü ortamdan uzaklaştırılarak matris malzemesinin elyafa geçmesi sağlanır. Ancak bu uygulamalar kompozit yapının kimyasal direncinin düşük olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda üretim yöntemleri, çözücü solventlerin tehlikeli olmasından dolayı uygun havalandırma ortamlarında yapılmalıdır. Bu durumda direkt olarak yatırım maliyetini arttırmaktadır (Iyer and Drzal, 1990).

Süspansiyon kaplama yöntemlerinde ikinci yöntem ise termoplastik matris toz formunda bir sıvı içerisine katılmaktadır. Toz halindeki termoplastik matrisin sıvı içerisinde homojen bir şekilde çözülmeden dağılması sağlanmaktadır. Daha sonra hazırlanmış süspansiyon kuru elyaf içerisine emdirilme işlemi uygulanarak, gerekliyse kontrollü ortamlarda sıvının uzaklaştırılmaktadır. Çözülme işlemi gerçekleşmeyen süspansiyonlarda genellikle sıvı olarak su kullanılmaktadır. Termoplastik tozların homojen olarak karışması için ortama çok az miktarda yüzey aktifleştirici katılmaktadır. Ancak üretimler sırasında ekstra yatırım maliyeti oluşturmayan su, kompozit yapılar için zararlı olabilmektedir. Bu nedenle sulu süspansiyon kaplama havacılık ve uzay sanayi gibi hassas ve maliyetli uygulamalar

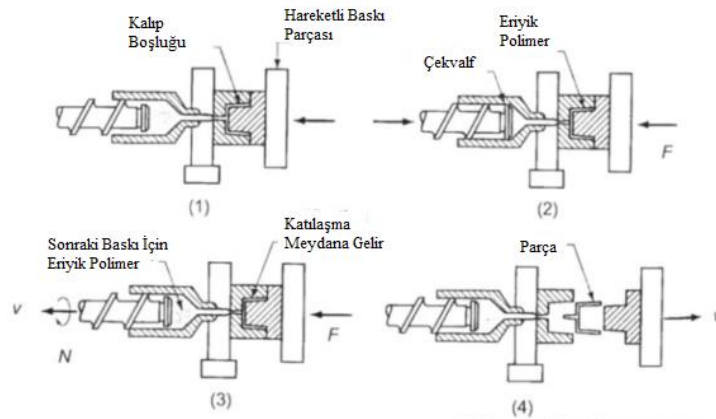
içeren alanlarda kullanılmamaktadır (Savadori and Cutolo, 1993; Gonzalez-Ibarra, Davis and Heisey, 1997; Lacroix, Lu and Schulte, 1999; Wu and Schultz, 2000; Vaidya and Chawla, 2008; Tran ve ark., 2011).

2.2.2. Termoplastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerde ürün elde edilebilmesi için sadece uygun matris ve takviye elemanın seçilerek birleştirilmesi yeterli değildir. Yeterli dayanıma sahip son ürün elde edilebilmesi için uygun üretim yönteminin seçimi de son derece önemlidir. Bunun için termoset ve termoplastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

2.2.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, çok yüksek üretim kapasitelerine çıkılabilen bir üretim yöntemidir. Enjeksiyon kalıplama yönteminde, yüksek sıcaklık ve basınç altında polimer malzeme ile harmanlanmış takviye malzemesini bir kalıp içerisine doldurarak üretilmekte ve direkt olarak son ürün elde edilmektedir. Bu yöntem ile yüksek hızda çok karmaşık parça tasarımlarının üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle enjeksiyon kalıplama yönteminin üretim kapasitesi oldukça yüksektir. Enjeksiyon kalıplama yönteminin üretim şematik görüntüsü Şekil 2.9.'da verilmektedir (Campbell, 2004).

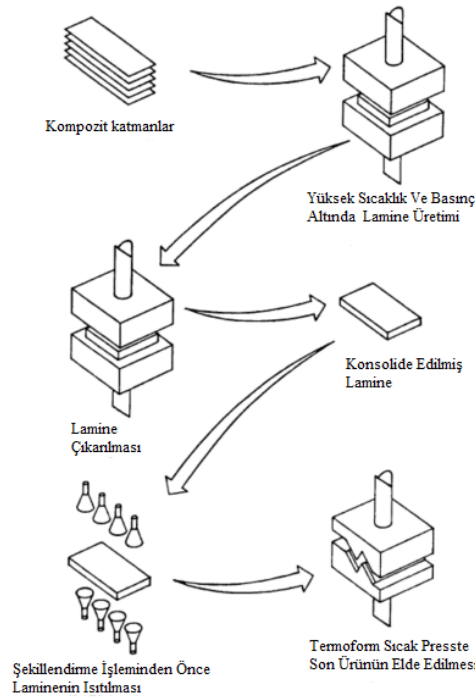


Şekil 2.9. Enjeksiyon kalıplama yönteminin şematik görünümü (Campbell, 2004)

Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kısa ve uzun elyaf takviyeli termoplastik kompozit parçalar üretilmektedir. Elyaf uzunlukları 0,7 mm ile 3,2 mm arasında değişebilmektedir. Elyaf parça içerisinde rastgele yönlenmiş şekilde bulunmaktadır. Otomotiv sektöründe kompozit parça üretimlerinde genel olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2004).

2.2.2.2. Termoform üretim yöntemi

Termoplastik kompozit üretim yöntemlerinin en önemlilerinden biri termoform üretim yöntemidir. Termoform üretim yönteminde ilk olarak kompozit katmanlar üst üste koyularak yerleştirilir. Daha sonra yüksek basınç ve sıcaklık altında pres yardımıyla ısıtarak lamine katmanlarının birleştirilmesi sağlanmaktadır. Ardından lamine şeklindeki kompozit yapı ısıtılır ve başka bir pres altında şekillendirme işlemine tabi tutularak basınç altında soğutma işlemi uygulanır. Soğutma işleminin tamamlanmasının ardından erkek ve dişi kalıp ayrılarak nihai kompozit parça elde edilir. Termoform üretim yöntemlerinin şematik görüntüsü Şekil 2.10.'da gösterilmektedir (Advani, Sozer and Mishnaevsky, 2003; Campbell, 2004).

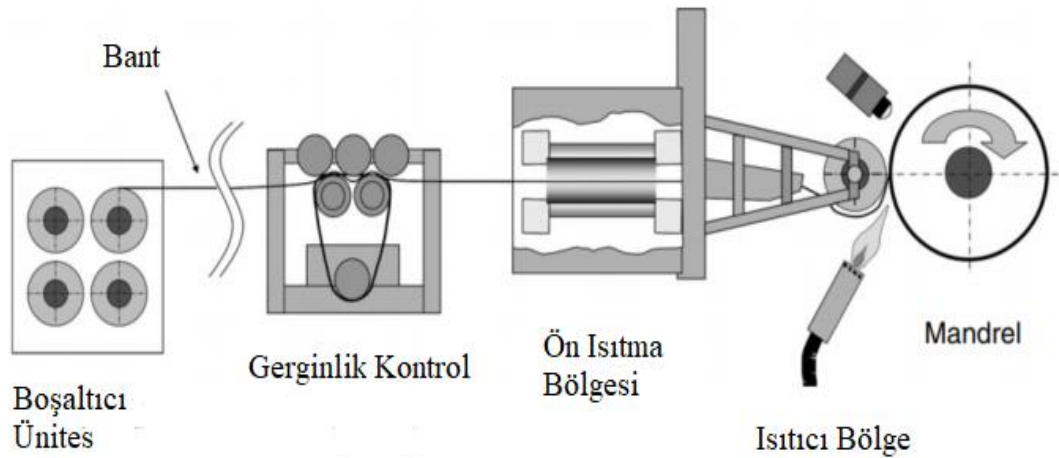


Şekil 2.10. Termoform üretim yönteminin şematik görünümü (Campbell, 2004)

Termoform üretim yöntemi basit ve hızlı bir üretimdir. Kompozit parça üretimlerinde çok yüksek üretim hızlarına çıkılarak yüksek üretim kapasitelerine ulaşılabilmektedir. Termoform üretim yöntemlerinde en sınırlayıcı özellik kalıp maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

2.2.2.3. Bant sarma üretim yöntemi

Termoplastik bant sarma işlemi, önceden termoplastik reçine emdirilmiş bant şeklindeki prepreglerin bir mandrel üzerine sıcaklık ve basınç altında sarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Sarım işlemi sırasında termoplastik bantların eritilmesi ve birleştirilmesi için, serim işlemi gerçekleştiren merdane ile mandrel yüzeyinin birleşim noktası ısıtılarak katlar arası yapışma sağlanmaktadır. Bu sarma işlemiyle birlikte ekstra bir üretim süreci gerektirmeden son ürün elde edilebilmektedir (Şekil 2.11.) (Mazumdar, 2002).

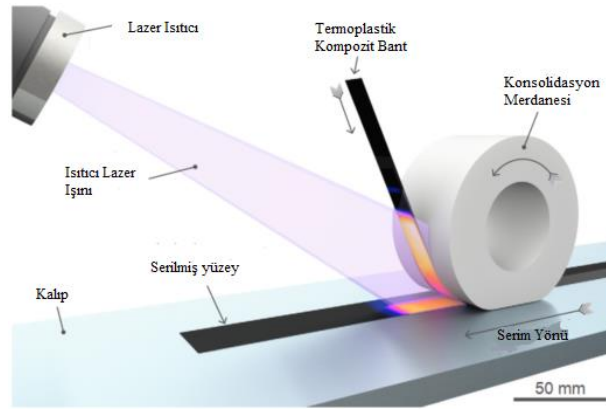


Şekil 2.11. Bant sarma üretim yönteminin şematik görüntüsü (Mack and Schledjewski, 2012)

Termoplastik bant sarım yöntemi ile çok büyük parçalar tek seferde üretilebilmektedir. Yüksek basınç ve sızdırmazlık isteyen tank üretimleri bant sarma yöntemi ile gerçekleştirilerek dayanım değerlerinde çok yüksek sonuçlar elde edilmektedir (Mazumdar, 2002).

2.2.2.4.Otomatik termoplastik bant serme sistemleri (ATL)

Otomatik termoplastik bant serme sistemi, bant sarma prosesi ile benzerlik gösterir. ATL sistemlerinde sürekli elyaflara önceden emdirilmiş 3 mm ile 12 mm arasında termoplastik bantlar kullanılmaktadır. Termoplastik bantlara bir baskı merdanesi ile basınç uygulanarak ve ısıtıcı yardımıyla bantlar eriyik hale getirilerek alt tabakaya serim işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2.12.). Proses sırasında istenilen eksenlerde ve boyutlarda termoplastik bant serme işlemi yapılabilir. Bu sayede çok karmaşık yapılı, büyük boyutlu ve çok yönlü serim işlemleri tek seferde son ürün eldesine imkan sağlar (Advani, Sozer and Mishnaevsky, 2003).



Şekil 2.12. Termoplastik bant serme sistemi (Stokes-Griffin and Compston, 2019)

2.2.2.5.Otoklav üretim yöntemi

Polimer matrisli kompozit malzemelerin parça üretiminde genel olarak otoklav cihazı kullanılır (Şekil 2.13.). Otoklavlama işlemi, kompozit üretiminde vakum, sıcaklık ve basınç gibi kompozit üretimlerinde en önemli üç parametrenin proses sırasında kontrollü bir şekilde takip edilebilmesine imkân sağlar. Otoklavlama işlemi en güvenilir üretim yöntemi olarak gösterilmektedir. Çünkü otoklav üretimleri sırasında, parametrelerin kontrollü bir şekilde takibinin yapılabilmesi parça hatalarının minimuma inmesinde büyük avantaj sağlamaktadır (Mazumdar, 2002; Advani, Sozer and Mishnaevsky, 2003).



Şekil 2.13. Otoklav cihazı

Otoklavlama işlemleri ilk olarak, üretilecek parçanın negatif kalıbına termoplastik prepreglerin serim işlemi gerçekleştirilir. Sonra bunlar kalıpla birlikte vakum paketi içerisine alınarak, proses sırasında sürekli vakum altında tutulur. Vakuma alma işleminin ardından otoklavlama işlemi için cihaz içerisine atılır. Otoklavma işlemi sırasında matris malzemesinin ergime sıcaklığının bir miktar üstüne çıkılacak şekilde kontrollü ısıtma yapılır. Aynı şekilde tüm çevrim boyunca matrisin emdirme işleminin sağlanabilmesi için parça basınç altında işlem görmektedir. Otoklav içerisinde basınçlandırma genel olarak azot gazı ile yapılır. Azot gazı parça üzerine her noktadan homojen bir basınç uygulanmasını sağlar. Otoklav, ergime sıcaklığının üzerinde bir miktar bekledikten sonra kontrollü bir şekilde soğutulur. Böylece uygulanan otoklav çevrimi tamamlanır (Mazumdar, 2002; Advani, Sozer and Mishnaevsky, 2003).

2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Avrupa'daki kompozit malzeme talebinin büyük çoğunluğu otomotiv, havacılık, savunma, inşaat ve altyapı sektörlerine aittir. Rüzgâr enerjisi, denizcilik, elektronik, spor ve eğlence sektörleri de kompozit malzemeler için büyüyen pazarlardır (Devic ve ark., 2018). Kompozit malzemelerin global ölçekte kullanım oranı Şekil 2.14.'te görülmektedir. Özellikle polimer matrisli kompozitler sağladıkları avantajlar nedeniyle birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Her sektörde farklı amaç ve

beklentilerle kullanılan kompozit malzemelerin sektörel bazdaki maliyet-performans değerlendirmesi Şekil 2.15.'te gösterilmektedir.

Değer olarak		Hacim olarak	
Uzay ve Havacılık	23%	Yapı ve İnşaat	26%
Taşımacılık ve Otomotiv	22%	Taşımacılık ve Otomotiv	25%
Yapı ve İnşaat	14%	Elektrik ve Elektronik	16%
Rüzgar Enerjisi	12%	Tüketim Malları	8%
Elektrik ve Elektronik	12%	Rüzgar Enerjisi	7%
Tüketici Malları	9%	Boru ve Tank	7%
Denizcilik	5%	Uzay ve Havacılık	5%
Boru ve Tank	2%	Denizcilik	5%
Diğer	1%	Diğer	1%

Şekil 2.14. Kompozit malzemelerin dünya ölçeğinde dağılımı hacim ve değer olarak gösterdiği farklılıkları(Gülmez, 2018)



Şekil 2.15. Maliyet ve performansın ileri malzeme kullanan sanayilerdeki göreceli önemini gösteren grafik (Yılmaz and Evcı, 2015)

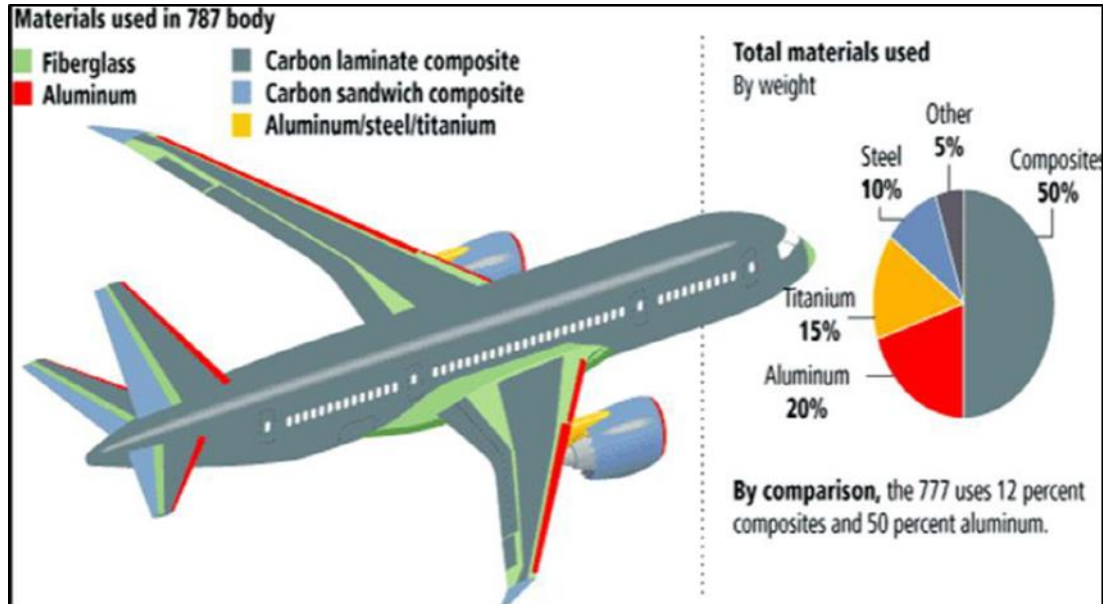
2.3.1. Havacılık ve uzay yapıları

Wright kardeşlerin gerçekleştirdiği ilk başarılı uçuş denemesinden beri kompozit malzemeler uçaklarda kullanılmaktadır (Yılmaz and Evcı, 2015). Hafiflik özellikleri sayesinde PMK'ler yakıt tasarrufu sağlayarak havacılık endüstrisinin en temel taleplerine yanıt vermektedir (Koniuszewska and Kaczmar, 2016). İlk kullanım amacıyla ağırlık azaltmak olsa da zamanla mukavemet, korozyon direnci vb. özellikleri de göz önüne alınarak uçak tasarımları yapılmaya başlanmıştır.

Günümüzde uçak tasarımlarını daha da geliştirecek polimer nano kompozitler üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Yılmaz and Evcı, 2015).

Polimer matrisli kompozitlerin (PMK) gelişmesi ve yaygınlaşmasına esas olarak öncülük eden askeri uçak endüstrisidir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağırlık azaltma, parça sayısını düşürme, kompleks şekilli parça üretimi, hurda miktarının azalması, daha iyi yorulma ömrü ve iyileştirilmiş korozyon direnci sağlanması karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin avantajları olarak sayılabilir.

Ticari havacılık sektöründe de kompozit malzemeler sürekli yeni çözümler ve tasarımlar geliştirilmesinde büyük rol oynamıştır (Yılmaz and Evcı, 2015). Havacılık sektöründe kompozit malzeme kullanımı konusunda asıl atılımı ise Boeing B-787 Dreamliner serisi yapmıştır. Uçağın kanatları, kuyruğu ve gövdesi dâhil olmak üzere ağırlığının yarısına denk gelecek oranda polimer kompozit malzeme kullanılmıştır (Şekil 2.16.) (Shivi Kesarwani, 2017).



Şekil 2.16. Boeing 787'nin kompozit yapısı (Shivi Kesarwani, 2017)

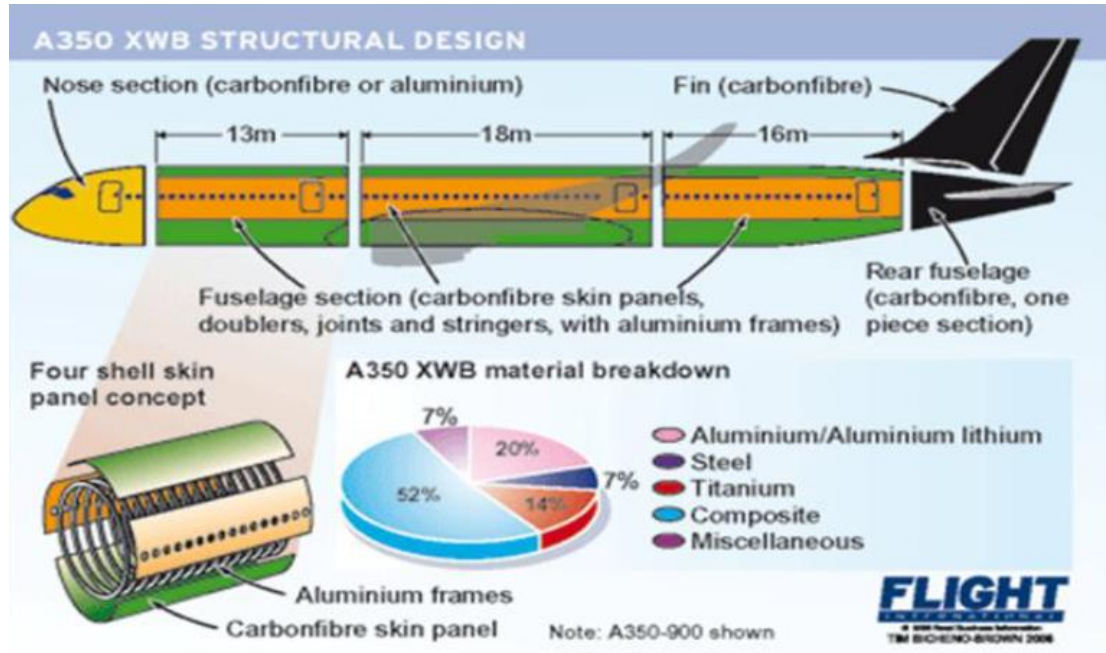
Boeing 787 için pencere çerçeveleri, braketler, bağlantı parçaları, köşebentler, klipsler vb. Hexcel (USA) tarafından üretilen karbon fiber takviyeli epoksi HexMC

kompozitleri kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.17.) (Koniuszewska and Kaczmar, 2016).



Şekil 2.17. HexMC parçaları: pencere çerçeveleri, braketler, bağlantı parçaları, köşebentler, klipsler, tavalar, Hexcel (ABD) (Koniuszewska and Kaczmar, 2016)

Kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı tipik uçak örnekleri Boeing 757, 767 ve 777 ile Airbus A310, A320, A330 ve A340 uçaklarıdır.



Şekil 2.18. A350XWB'nin kompozit yapısı (Shivi Kesarwani, 2017)

Ticari uçaklarda kompozit malzeme kullanımına bir diğer örnek ise Airbus A350XWB'dir. Şekil 2.18.'de gösterildiği gibi %52'si kompozit malzemelerden yapılmıştır. Arka gövde, yatay dengeleyici ve fin / dümen tertibatı karbon fiber

yapıdadır. Gövde panelleri, çerçeveleri, pencere çerçeveleri, klipsleri ve kapıları karbon fiber takviyeli plastikten imal edilmiştir. A350XWB uçağında kompozit malzeme kullanılarak servis süresi 6 yıldan 12 yıla çıkarılmış ve bakım maliyeti düşürülmüştür (Shivi Kesarwani, 2017).

Polimer kompozit malzemelerin mukavemet-ağırlık oranı metallere kıyasla çok daha iyidir. Uçaklarda PMK kullanımı ağırlığı azaltarak yakıt tüketimini ve buna bağlı olarak emisyonu düşürür. Daha az bağlantı parçası gerektirdiklerinden parça sayısını azaltır, bakım/onarım maliyetini düşürür ve süreci kolaylaştırır (Shivi Kesarwani, 2017).



Şekil 2.19. Tipik bir modern karbon fiber / epoksi gövde bölümü (Irving and Soutis, 2015)

Uçaklarda karbon fiber, cam ve aramid takviyeli epoksi olmak üzere üç temel polimer kompozit kullanılır (Şekil 2.19.). Bunların içinde en yaygın olanı karbon fiber takviyeli epoksidir(Shivi Kesarwani, 2017). Her ne kadar termoset kullanımı yaygın olsa da havacılık sektöründe termoplastiğe geçiş süreci yaşanmaktadır. Polimer kompozit üretim süreçlerinde meydana gelen yenilikler polietereterketon (PEEK), poliarileterketon (PAEK), polieterimid (PEI) ve polifenilen sülfid (PPS) gibi yüksek performanslı termoplastiklerin kullanımını teşvik edicidir. Özellikle geri dönüşüm ve maliyet konularında termosetlerle rekabet etmektedirler. Ancak uçaklarda kullanım için onay belgesi alınması zor ve uzun bir zaman gerektirdiğinden termoplastiklerin kullanımını yavaş ilerleyen bir süreçtir.

Havacılık uygulamalarında kullanılan polimer kompozitler genellikle otoklav yöntemiyle şekillendirilmektedir. Bununla birlikte otoklav dışı üretim yöntemi olarak geçen ve tek kapalı hacim kompozit üretim yöntemi olan elyaf sarma teknolojisi, fırlatma araçları ve füzeler için roket motoru mahfazaları gibi kabuk benzeri bileşenlerin üretilmesinde kullanılmaktadır (Shivi Kesarwani, 2017). Havacılık sektöründe yaygınca kullanılan polimer matrisler ve takviye fiberler sırasıyla Tablo 2.7. ve Tablo 2.8.'de verilmektedir.

Tablo 2.7. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer matrisler(Shivi Kesarwani, 2017)

Termosetler			Termoplastikler	
Isıtma ile kürlenme (çapraz bağlanma)			Kimyasal reaksiyon yok	
Epoksiler	Fenolik Reçineler	Polyester	Poliimidler	PEEK, PPS
<ul style="list-style-type: none"> - En yaygın - Toplam kompozit kullanımının %80'i - orta derecede yüksek sıcaklık - Görece pahalı 	<ul style="list-style-type: none"> - Daha ucuzdur - Daha düşük viskozitelidir - Yüksek sıcaklıkta kullanılabilir - Kaliteli kompozit eldesi zordur 	<ul style="list-style-type: none"> - Ucuzdur - Kullanımı kolaydır - Oda sıcaklığındaki uygulamalarda popülerdir 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek sıcaklık uygulaması, 300 °C - Proses edilmesi zor - Kırılgan 	<ul style="list-style-type: none"> - İyi derecede hasar toleransı - 300-400 °C sıcaklık gerektirir. Bu nedenle proses edilmesi zor
<ul style="list-style-type: none"> - Düşük büzülme oranı (%2-3) - Kürlenme sırasında uçucu salınmaz 	<ul style="list-style-type: none"> - Daha yüksek büzülme oranı - Kürlenme sırasında uçucu salınımı 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek büzülme oranı (%7-8) 	-	-
<ul style="list-style-type: none"> - Birçok farklı şekilde polimerizasyon yapılabilir; farklı yapılar, morfolojiler ve özellikler sergileyebilir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Termal oksidasyona karşı doğal kararlılık - İyi ateş ve alev geciktirici - Epoksilerden daha kırılgan 	<ul style="list-style-type: none"> - İyi kimyasal direnç - Geniş özellik aralığı ancak epoksilerden düşük kırılgan - Düşük Tg 	-	-
<ul style="list-style-type: none"> - İyi depolama süresi 	<ul style="list-style-type: none"> - Daha düşük depolama süresi – prepreg üretimi zor 	<ul style="list-style-type: none"> - Prepreg üretimi zordur 	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sonsuz depolama ömrü, ancak prepreg üretimi zor
<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek sıcaklıklarda şişme ve degradasyona sebep olacak mutlak nem (%5-6) - Uzun vadede UV degradasyonu 	<ul style="list-style-type: none"> - Daha düşük depolama süresi – prepreg üretimi zor - Nem tutar ancak çalışma aralığında nemin önemli bir etkisi yoktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Neme epoksilerden daha az dayanıklıdır 	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nem tutmaz

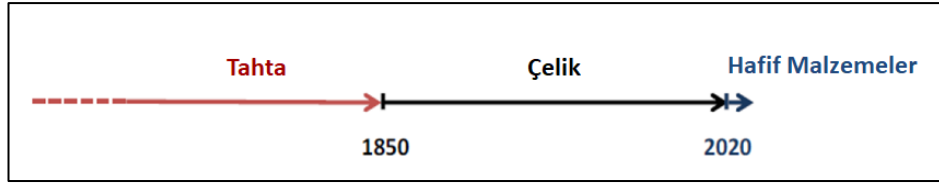
Tablo 2.8. Havacılık uygulamalarında yaygın kullanılan takviye fiberleri (Nayak, 2014)

Fiber	Yoğunluk (GPa)	Modül (GPa)	Mukavemet (GPa)	Uygulama Alanları
Cam				- Küçük yolcu klima bölümleri, uçak içyapısı, ikincil parçalar, radomlar; roket motor gövdesi
- E-cam				- Küçük yolcu klimasında ağır yüklü parçalar
- S-cam	- 2,55 - 2,47	- 65 - 75 - 85 - 95	- 2,2 - 2,6 - 4,4 - 4,8	
Aramid				- Kaportalar; yük taşımayan parçalar
- Düşük Modül				- Radomlar, bazı yapısal parçalar; roket motor gövdesi
- Orta Modül	- 1,44	- 80 - 85	- 2,7 - 2,8	
- Yüksek Modül	- 1,44 - 1,48	- 120 - 128 - 160 - 170	- 2,7 - 2,8 - 2,3 - 2,4	- Ağır yüklü parçalar
Karbon				- Klimalar, uydular, uydu çanağı, füzeler vs. neredeyse tüm parçaları
- Standart modül (yüksek mukavemet)	- 1,77 - 1,80	- 220 - 240	- 3,0 - 3,5	- Yüksek performanslı savaş uçaklarının temel yapısal parçaları
- Orta modül	- 1,77 - 1,81	- 270 - 300	- 5,4 - 5,7	
- Yüksek modül	- 1,77 - 1,80 - 1,80 - 1,82	- 390 - 450 - 290 - 310	- 2,8 - 3,0 4,0 - 4,5 - 7,0 - 7,5	- Uzay yapıları, klimalardaki kontrol yüzeyleri
- Ultra yüksek mukavemet				- Yüksek performanslı savaş uçakları ve uzay mekiklerinin temel yapısal parçaları

2.3.2. Denizcilik sektörü

Denizcilik sektöründe fiber takviyeli polimer kompozit uygulamasının geçmişi 2. Dünya Savaşı'na kadar uzanmaktadır. Savaş sebebiyle kereste bulunması giderek güçleşip, maliyetlerin artmasıyla birlikte tekne inşasında fiber takviyeli polimer kompozitler kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte deniz tuzunun ve mikroorganizmaların tahta yapısını bozması, metal parçalardaki korozyon problemi, ağırlığın azaltılma ihtiyacı fiber takviyeli polimer kompozitleri tercih sebebi haline gelmiştir (Selvaraju and Ilaiyavel, 2011)

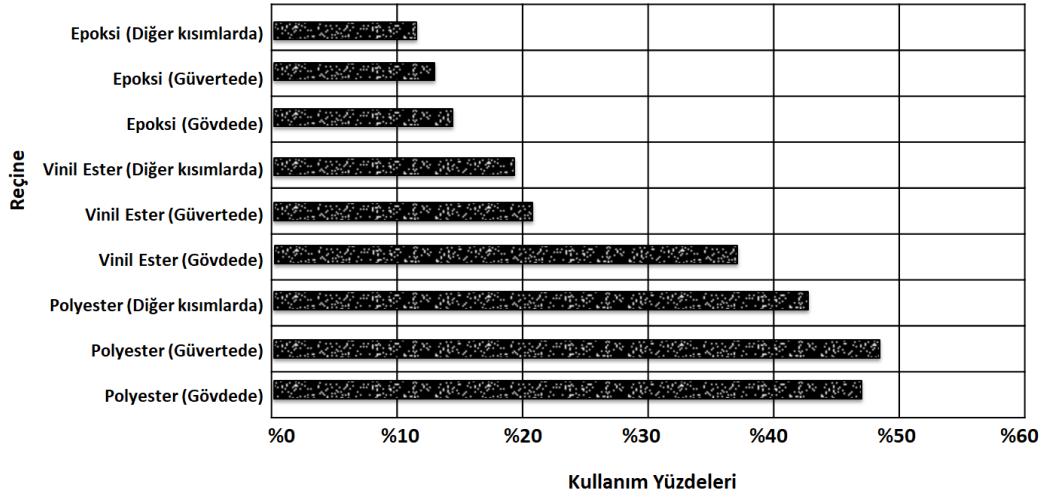
Deniz araçları yapımında ağırlığın azaltılması, üretim ve bakım verimliliğinin artırılmasının yanı sıra güvenliğin ve güvenilirliğin artması hedeflenmektedir. Bu hedef göz önünde bulundurulduğunda denizcilik sektöründe kullanılan malzemelerin teknolojik gelişmelere bağlı olarak tarihsel gelişimi Şekil 2.20.'de verilmektedir.



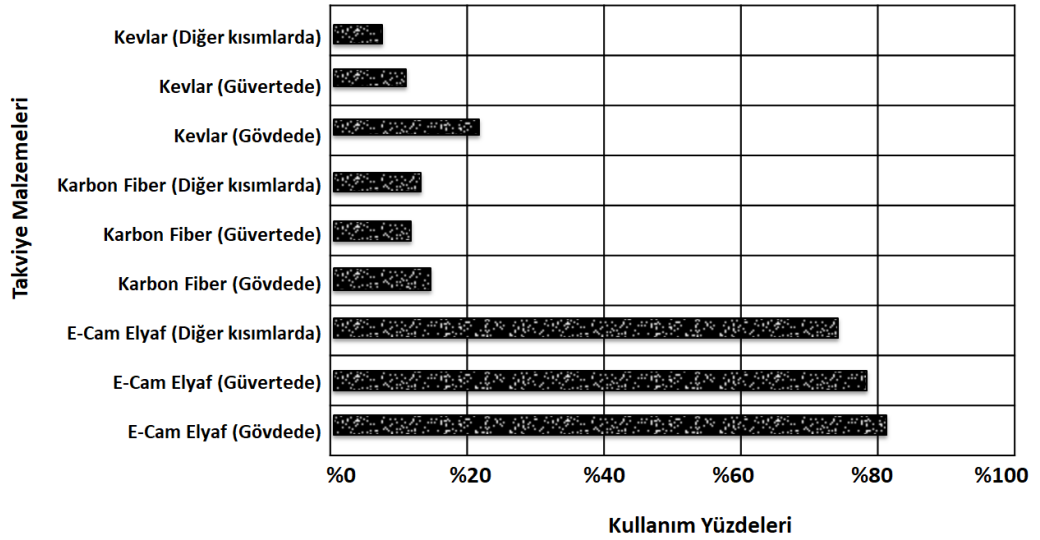
Şekil 2.20. Denizcilikte kullanılan malzemelerin tarihsel gelişimi (Zisismpoulos and Tsouvalis, 2015)

Çoğu deniz aracında cam elyaf takviyeli polyester kullanılmaktadır. Sandviç yapılar ve karbon fiber/aramid fiber takviyeli polimer kompozitler, maliyetleri çok yüksek olduğundan genellikle yüksek performanslı yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir. Kompozitlerin savaş gemilerinde ve denizaltılardaki çeşitli ikincil yapılarda kullanımına ilişkin araştırmalar yapılmaktadır (Selvaraju and Ilaiyavel, 2011).

Eğlence ve ticari amaçlı teknelerde kullanılan kompozit malzemelerin %95'inden fazlası cam takviyeli polyesterdir. Düşük maliyetinin yanı sıra; şekil verme kolaylığı, yüksek korozyon direnci, hafif olması, tamirinin kolay olması ve titreşim sönümlenme özellikleri cam takviyeli polyesterleri tercih sebebi haline getirmiştir (Selvaraju and Ilaiyavel, 2011). Ancak tüm bu avantajlarına rağmen cam takviyeli polyesterler günümüzde en temel sorun haline gelen “geri dönüşüm” ihtiyacına cevap verememektedir. Denizcilik sektöründe en çok kullanılan polimerler termoset reçinelerdir. Kullanılan reçinelerin ve takviye malzemelerinin oranları Şekil 2.21. ve Şekil 2.22.'de verilmektedir (Türkmen and Durmuş, 2013). Termosetler kimyasal yapıları itibariyle geri dönüştürülebilir olmadıklarından sürdürülebilir bir teknoloji değildir ve bu nedenle yeni tasarımlarda yenilikçi yaklaşımlara ihtiyaç vardır (Neşer, 2017).



Şekil 2.21. Reçinelerin yat sektöründeki kullanım yüzdeleri (Türkmen and Durmuş, 2013)



Şekil 2.22. Elyafların yat sektöründeki kullanım yüzdeleri (Türkmen and Durmuş, 2013)

2.3.3. Otomotiv endüstrisi

Polimer matrise fiber takviye edilmesiyle mekanik değerlerde iyileşme görülürken malzemenin ağırlığında düşüş görülür. Dolayısıyla polimer matrisli kompozitler otomotiv sektöründe de geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle otomotiv sektörü için yakıt tüketimini azaltmaya yönelik yeni yönetmelikler sebebiyle polimer kompozitlere geçiş bir trendden çok zorunluluktur. Örneğin AB mevzuatına göre izin

verilen emisyon oranı 2015 yılında <130 g CO₂/km iken 2021 yılında <95 g CO₂/km sınırı getirilecektir (Komornicki ve ark., 2017). Emisyonu azaltmanın yolu yakıt tüketimini azaltmaktan, bunun da yolu ağırlığı düşürmekten geçmektedir. Bu nedenle otomotiv sektöründe PMK uygulamaları artarak devam edecektir. PMK'ler hâlihazırda gövde panelleri, yaprak yaylar, tahrik mili, tamponlar, kapılar, yarış arabası gövdeleri vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

Zamanla gelişen kompozit üretim teknolojileri sayesinde son yıllarda daha fazla geleneksel parçanın yerini PMK'ler almıştır. Tablo 2.9.'da son yıllarda otomobillerdeki bazı kompozit uygulamalarının örnekleri verilmektedir.

Tablo 2.9. Kompozit parçaların otomobillerde kullanım örnekleri (Komornicki ve ark., 2017)

OEM-MODEL	UYGULAMA	MALZEME	YIL
BMW i3	Yolcu hücresi (passanger cell)	CFRP	2013
BMW i8	Yolcu hücresi (passanger cell)	CFRP	2014
Alfa Romeo 4C	Şase	Prepreg (CF, epoksi)	2013
Alfa Romeo 4C	Dış gövde	SMC	2013
Alfa Romeo 4C	Tamponlar ve çamurluklar	CF + PUR-RIM	2013
McLaren MP4-12C Spider	Kabin tavanı, şasi, kaporta	CF monocell, hafif CF gövde panelleri	2013
BMW M6 Convertible	Tavan bölmesi kapağı, bagaj kapağı	GFRP	2013
BMW M6	Coupe araba çatı	CFRP	2012
Daimler Smart 3rd generation electric	Tekerlek jantları	GFRP	2012
Callaway Corvette	Gövde aerodinamik seti	CFRP	2012
Lexus LFA	Kabin, zemin, çatı, sütunlar, kaput	CFRP	2012
Lamborghini Aventador LP700-4	Ön ve arka tamponlar, gövde aerodinamik kiti	CFRP	2012

Tablo 2.9: (Devam)

OEM-MODEL	UYGULAMA	MALZEME	YIL
Land Rover- Evoque	Gösterge paneli, iç kapı modülleri	GFRP	2011-12
Faurecia Jeep Liberty SUV	Kapı modülü	GFRP	2010
Daimler AGT-Mercedes	Sıvı filtre modülü	GFRP	2009-10

*CFRP: Carbon fiber reinforced polymer- karbon fiber takviyeli polimer

*GFRP: Glass fiber reinforced polymer - cam elyaf takviyeli polimer

2.3.4. İnşaat

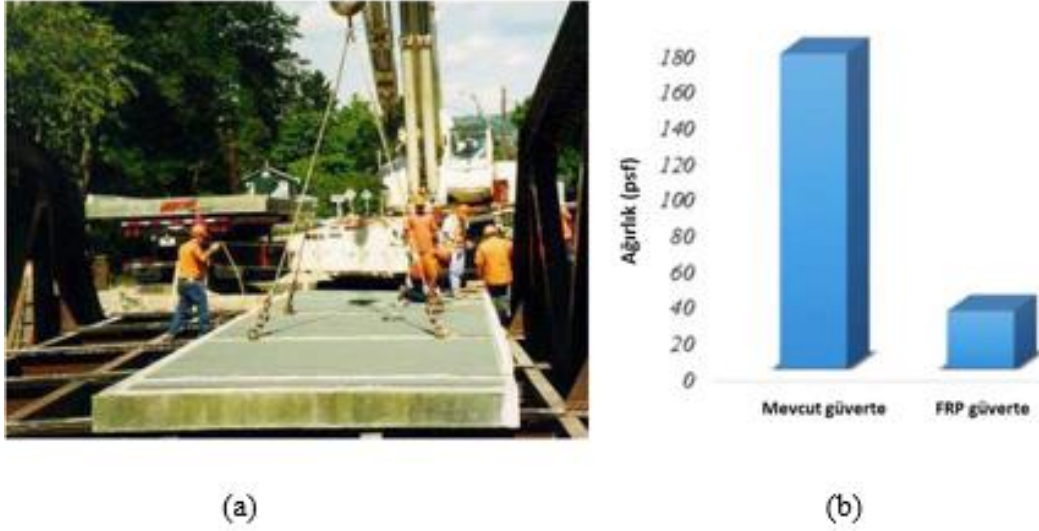
Polimer kompozit malzemelerin en yaygın kullanıldığı sektörlerden biri de inşaat sektörüdür. Hafiflik, korozyon direnci, uzun ömürlü olmaları ve deprem hasar dayanımları sebebiyle tercih sebebi olmaktadır. İnşaat mühendislerinin dünya genelinde karşılaştığı en büyük zorluklar mevcut karayolu köprülerinin ve diğer inşa edilmiş tesislerin güçlendirilmesi ve onarılmasıdır. Çelik, beton ve ahşap köprüler ve yapıların kapasitesini arttırmak için bir takım yenilikçi yöntemler geliştirilmiş olsa da hala araştırma aşamasındadır.

Pultrüzyon yöntemiyle üretilen fiber takviyeli polimer (PFRP) kompozit parçalar ana yapı elemanları olarak birkaç projede kullanılmıştır. İlk uygulamalardan biri, Florida'daki Sun Bank Binası'nın üstündeki dört PFRP taret kulesinin yapımıdır (Şekil 2.23.). Tüm kolonlar ve kirişler, FRP cıvataları ve somunları kullanılarak birbirine bağlanmıştır.



Şekil 2.23. 10,7 m yükseklik x 10,7 m kare zeminde pultrüzyon yöntemiyle üretilen taret kulesi, Orlando, Florida, ABD(Mosallam, 2014)

PMK'lerin inşaat sektöründe kullanımına yönelik bazı örnekler Şekil 2.24. ve Şekil 2.25.'te yer almaktadır.



Şekil 2.24. a) Tamamı kompozit köprü güvertesi, b) kompozit malzeme kullanımı öncesi ve sonrası ağırlık, ABD (Mosallam, 2014)



Şekil 2.25. Tamamı kompozit fiber optik kablo hattı, Danimarka (Mosallam, 2014)

2.3.5. Spor eşyaları

Golf sopaları, kayaklar, oltalar, tenis racketleri vb. uygulamalarda PMK'ler hafiflik, yüksek mukavemet ve titreşim sönümlenme özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Spor ekipmanlarındaki uygulamalara bazı örnekler Tablo 2.10.'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Spor ekipmanlarında kullanılan fiber takviyeli kompozit uygulamalarına örnekler (Zhang, 2015)

ŞEKİL	UYGULAMA
Plaka yapı	Kayaklar, sörf tahtaları, rüzgar sörfü, masa tenisi tahtası, çıtalar ve gliding kanatları vs.
Silindirik yapı	Tenis, badminton, oltalar, golf sopaları, beyzbol sopaları, hoket sopaları vs.
Film yapı	Tüm kast çeşitleri, golf sopası başları, bot gövdesi
Diğer yapılar	Kılıç, tırmanış ipi, çeşitli halatlar vs.

2.3.6. Biyomedikal uygulamalar

Kompozit malzemeler çok çeşitli mekanik ve biyolojik özellikler elde etmek için tasarlanabilmektedir. Biyomedikal uygulamalar için kompozit malzemelerin kullanımı tıbbi implantlar, ortopedik cihazlar, X-ışını tabloları vb. olmak üzere oldukça çeşitlidir. Kardiyovasküler uygulamalar, diş hekimliği, ağız ve çene ameliyatları, doku mühendisliği ve ortopedide uygulama alanı bulmaktadır (Salernitano and Migliaresi, 2003).

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deneysel çalışmalar; iki farklı takviye malzemesi ve iki farklı matris malzemesi ile gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesi olarak Torayca marka T700 (%0,3 sizing içeren, 12K elyafı (800 g/1000 m), 7 µ filament çapı) kodlu termoplastik uyumlu karbon elyaf ve Cam Elyaf Sanayi A.Ş.'nin PP3 tipi tek uçlu fitil ürünü (1200 tex(g/1000 m), 13 µ elyaf çapı) termoplastik uyumlu cam elyafı kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise Arkema marka Rilsamid kodlu poliamid-12 (Akışkanlık 8,0 g/ 10 dk), Evonik vestosint 2161 kodlu poliamid-12 toz (25 µ toz boyutu) ve Repol marka H030SG kodlu polipropilen (Akışkanlık 3,9 g/ 10 dk) seçilmiştir.

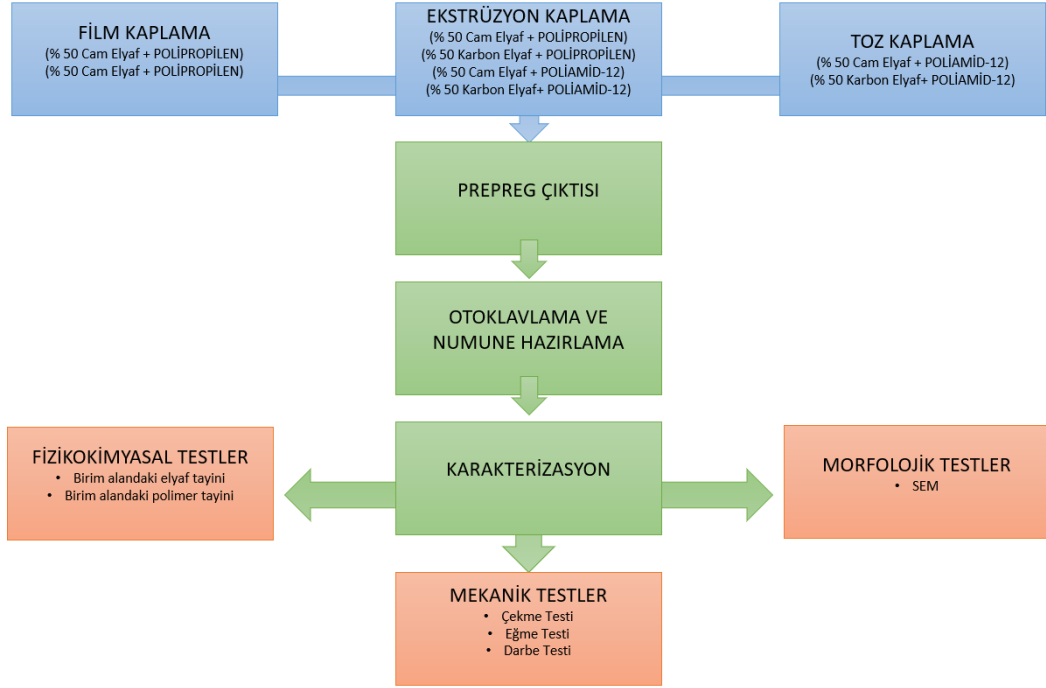
3.2. Yöntem

Deneysel çalışmalarda, film, ekstrüzyon ve toz kaplama olmak üzere üç farklı kaplama yöntemiyle tek yönlü termoplastik prepreg üretimi gerçekleştirilmiştir. 3 farklı kaplama yönteminin tek yönlü prepregler üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için üretilen prepreglerden test lamineleri üretilerek çeşitli testler ile karakterize edilmiştir.

Çalışmalar;

- 3 farklı kaplama yöntemi ile tek yönlü termoplastik prepreglerin üretilmesi,
- Tek yönlü prepreglerden test panellerinin oluşturulması,
- Test numunelerinin hazırlanması ve
- Karakterizasyon aşamalarından oluşmaktadır.

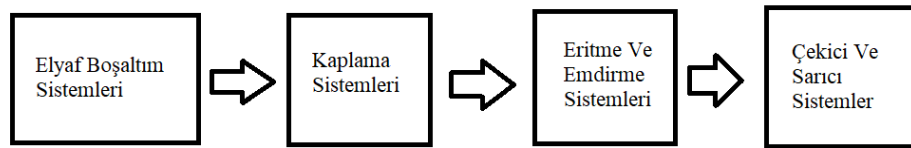
Bu çalışmada yapılan işlemler Şekil 3.1.'de kısaca özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Takip edilen işlem akış şeması

3.2.1. Tek yönlü termoplastik prepreg üretimleri

Bu çalışma, MİR Araştırma ve Geliştirme A.Ş. bünyesinde bulunan tek yönlü prepreg geliştirme hattında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.'de tek yönlü termoplastik prepreg geliştirme hattına ait şematik bir görüntü yer almaktadır.



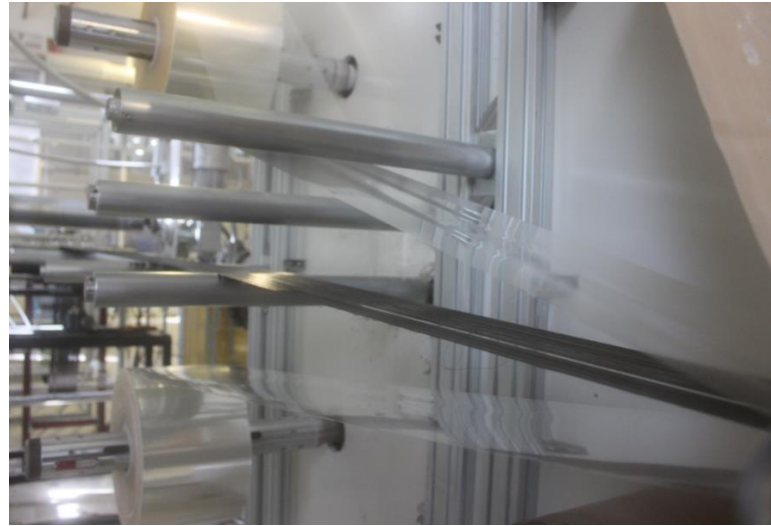
Şekil 3.2. Tek yönlü termoplastik prepreg üretim hattı şematik görüntüsü

İlk olarak sürekli elyaf demetleri boşaltım sisteminden hat içerisine beslenmektedir. Hat akışı sırasında kuru elyaf demetleri kaplama sistemi içerisinden geçerek matris malzemesi ile kaplanmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi kaplama yöntemi olarak bu çalışmada ekstrüzyon, film ve toz kaplama yöntemleri uygulanmıştır.

Ekstrüzyon kaplama yönteminde, levha kafa yardımıyla eriyik polimer, elyaf demetleri üzerine beslenmiştir (Şekil 3.3.). Film kaplama yönteminde elyaf demetleri üzerine film formunda bulunan matris, hat akışı sırasında aktarılmış ve elyaf demetleriyle birlikte film matris malzemesi sandviç bir yapı oluşturarak emdirilmiştir (Şekil 3.4.). Toz kaplama yönteminde ise toz formunda bulunan matris malzemesi, nozül yardımıyla statik ortamda elyaf demetleri üzerine püskürtülmüştür (Şekil 3.5.).



Şekil 3.3. Ekstrüzyon kaplama



Şekil 3.4. Film kaplama



Şekil 3.5. Toz kaplama sistemi

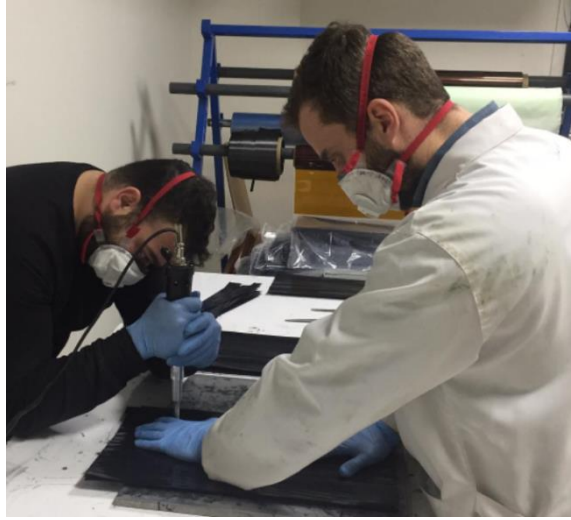
Kaplama işlemi sonrası hat akışı sırasında eritme ve emdirme sistemi kısmında eritme yapılarak ve basınç uygulanarak polimerik esaslı malzemenin fiberlere emdirilmesi sağlanır. Sonrasında soğutulan prepregler çekici ve sarıcı sistemler vasıtasıyla kontrollü şekilde çekilerek hattan alınır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Prepreg çıktısı

3.2.2. Otoklav prosesi ve test numunelerinin hazırlanması

Üretimi yapılan tek yönlü termoplastik prepreglerin mekanik testlerinin yapılabilmesi için serim işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7.). Serim işlemleri test standartlarından istenilen panel kalınlıklarını elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Serim işlemlerinin ardından test panellerinin üretimi için otoklavlama işlemi öncesi paketlenme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.8.).



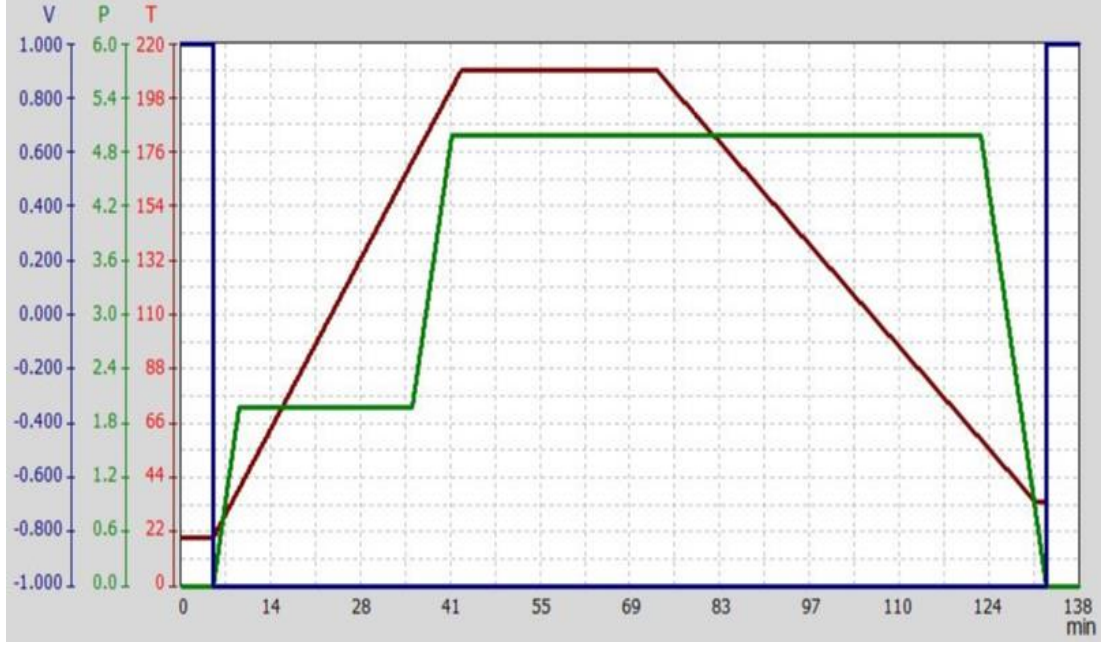
Şekil 3.7. Serim işlemleri



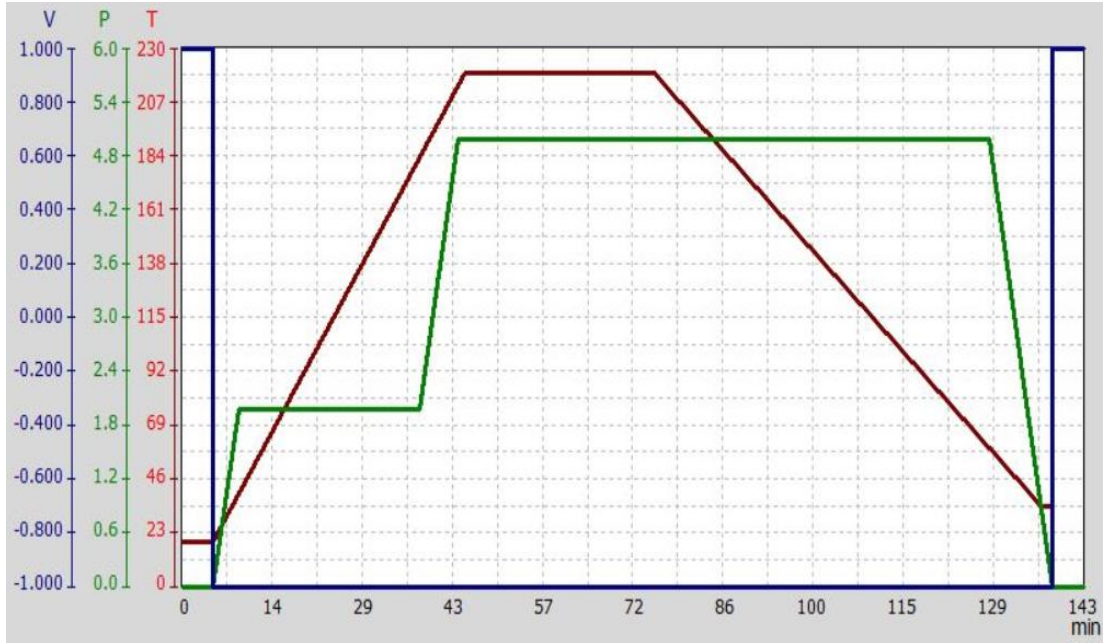
Şekil 3.8. Paketleme işlemi

Otoklav prosesi 420 °C sıcaklığa çıkabilen İTALMATIC marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Otoklavlama işlemi poliamid-12 ve polipropilene göre 2 farklı çevrim ile uygulanmıştır. Çevrim parametre grafikleri Şekil 3.9. ve Şekil 3.10.'da

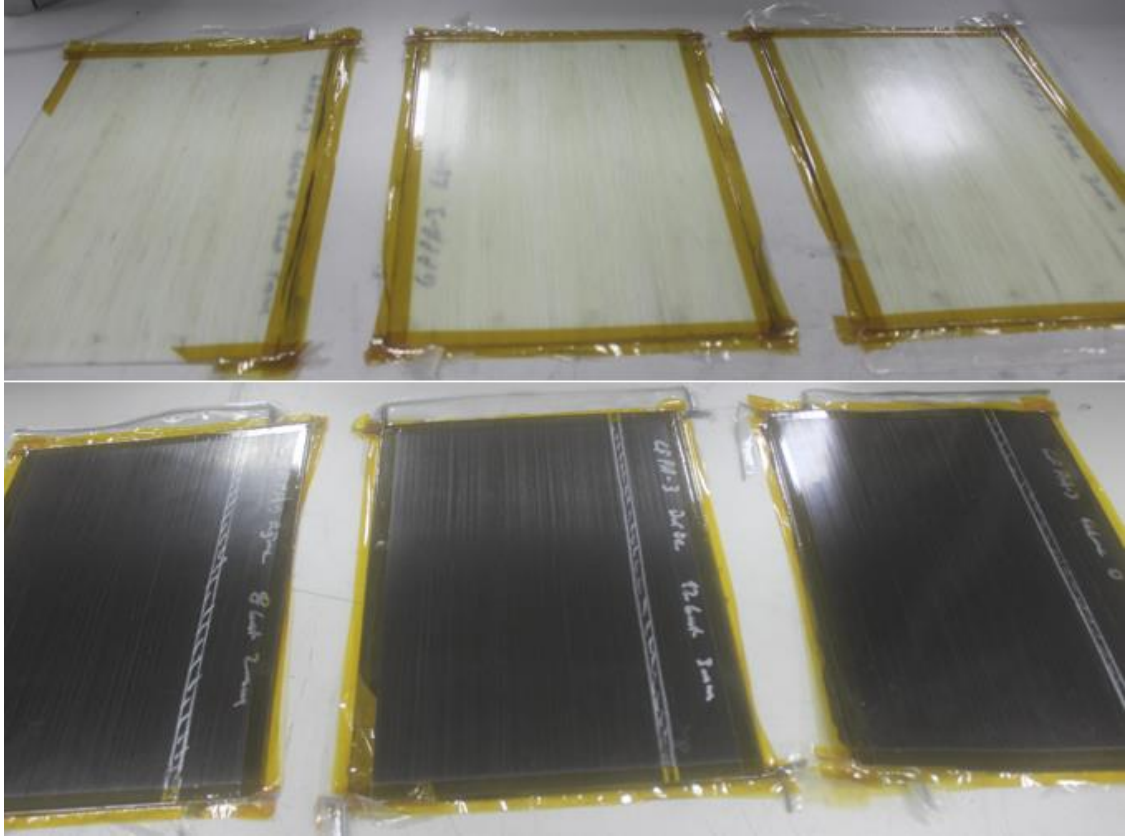
görülmektedir. Otoklav çevrimlerinin tamamlanmasının ardından elde edilen test panellerinin görüntüleri Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.9. Polipropilen matrisli otoklav çevrimi

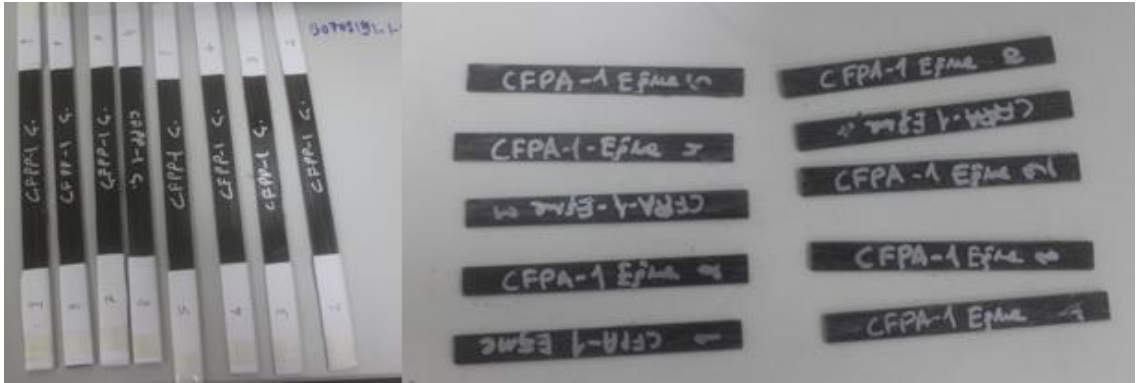


Şekil 3.10. Poliamid-12 matrisli otoklav çevrimi



Şekil 3.11. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli test panelleri

Otoklav işlemleri tamamlanan test panelleri 3 eksenli CNC tezgahında test standartlarına uygun şekilde kesilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Test numuneleri

3.2.3. Prepreglerin karakterizasyonu

3.2.3.1. Fizikokimyasal testler

Cam Elyaf Takviyeli Prepregler : Cam elyaf takviyeli kompozitler için fizikokimyasal testler çerçevesinde birim alandaki polimer miktarı ve elyaf miktarı tespit edilmiş ve bunun için BS EN ISO 1172 standardı kullanılmıştır (British Standards Institution BSI, 1999). Standart gereği test için, önce belirli boyutlarda (Yüzey Alanı, A = 20 mm x 10 mm) kesilen lamine tartılır ve sonra belirli bir sıcaklıkta kalsinasyon işlemine tabii tutulur. Kalsinasyon sonrası kalan numune tekrar tartılır ve kalsinasyon öncesindeki kütesinden çıkarılarak kompozit malzemenin yanmaz madde içeriği (cam elyaf miktarı) belirlenir.

Kalsinasyon işlemi öncesinde numunenin konulacağı kroze tartılıp kül fırınında 10 dk boyunca 105 ± 3 °C'de kurutulur. Oda sıcaklığına geldiğinde tekrar ağırlığı ölçülür. Bu işleme ağırlık sabitlenene kadar devam edilir. Sabitlenen kroze ağırlığı m_1 olarak kaydedilir. Kurutulmuş kroze içerisine konulan kesilmiş lamine kül fırınında 105 ± 3 °C'de ağırlık sabitlenene kadar kurutma işlemine tabii tutulur. Sabitlenen kroze + prepreg ağırlığı m_2 olarak kaydedilir.

Kurutulmuş kroze içindeki kuru numune, kül fırınında 625 °C'de ağırlık sabitlenene kadar kalsine edilir. Kül fırınından alınan numune desikatör içerisinde oda sıcaklığına gelene kadar bekletilir. Oda sıcaklığındaki kroze + numune ağırlığı tekrar ölçülerek m_3 olarak kaydedilir.

Kompozit malzemenin cam elyaf içeriği (%) aşağıdaki formül ile bulunur.

$$M_{\text{cam}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Birim alandaki polimer miktarını (PAW) bulmak için:

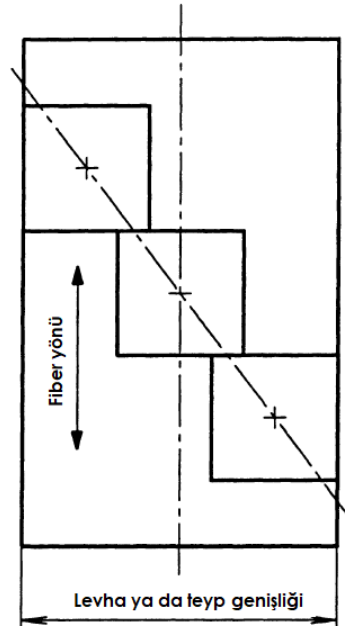
$$PAW = (m_2 - m_3)/A, \text{ g/m}^2 \quad (3.2)$$

Birim alandaki elyaf miktarını (FAW) bulmak için:

$$FAW = (m_3 - m_1)/A, \text{ g/m}^2 \quad (3.3)$$

formüllerini kullanılır.

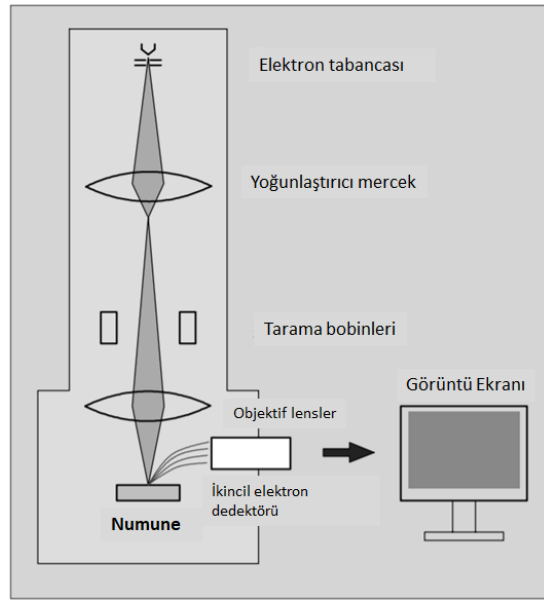
Karbon Elyaf Takviyeli Prepregler: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde ise birim alandaki polimer ve karbon fiber miktarının belirlenmesi için BS EN 2559:1997 standardı kullanılmıştır. Test numunesi 100 ± 1 mm boyutlarında kare şeklinde kesildikten sonra 2 saat boyunca test atmosferinde şartlandırılmıştır (Şekil 3.13). Sonrasında konsantre sülfürik asit ve hidrojen peroksit ile muamele edilerek polimer tamamen çözülür, ortamda karbon fiber kalır. Buradan birim alandaki polimer (PAW) ve fiber (FAW) miktarları bulunmuştur (EN2559, 1997).



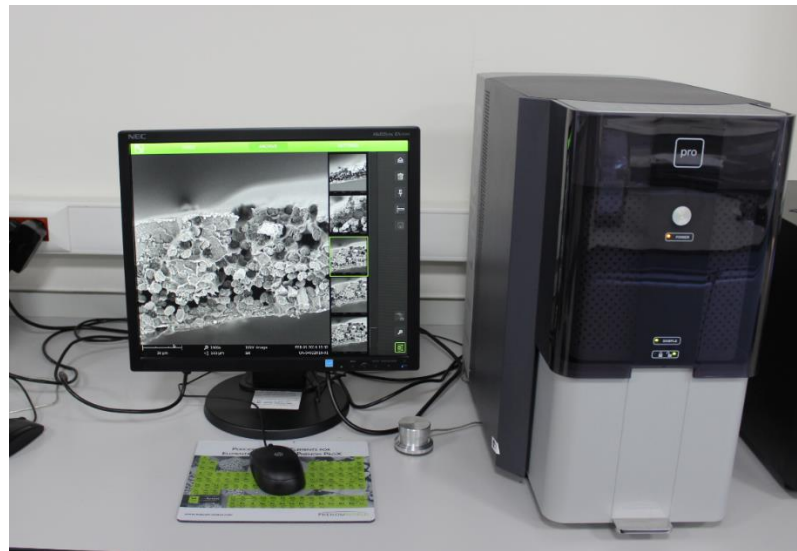
Şekil 3.13. Numunelerin karbon fiber tek yönlü levha veya teyp numunesi üzerine konumlandırılması örneği (EN2559, 1997)

3.2.3.2. Morfolojik testler

Taramalı elektron mikroskobu veya SEM, numune yüzeyine elektron bombardımanı göndererek yüzeydeki atomların elektronlarla etkileşmesini sağlar ve bu etkileşime göre yüzeyin topografik özelliklerini ortaya koyar. Şekil 3.14.'te SEM çalışma prensibi görülmektedir. Üretilen prepregrlerin morfolojik incelemesi Phenom G3 Pro marka bir taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15.).



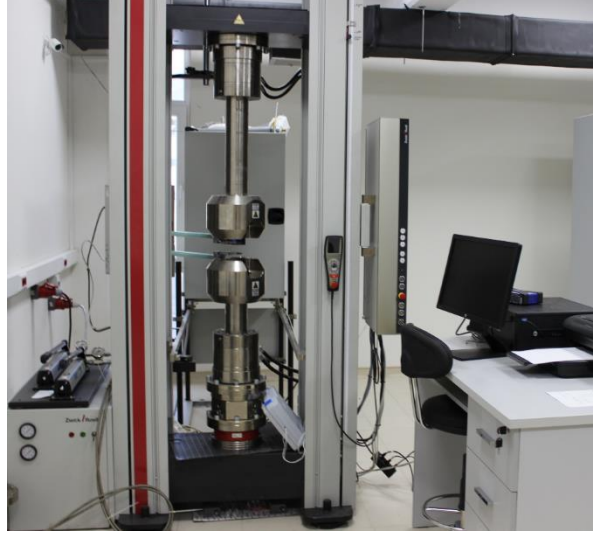
Şekil 3.14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışma prensibi (Jeol Ltd, 2009)



Şekil 3.15. Morfolojik incelemelerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu

3.2.3.3. Mekanik testler

Mekanik testler kapsamında üç farklı test uygulanmıştır. Bunlarda çekme ve eğme testi Zwick Roell Z250 cihazında yapılmıştır (Şekil 3.16.). Darbe testi ise Instron Ceast 9050 cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17.).



Şekil 3.16. Zwick Roell Z250 mekanik test cihazı



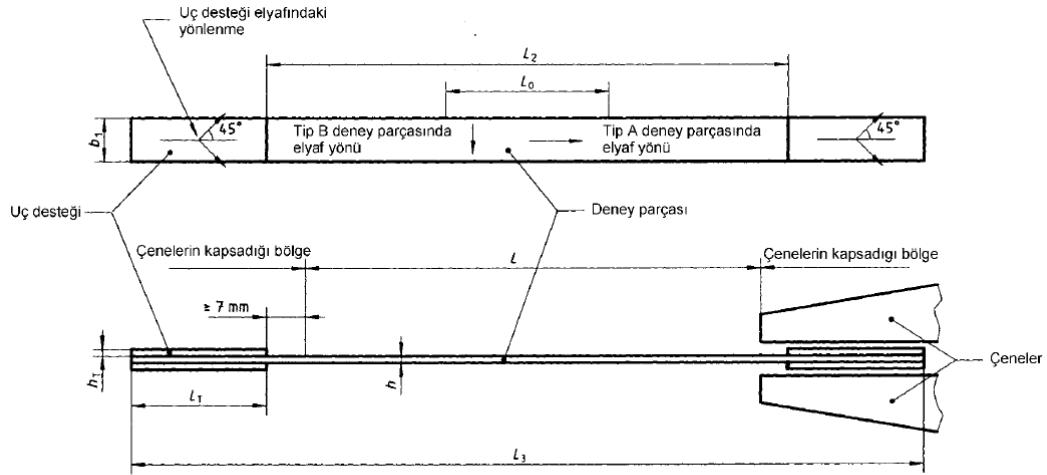
Şekil 3.17. Instron Ceast 9050 darbe test cihazı

Çekme Testi: Tek yönlü elyaf takviyeli plâstik kompozitler için “EN ISO 527: Plâstikler – Çekme özelliklerinin tayini” standardı kullanılmıştır. Standartta belirtilen deney metodu prepreg malzemeler dâhil, termoplastik veya termoset matriksli kompozitlerin tümü için uygundur. Takviye malzemeleri, karbon elyaf, cam elyaf,

aramid elyaf ve diğer benzer elyaflarını kapsamaktadır. Test sonucunda çekme mukavemeti, çekme modülü vb. belirlenir. Test numunesine ait standarda uygun ölçüler Şekil 3.18. ve Tablo 3.1.'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Çekme testi numune ölçüleri (EN ISO 527-5, 2010)

Numune	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Tip A	250 ± 0,2	15 ± 0,5	1 ± 0,2



		Ölçüler mm'dir	
		Tip A	Tip B
L_3	Toplam uzunluk	250	250 ¹⁾
L_2	Uç destekleri arasındaki mesafe	150 ± 1	150 ± 1
b_1	Genişlik	15 ± 0,5	25 ± 0,5
h	Kalınlık	1 ± 0,2	2 ± 0,2
L_0	Ölçme uzunluğu (uzama ölçerler için tavsiye edilen)	50 ± 1	50 ± 1
L	Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi (nominal)	136	136
L_T	Uç desteklerinin uzunluğu	≥ 50	≥ 50 ¹⁾
h_T	Uç desteklerinin kalınlığı	0,5 - 2	0,5 - 2

Şekil 3.18. Çekme testi numune ve çene ölçüleri (EN ISO 527-5, 2010)

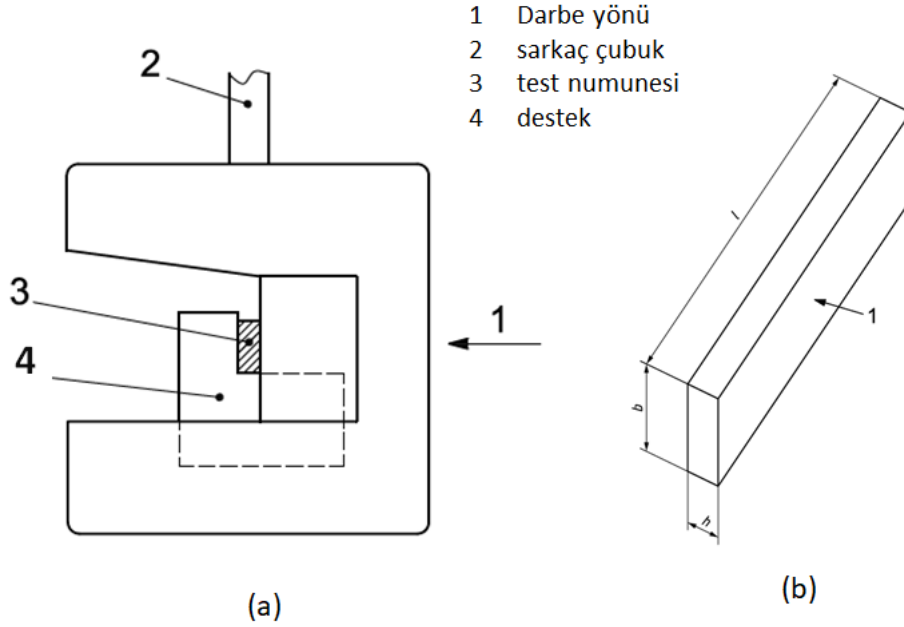
Darbe Testi: Darbe testi, malzemenin tokluğu ve kırılabilirliği hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılır. Malzemenin tokluğu plastik deformasyon sırasında enerjisi absorplama derecesine bağlıdır. Kırılabilir (gevrek) malzemelerin darbe esnasında absorpladığı enerji, dolayısıyla tokluğu düşüktür. Malzeme üretim yöntemine göre

BS EN ISP 179 standardındaki test ölçülerinde (Tip 2) hazırlanmıştır. Sıcaklık, malzemenin darbe enerjisini etkileyebileceğinden test öncesinde numuneler standartta belirlenen koşullarda şartlandırmaya tabi tutulmuştur. Tablo 3.2.'de darbe testi için numune ölçüleri ve Şekil 3.19.'da ise test düzeneği görülmektedir.

Tablo 3.2. Darbe testi için numune ölçüleri (BS EN ISO 179-1, 2010)

Numune	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Mesafe (mm)
Tip 2*	$75 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$3 \pm 0,2$	$60 \pm 0,2$

*Standartta tanımlanmıştır (BS EN ISO 179-1, 2010)



Şekil 3.19. a) Darbe kenarı ve destek blokları, b) düzlemesine (flatwise) darbe (BS EN ISO 179-1, 2010)

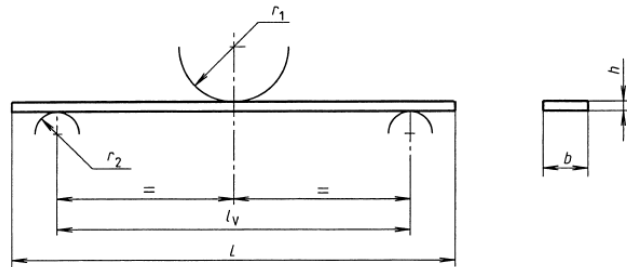
Eğme Testi: Eğme testi için iki farklı takviye malzemesi içinde ayrı test standardı kullanılmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin eğme özellikleri tayini için “BS EN ISO 14125:1998: Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties” standardı kullanılmıştır. Yapılan üç nokta eğme testinde cam elyaf sistemleri için uygun olan Metot A, Sınıf III numune boyutları kullanılmıştır (BS EN ISO 14125:1998, 2002) .

Tablo 3.3. Cam elyaf takviyeli kompozitler için metot A (üç nokta eğme) için test numunesi boyutları

Malzeme	Numune Uzunluğu (l) (mm)	Dış Mesafe (L) (mm)	Genişlik (b) (mm)	Kalınlık (h) (mm)
Sınıf III Tek yönlü (0) ve çok yönlü kompozitler, $5 < G_{13} \leq 15$ (örn. cam elyaf sistemleri)	60	40	15	2
Toleranslar	-0 +10	± 1	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$

* G13: interlaminar kayma modülü (MPa)

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin eğme özellikleri tayini için “BS EN 2562:1997 Carbon fibre reinforced plastics - Unidirectional laminates - Flexural test parallel to the fibre direction” standardı Tip A uygulaması kullanılmıştır (BS EN 2562:1997, 1999). Şekil 3.20.’de gösterilen eğme testi düzeneği ve test numunesine ait boyutlar Tablo 3.4.’te verilmiştir.



Şekil 3.20. Karbon elyaf için eğme testi düzeneği ve numune yerleşimi

Tablo 3.4. Karbon elyaf için eğme testi düzeneği ve numune boyutları

Sembol	Tip A
b	$10 \pm 0,2$ mm
L	100 ± 1 mm
l_v	$80 \pm 0,5$ mm
h	$2 \pm 0,2$ mm
r_1	$12,5 \pm 0,1$ mm
r_2	$5 \pm 0,1$ mm

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma sonucunda üç farklı kaplama yöntemi ile 2 farklı takviye malzemesi ve 2 farklı matris malzemesi kullanılarak toplam 8 farklı üretim gerçekleştirilmiştir. Deneme üretimlerinin takibi ve test numaralandırma prosedürü için Tablo 4.1.'de görülen kodlama sistemi uygulanmıştır. Tüm prepreg üretimlerinde ağırlıkça %50 elyaf ve takviye malzemesi kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Deneme üretimleri sonrası numune kodlama sistemi

Kaplama Türü	Kaplama Kodu	Takviye Malzemesi	Matris Malzemesi	Numune Kodu
Ekstrüzyon	1	CF	PP	CFPP-1
		CF	PA	CFPA-1
		GF	PP	GFPP-1
		GF	PA	GFPA-1
Film	2	GF	PP	GFPP-2
		CF	PP	CFPP-2
Toz Kaplama	3	CF	PA	CFPA-3
		GF	PA	GFPA-3

4.1. Fizikokimyasal Test Sonuçları

Her üretim çıktısı için 3'er tekrarlı fizikokimyasal test uygulanmıştır. Gerçekleştirilen testler sonucunda hat akışı sırasında kaplama kalitesinin homojenitesi değerlendirilmiştir. Fizikokimyasal test sonuçları Tablo 4.2.'de verilmiştir.

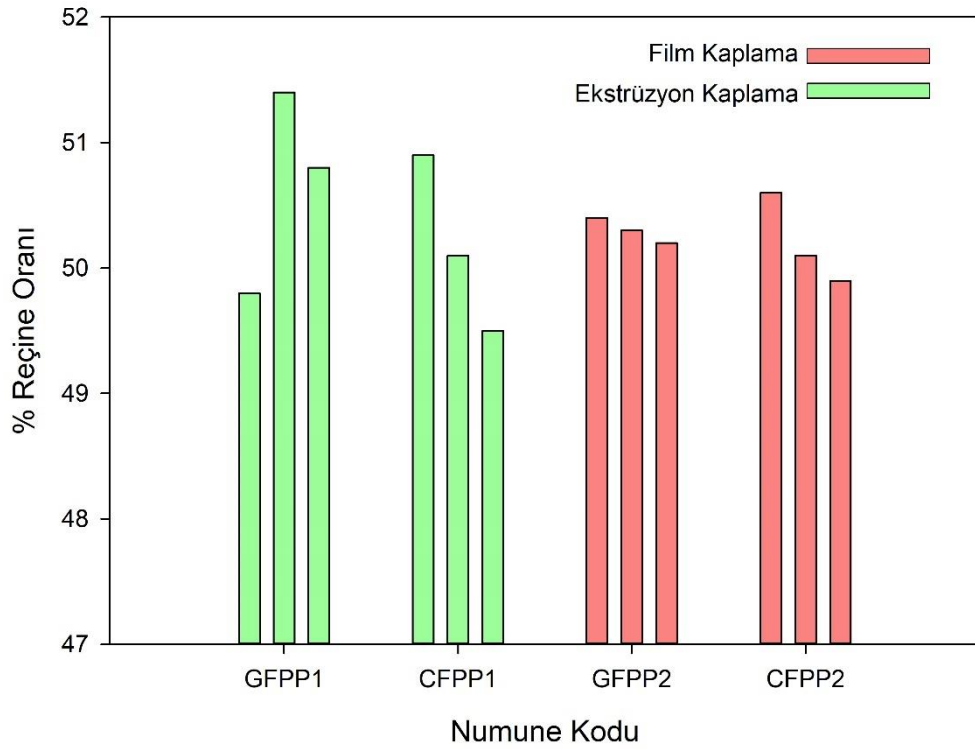
Tablo 4.2. Prepreg çıktılarının fizikokimyasal test sonuçları

Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Prepreg Ağırlığı (g/m²)	Elyaf Ağırlığı (g/m²)	Reçine Oranı (%)
Film	GFPP-2	499 (±3)	248 (±2)	%50,3 (± 0,1)
Kaplama	CFPP-2	299 (±2)	149 (±1)	%50,2 (± 0,3)
	GFPP-1	500 (±5)	247(±1)	%50,7 (± 0,7)
Ekstrüzyon	CFPP-1	299 (±4)	149 (± 0,2)	%50,2 (± 0,6)
Kaplama	GFPA-1	497 (± 4)	247 (±1)	%50,3 (± 0,5)
	CFPA-1	296 (± 5)	149 (±0,2)	%49,7 (± 0,7)
Toz	GFPA-3	490 (± 13)	246 (± 1)	%49,6 (± 2)
Kaplama	CFPA-3	298 (± 8)	149 (± 0,2)	%49,8 (± 2)

Ekstrüzyon ve film kaplama sistemleri için fizikokimyasal test sonuçları Şekil 4.1.'de görülmektedir. Fizikokimyasal test sonuçlarına göre hat akışı boyunca en homojen kaplama gerçekleştirilebilen yöntem film kaplama yöntemidir. Film kaplama ile üretimlerde, yöntemin doğası gereği sabit oranda matris malzemesi verilebildiği için hat akışı boyunca prepreg homojenizasyonu sağlanmıştır. Matris malzemesini film şeklinde beslemek, proses sırasında oluşabilecek olumsuz etkileri ortadan kaldırarak sabit gramajda elyaf demetlerini kaplamaya imkân tanımıştır. Böylece üretimden önce elyaf-matris oranına göre film özellikleri belirlenerek homojen bir prepreg üretimi gerçekleştirilebilmiştir.

Film kaplama yöntemi ve ekstrüzyon kaplama sistemi arasında homojenizasyon açısından az bir fark olduğu görülmektedir. Film kaplama sisteminde, kaplama homojenizasyonun bir miktar daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir.

Takviye malzemesine göre bu iki kaplama sistemi karşılaştırıldığında ise belirgin bir fark görülmemektedir. Cam elyaf ve karbon elyaf için her iki kaplama yönteminin de uygun olduğu söylenebilir.

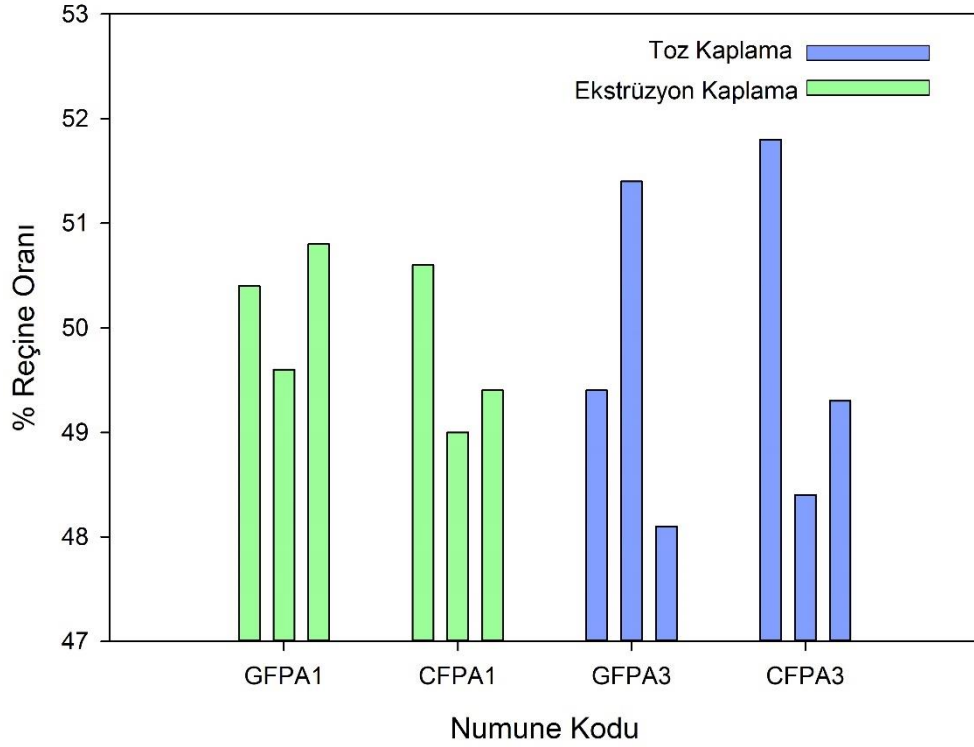


Şekil 4.1. Ekstrüzyon ve film kaplama üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları

Ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama sistemleri için fizikokimyasal test sonuçları Şekil 4.2.'de yer almaktadır. Şekil 4.2. üzerinden test sonuçlarına bakıldığında film kaplama yönteminden sonra en iyi kaplama homojenizasyonunu sağlayan yöntemin ekstrüzyon kaplama yöntemi olduğu görülmektedir. Ekstrüzyon kaplama yönteminde levha kafa sıcaklıkları, polimer akış hızı, hammadde besleme gibi parametrelerin kontrolü oldukça önemlidir. Bu parametrelerin kontrolü sağlandığı sürece hat akışı sırasında matris miktarı elyaf demetleri üzerine homojen şekilde beslenebilmektedir. Matris malzemesinin homojen bir şekilde beslenmesi ise hat akışı boyunca homojen bir kaplama oluşacağını göstermektedir. Takviye malzemesinin homojen kaplanabilmesi için hat hızı ve levha kafası besleme hızlarının birbirine uyumlu olması gerekir. Aynı zamanda kullanılacak matris malzemesine göre kaplama sisteminin sıcaklıkları optimum şekilde ayarlanmalıdır.

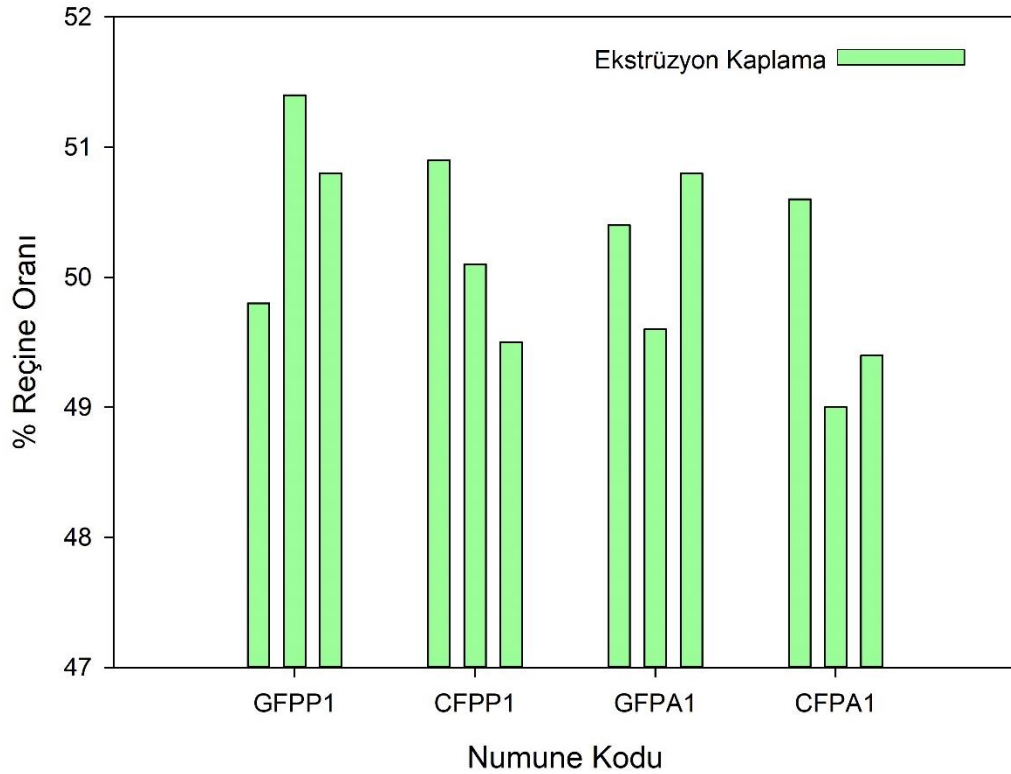
Toz kaplama sisteminin, hat akışı sırasında kaplama homojenizasyonunda en fazla dalgalanmaya sebep olan yöntem olduğu görülmektedir. Toz kaplama sisteminde bulunan nozül sistemleri ile takviye malzemesi üzerine tozun beslenmesi kaplama kalitesini etkileyebilecek birçok parametreyi ortaya çıkarmaktadır. Örneğin hat akışı

sırasında nozül sistemlerinin toz besleme basınçlarında yaşanacak ufak bir dalgalanma kaplama homojenizasyonunu olumsuz etkilemektedir. Toz kaplama sisteminde, takviye malzemesi karşılaştırıldığında cam elyaf ya da karbon elyaf olmasının büyük bir değişim yaratmadığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama sistemi için üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları

Ekstrüzyon kaplama sisteminde üretilen poliamid-12 ve polipropilen matrisli kompozit malzemelerin fizikokimyasal test sonuçları Şekil 4.3.'te görülmektedir. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle gerçekleştirilen üretimlerde matris malzemesine göre kaplama homojenizasyonunda çok büyük bir fark olmamıştır. Ekstrüzyon kaplama sistemlerinde daha öncede belirtildiği gibi homojen bir kaplama için polimer akış hızı, hammadde besleme, proses sıcaklığı gibi parametrelerinin kontrolü çok önemlidir. Düzenli ve rijit bir sistem ile homojen bir kaplama elde edilebilmektedir.



Şekil 4.3. Ekstrüzyon üç tekrarlı fizikokimyasal test sonuçları

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle gerçekleştirilen üretimlerde cam elyaf ya da karbon elyaf gibi takviye malzemesi türünüm çok önemli olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak beslenen takviye malzemesinin genişliği kaplama kalitesini etkilemektedir. Levha kafadan çıkan eriyik polimerin genişliğinin, kaplanacak olan takviye malzemesi ile örtüşmesi, kaplama kalitesini etkilemektedir.

4.2. Morfolojik Testler

Ekstrüzyon kaplama, toz kaplama ve film kaplama ile üretilen prepreglerde matris malzemesinin impregnasyonu SEM ile incelenmiştir.

4.2.1. Ekstrüzyon kaplama ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepregler

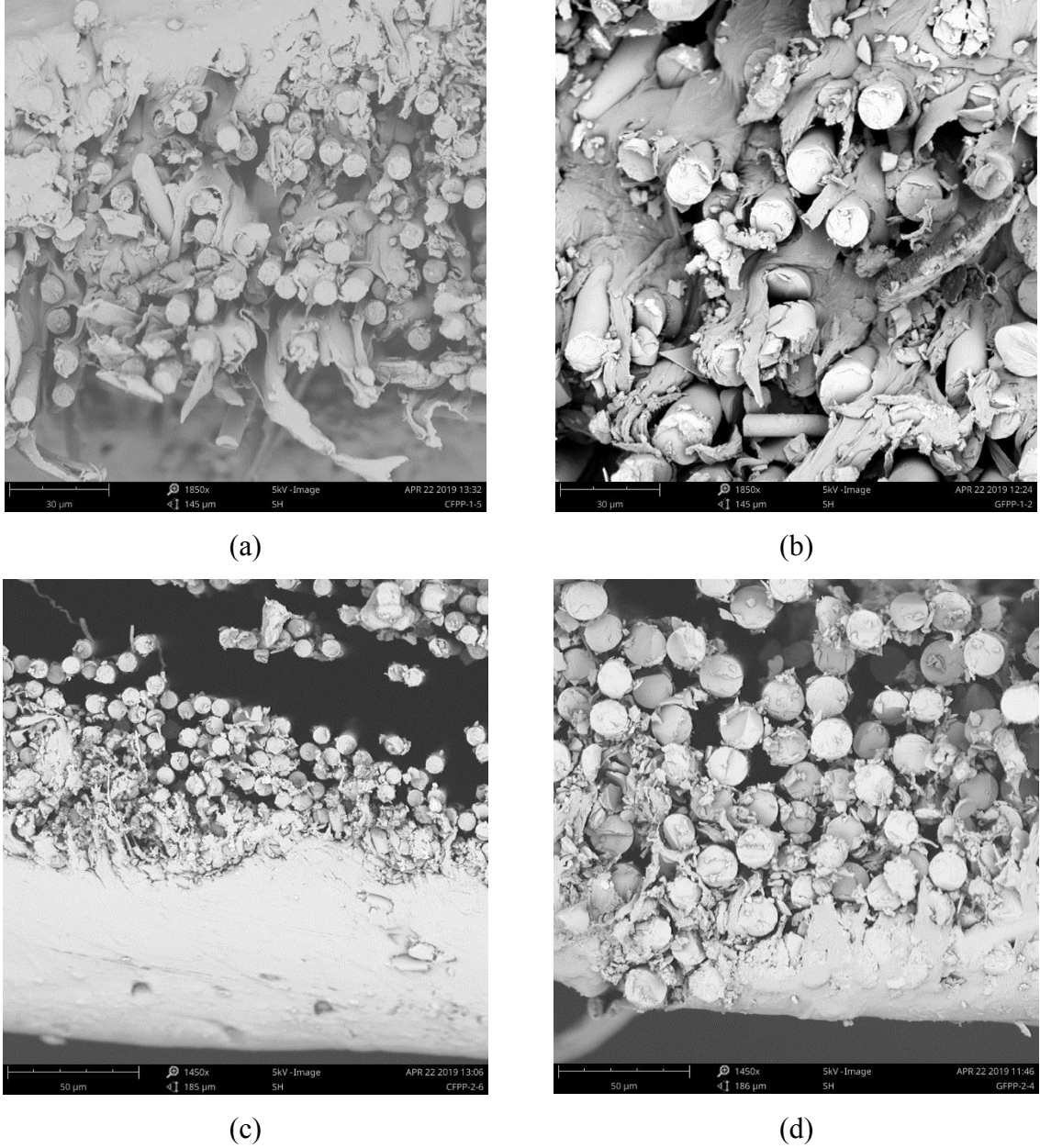
Ekstrüzyon kaplama ve film kaplama sistemi ile üretimi gerçekleştirilen CFPP-1, GFPP-1, CFPP-2 ve GFPP-2 numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4.4.'te verilmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile gerçekleştirilen prepreg üretimlerinde

impregnasyonun sağlandığı ve matris malzemesinin elyaf demetlerini sardığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.4.a ve b). Aynı zamanda sürekli elyafların matris içerisinde düzgün bir şekilde yerleştiği ve ıslanmayan elyaf demetlerinin olmadığı tespit edilmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile polipropilen matriste istenilen seviyede impregnasyon sağlanabilmektedir.

Yine Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi film kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin alt ve üst yüzeyine belirli oranda emdirme işlemi gerçekleştirilebilmiş, ancak prepreg orta bölgelerine matris malzemesinin emdirilemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle polipropilen film kaplama ile gerçekleştirilecek üretim denemelerinde basınçla emdirme sistemi üzerinde daha detaylı bir çalışma yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ekstrüzyon kaplama yönteminin film kaplama yöntemine göre daha başarılı bir impregnasyon sağladığı görülmektedir. Bu nedenle polipropilen matris malzemesiyle yapılan üretimlerde ekstrüzyon kaplama sistemin impregnasyona etkisinin daha olumlu olduğu söylenebilir.

Polipropilen matrisle gerçekleştirilen denemeler sırasında cam elyaf takviyeli malzemelerin impregnasyonunun karbon elyaf takviyesine göre daha zor olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin, cam ve karbon elyafların yapısal özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Cam elyaflar, karbon elyaflara göre daha büyük çaptadır ve daha kolay hasarlanabilmektedir. Bu nedenle emdirme prosesini zorlaştırmaktadırlar.



Şekil 4.4. 1850X büyütme ile çekilmiş SEM görüntüsü; Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş, a-) CFPP-1, b-) GFPP-1, ve film kaplama yöntemiyle üretilmiş c-) CFPP-2 ve d-) GFPP-2

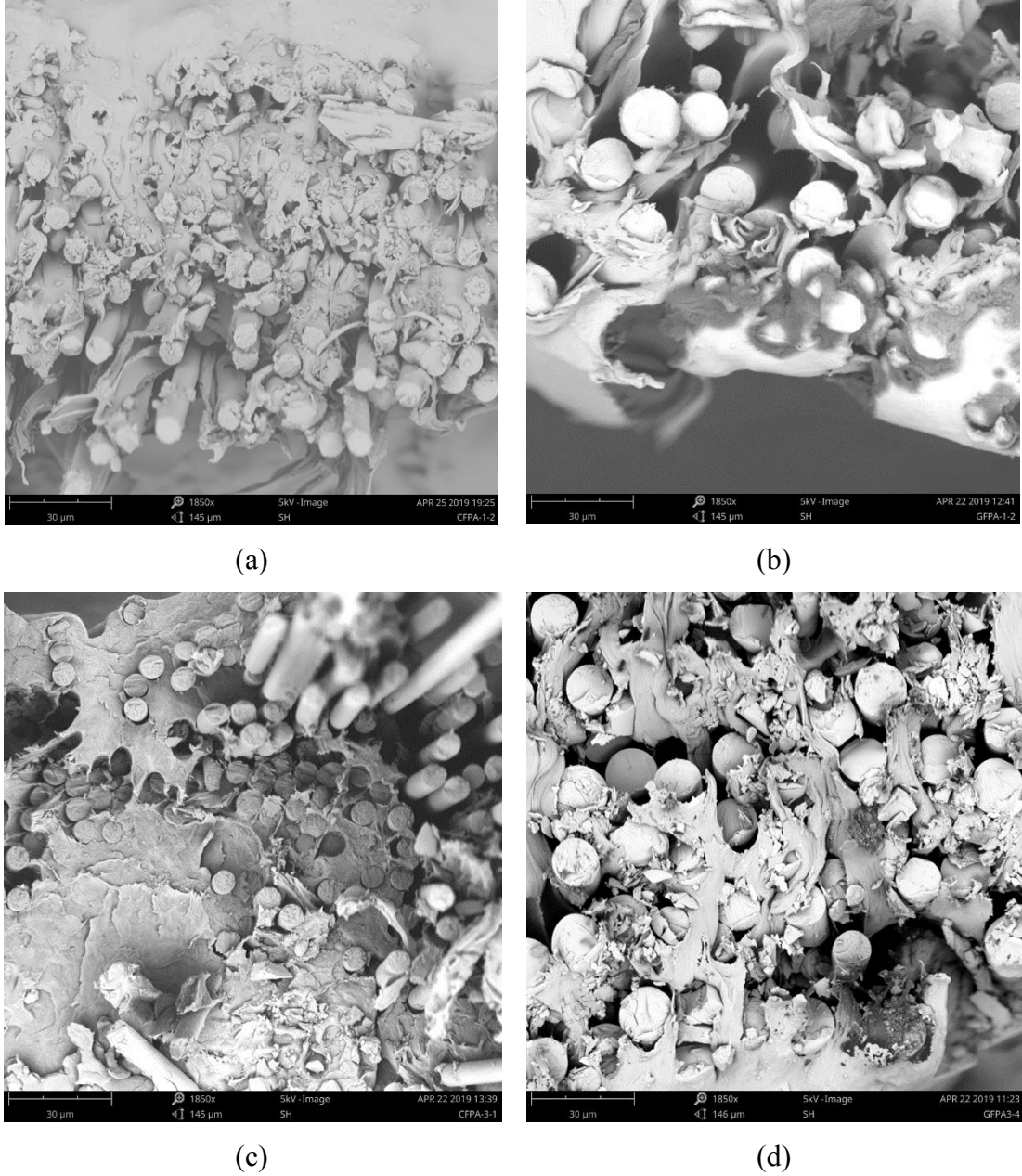
4.2.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepregrler

Ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama yöntemi ile üretilen CFPA-1, GFPA-1, CFPA-3 ve GFPA-3 prepregrlerinin SEM görüntüleri Şekil 4.5.'te yer almaktadır. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle gerçekleştirilen poliamid-12 üretimlerinde karbon elyaf takviyeleri için impregnasyon tamamen sağlanırken, cam elyaf takviyesiyle gerçekleştirilen deneme üretimlerinde impregnasyon kısmen oluşmuştur. Ekstrüzyon

kaplama yönteminde impregnasyon derecelerinin farklılık göstermesine karşın sürekli elyafların matris içerisinde düzgün bir şekilde yerleştiği görülmektedir.

Toz kaplama yöntemiyle gerçekleştirilen üretim denemelerinde ise matris malzemesinin elyaf demetleri içerisine rahatlıkla işlediği görülmektedir (Şekil 4.5.c ve d). Toz kaplama sisteminde matris malzemesinin elyaf demetleri üzerine sprej nozül sistemleriyle toz formunda verilmesi impregnasyonun kaplama sistemi içerisinde başlamasını sağlamaktadır. Toz kaplama sistemi içerisinde gerçekleşen toz formunda oluşan proses ön impregnasyon olarak adlandırılmaktadır. Toz kaplama yönteminin avantajlarından biri olan ön impregnasyon sayesinde emdirme prosesi kolay ve etkili bir şekilde oluşmaktadır. Matris malzemesinin her iki takviye malzemesi içinde elyaf demetlerini sardığı ve impregnasyonun sağlandığı görülmektedir. Ancak toz kaplama sisteminin dezavantajlarından biri kaplamanın toz formunda gerçekleştirilmesidir. Sprej şeklinde bir kaplama ile elyaf demetleri üzerine matris malzemesinin aktarılması kısmen elyaf demetlerinin hasarlanmasına sebep olabilmektedir.

İmprenasyon miktarları toz kaplama ve ekstrüzyon kaplama yöntemi olarak karşılaştırıldığında toz kaplama yönteminin ön impregnasyon özelliği nedeniyle avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi kaplamanın toz formunda gerçekleştirilmesi elyaf demetleri üzerinde hasarlanmalara sebep olabilmektedir.



Şekil 4.5. 1850X büyütme ile çekilmiş SEM görüntüsü; Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş a-) CFPA-1, b-) GFPA-1, ve toz kaplama yöntemiyle üretilmiş c-) CFPA-3 ve d-) GFPA-3

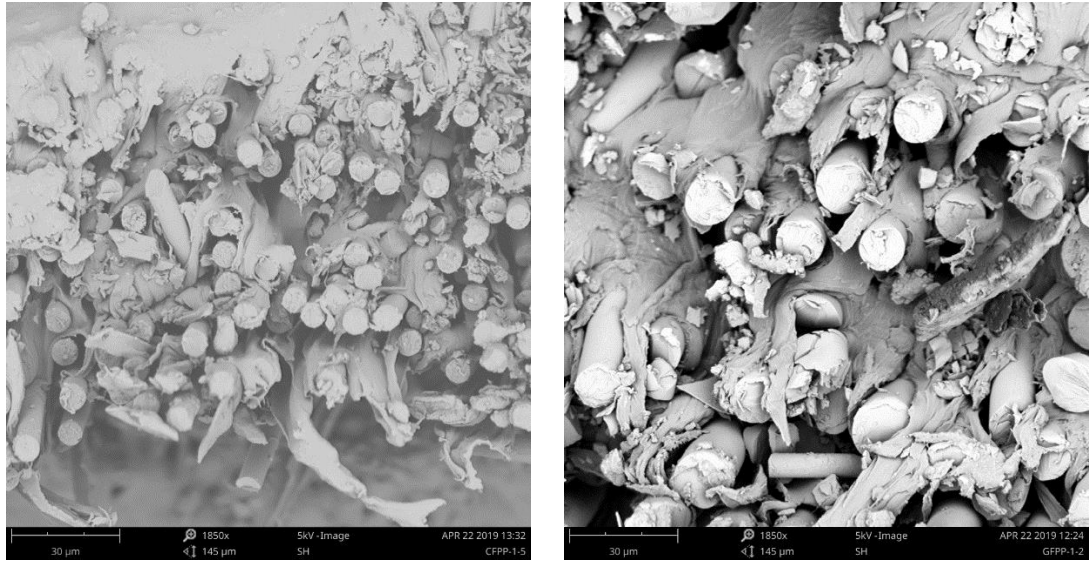
Üç farklı kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin SEM mikrografları yukarıda verilmiştir. SEM mikrograflarına bakıldığında ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemlerinde impregnasyon derecesinin yüksek olduğu görülmektedir. Toz kaplama sisteminde kuru halde elyaf demetleri içerisinde ön impregnasyon sağlanmaktadır. Bu da toz kaplama sistemi kullanıldığında emdirme sisteminin işini kolaylaştırmaktadır. Ekstrüzyon kaplama sisteminde ise malzemenin elyaf demetleri üzerine eriyik olarak verilmesi ve kısmen tek yüzeyde ön impregnasyon oluşması

proses koşullarını kolaylaştırmaktadır. Ancak film kaplamada ön bir impregnasyon süreci yoktur. Bu nedenle film şeklindeki matris malzemesi elyaf demetleri üzerine beslenmekte ve tüm impregnasyon sürecinin basınçlı emdirme sisteminde gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu durum termoplastik matrislerin proses zorluklarından biri olan kolay impregne edilememe durumunu ortaya çıkarmaktadır.

4.2.3. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepregler

Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretimleri gerçekleştirilmiş CFPP-1, GFPP-1, CFPA-1 ve GFPA-1 prepreglerinin SEM görüntüleri yer almaktadır.

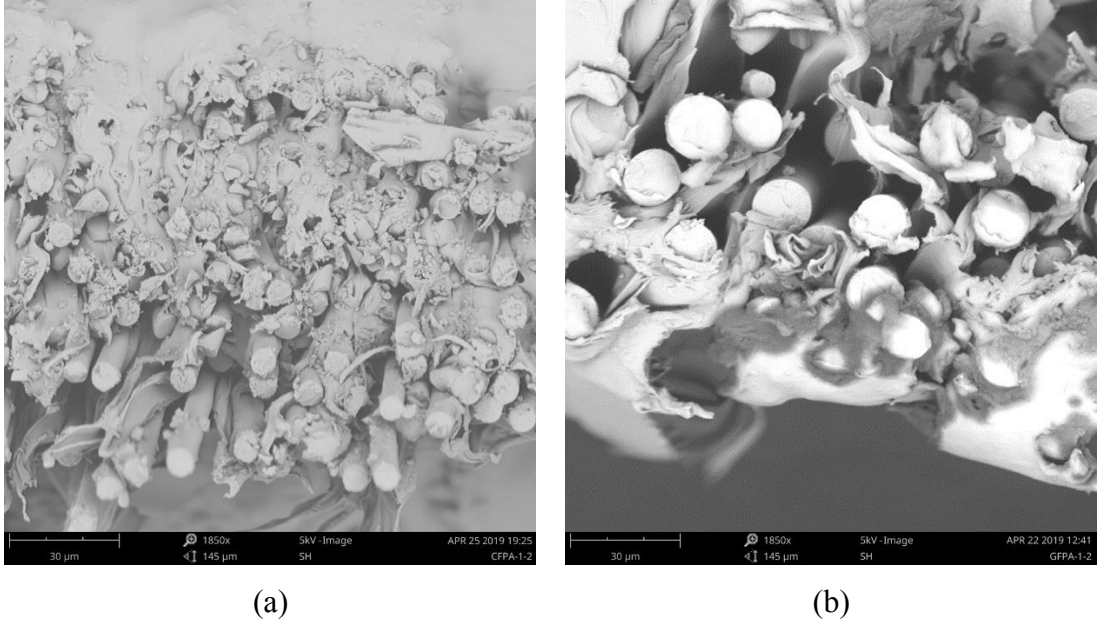
Ekstrüzyon kaplama ile gerçekleştirilen üretim denemelerinde takviye malzemesi kaynaklı bir sınırlamanın olmadığı görülmüştür. Polipropilen ve poliamid-12 hammaddesi ile gerçekleştirilen üretimlerde impregnasyonun sağlanabilmiştir. Ancak cam elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerde impregnasyon kısmen gerçekleşmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4.6. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş; a-) CFPP-1 ve b-) GFPP-1 numunelerinin 1850x büyütme ile çekilmiş SEM görüntüleri



Şekil 4.7. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş a-) CFPA-1 ve b-) GFPA-1 numunelerinin 1850x büyütme ile çekilmiş SEM görüntüleri

4.3. Mekanik Testler

Çalışma kapsamında üretilen her prepreg için çekme, darbe ve eğme testi uygulanmış ve test sonuçları matris malzemesi ve kaplama yöntemine göre sınıflandırılarak verilmiştir. Testler, yöntem, takviye ve matris malzemesine bağlı olarak üretilen her bir laminenin 6 farklı bölgesinden alınarak numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçların aritmetik ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

4.3.1. Çekme testi

Ekstrüzyon kaplama, toz kaplama ve film kaplama ile üretimleri gerçekleştirilmiş prepreglerin çekme mukavemetleri matris malzemesi ve takviye malzemesine göre incelenmiş ve üretilen prepreglerin çekme testi sonuçları Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Çekme testi sonuçları

Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)
Film Kaplama	GFPP-2	371 (\pm 34)	20,2 (\pm 1,4)	1,96 (\pm 0,15)

Tablo 4.3. (Devam)

Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)
Film Kaplama	CFPP-2	944 (\pm 69)	63,5 (\pm 5,6)	1,48 (\pm 0,06)
	GFPP-1	233 (\pm 15)	20,1 (\pm 1,0)	1,37 (\pm 0,12)
Ekstrüzyon Kaplama	CFPP-1	1050 (\pm 65)	74,2 (\pm 5,5)	1,44 (\pm 0,10)
	GFPA-1	450 (\pm 37)	29,7 (\pm 3,0)	1,68 (\pm 0,08)
	CFPA-1	1305 (\pm 70)	66,0 (\pm 3,6)	1,81 (\pm 0,04)
Toz Kaplama	GFPA-3	349 (\pm 23)	21,3 (\pm 0,5)	1,62 (\pm 0,12)
	CFPA-3	1225 (\pm 127)	72,7 (\pm 6,4)	1,64 (\pm 0,06)

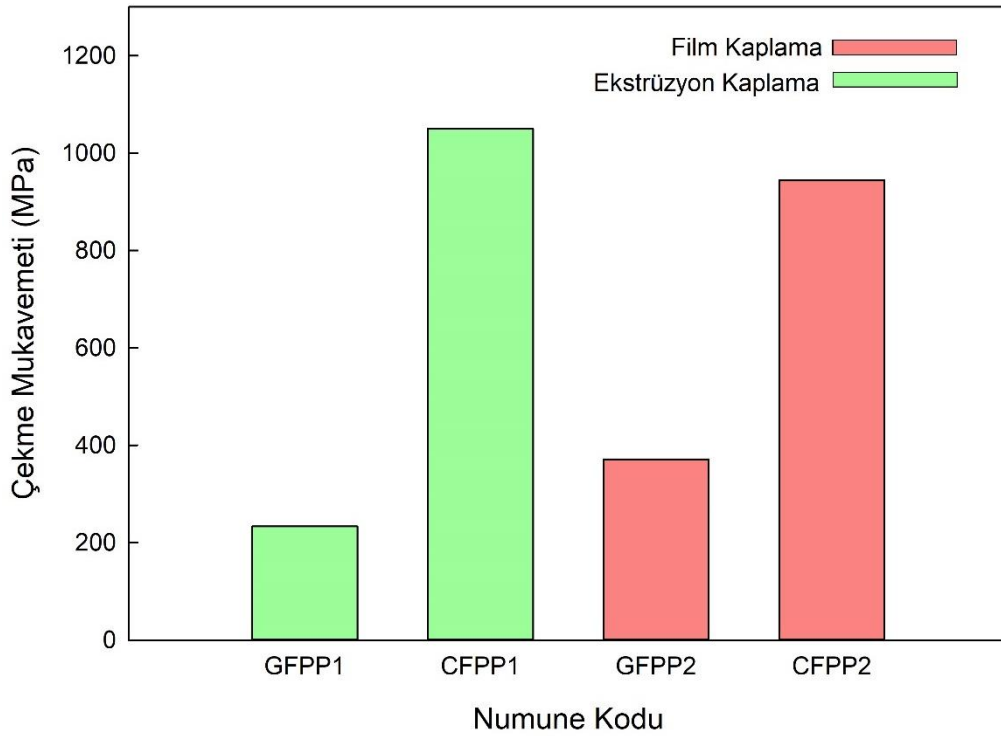
4.3.1.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin çekme testi sonuçları

Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemleriyle üretilen polipropilen matrisli prepreglerin çekme mukavemeti, elastik modülü ve% uzama miktarlarını gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da görülmektedir.

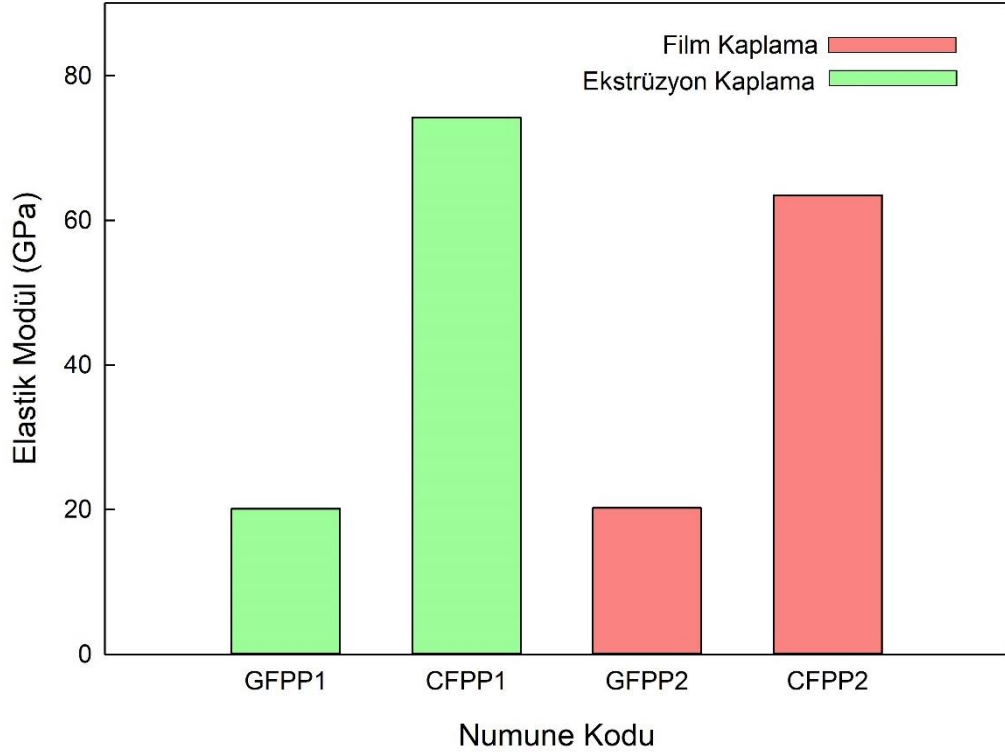
Cam elyaf takviyeli polipropilen prepreglerin test sonuçlarına göre film kaplamanın elyaf yönündeki dayanımının ekstrüzyon kaplama yöntemine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Her iki kaplama yöntemiyle üretilen prepreg numunelerinde elastik modül değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak film kaplama yöntemiyle üretilen numunelerde uzama değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Uzama değerlerinin yüksek olması film kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin daha sünek bir yapıda olduğunu göstermektedir. Bu da elyaf ara yüzeyi ile matris malzemesinin proses sırasında daha iyi uyum sağladığını ve matrisin elyaflar arasındaki gerilme mukavemetini daha iyi dağıttığını göstermektedir.

Karbon elyaf takviyeli polipropilen prepreglerin test sonuçlarına göre ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin elyaf yönündeki mukavemetinin film kaplama yöntemine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüzyon kaplama sistemiyle matris malzemesi karbon elyaf demetleri içerisinde homojen bir dağılım sağlamaktadır. Elyaf yönündeki mukavemet değerlerinin birbiri arasındaki tutarlılığı kaplama sisteminin ve elyaf yönlendirmelerinin homojen olduğunu göstermektedir. Diğer yandan ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreg malzemelerin elastik

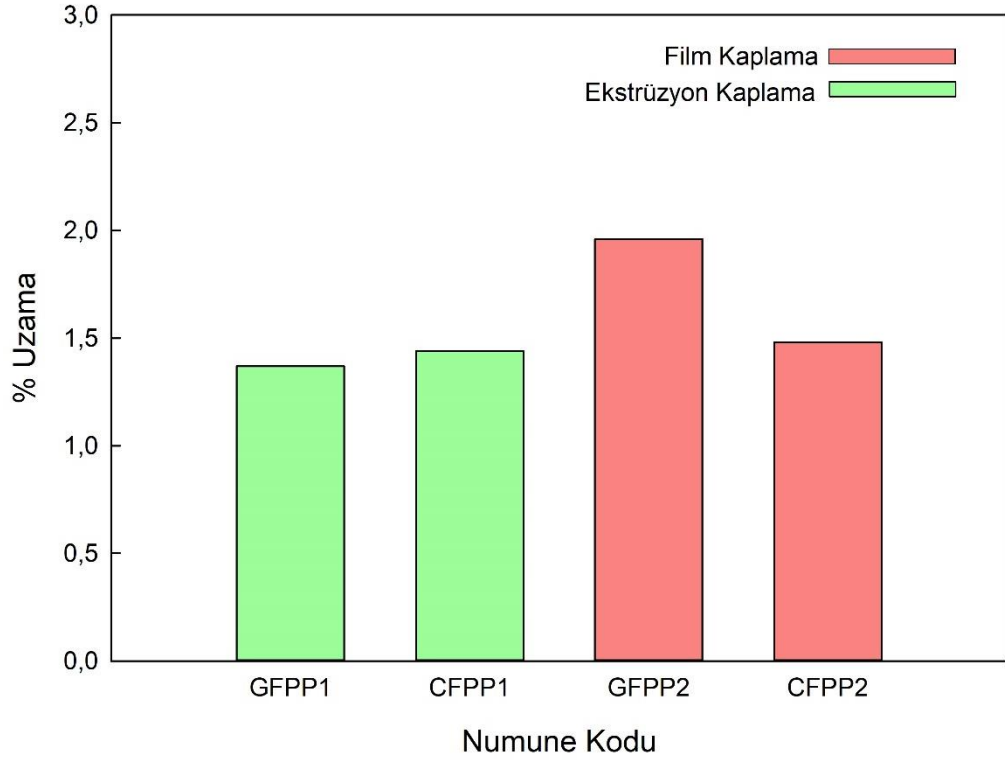
modüllerinin film kaplamaya göre oldukça yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bu nedenle ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilmiş kompozitlerin daha sert bir yapıda olduğunu söyleyebiliriz. Uzama değerlerinde ise genel olarak değerlerin birbirine yakın olduğu, ancak film kaplama yöntemi ile üretilen numunelerin bir miktar daha fazla uzadığı görülmektedir. Bunun nedenin matris malzemesinin formundan kaynaklı olabileceği ve elyaf demetleri ile arayüzey tutunmalarının bir miktar daha düşük olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.8. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen preprepreglerin çekme mukavemetini gösteren grafik



Şekil 4.9. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepeglerin elastik modülünü gösteren grafik



Şekil 4.10. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepeglerin % uzama miktarı grafiği

Diğer taraftan film kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin cam elyaf ve karbon elyaf takviyeleri yönünden çekme mukavemetleri karşılaştırıldığında karbon takviyeli polipropilen prepreglerin çekme dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde her iki takviye malzemesi için elastik modülü en yüksek olan karbon elyaf takviyelerdir. Karbon elyaf takviyelerin üstün özelliklerinden biri olan elyaf yönündeki dayanımlarının ve elastik modüllerinin diğer elyaf türlerine göre yüksek olması film kaplama ile üretim yönteminde direkt olarak görülmektedir.

4.3.1.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin çekme testi sonuçları

Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemleriyle üretilen poliamid-12 matrisli prepreglerin çekme mukavemeti, elastik modülü ve % uzama miktarını gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te verilmiştir.

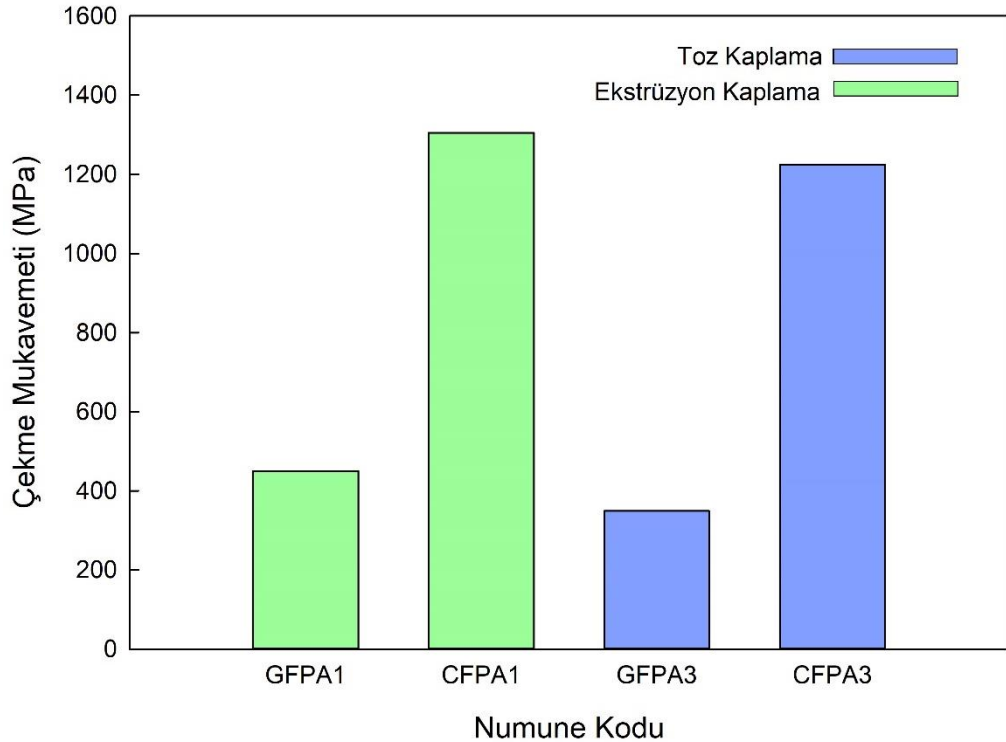
Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile cam elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre ekstrüzyon kaplama sistemi ile üretilen prepreglerin elyaf yönündeki çekme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerde matris malzemesi ile elyaf demetleri arasındaki yük dağılımının daha iyi olduğu görülmektedir. Toz kaplama yönteminin mukavemet değerlerinin, ekstrüzyon kaplama yöntemine göre daha düşük çıkmasının başka bir nedeni ise spreylendirme sistemidir. Toz kaplama sistemlerinde kaplama spreylendirme şeklinde oluşturulduğu için elyaf demetlerine zarar vererek mukavemeti düşürebileceği gözlemlenmiştir.

Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen cam elyaf takviyeli prepreglerde elastik modül değeri toz kaplamaya göre daha yüksektir. Bu da ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin daha sert yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda her iki yöntemle üretilmiş numunelerin uzama değerlerinin de birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

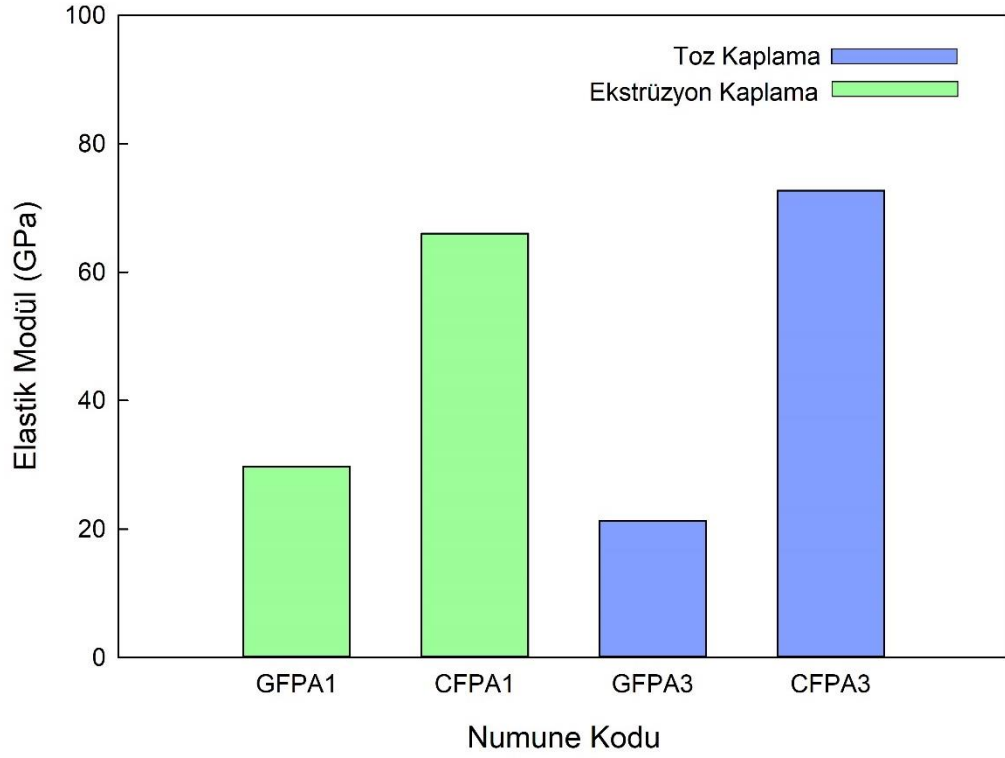
Karbon elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerde ise test sonuçlarına göre ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilen prepreglerin elyaf yönünde uygulanan çekme

mukavemetlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretim sırasında daha homojen bir kaplama elde edildiği görülmektedir. Toz kaplama yönteminde ise homojenizasyon eksikliği ya da spreyci kaplamadan kaynaklanan elyaf hasarlanması olabileceği düşünülmektedir. Çekme dayanımı sonuçlarının göreceli olarak düşük olmasına karşın değerler arasında sapma miktarlarının fazla olduğu dikkat çekmektedir (Tablo 4.3.). Bu da toz kaplama sisteminde elyaf demetlerinin kompozit yapı içerisinde homojen dağılmadığının ya da matris malzemesinin homojen kaplanmadığının bir göstergesidir.

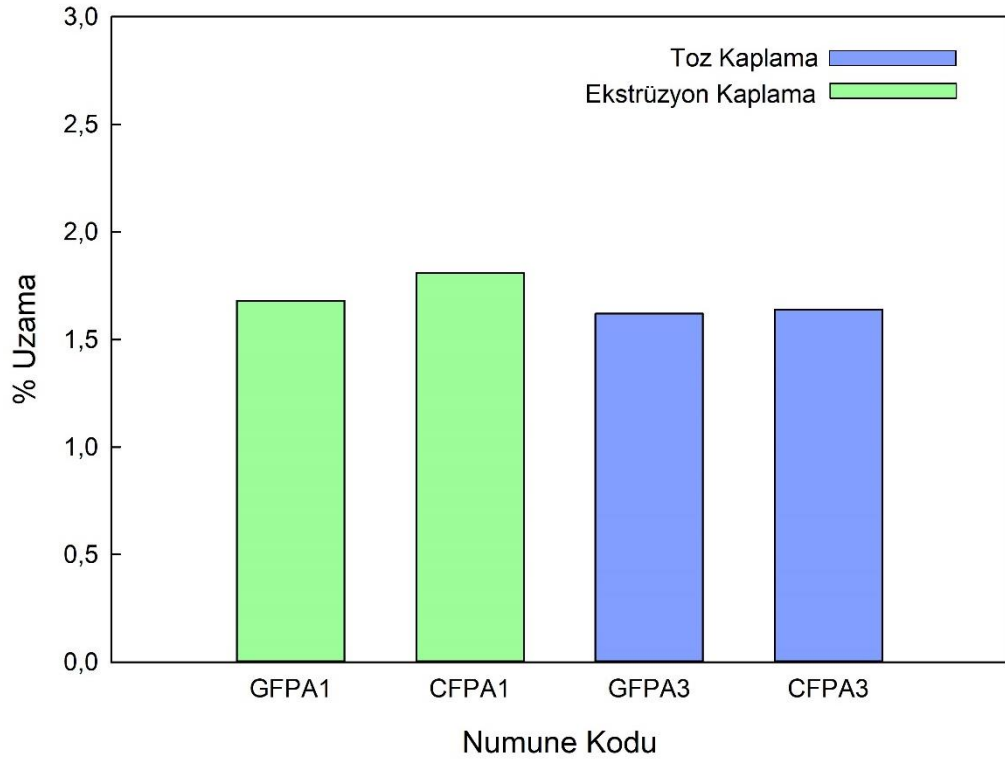
Karbon elyaf takviyeli poliamid-12 prepreğlerin elastik modüllerinin birbirine yakın olmasına karşın toz kaplama ile üretilen prepreğlerin elastik modüllerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da toz kaplama sistemiyle üretilen karbon elyaf takviyeli poliamid-12 prepreğlerin daha sert ve esnekliği az malzemeler olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreğlerin çekme mukavemeti grafiği



Şekil 4.12. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreğerlerin elastik modülü grafiği



Şekil 4.13. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreğerlerin % uzama grafiği

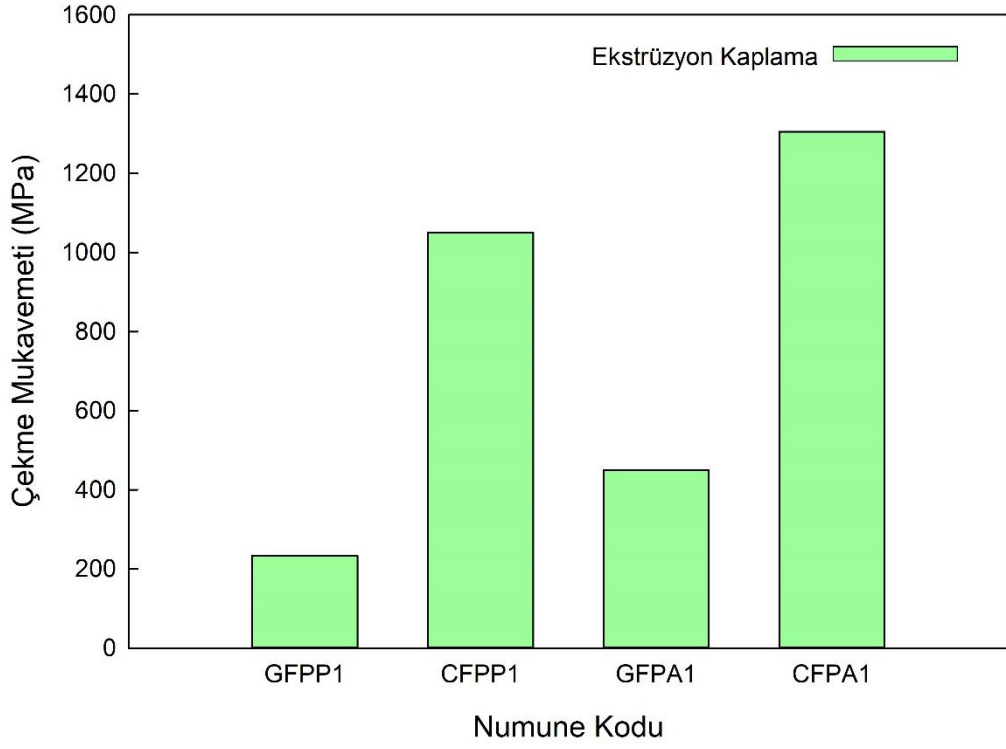
Toz kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin cam elyaf ve karbon elyaf takviyeleri yönünden çekme mukavemetleri karşılaştırıldığında karbon takviyeli poliamid-12 prepreglerin çekme dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde her iki takviye malzemesi için elastik modülü en yüksek olan karbon elyaf takviyeli prepreglerdir. Karbon elyaf takviyelerin üstün özelliklerinden biri olan elyaf yönündeki dayanımlarının ve elastik modüllerinin diğer elyaf türlerine göre yüksek olması toz kaplama ile üretim yönteminde direkt olarak görülebilmektedir.

4.3.1.3. Ekstrüzyon kaplama numunelerinin çekme testi sonuçları

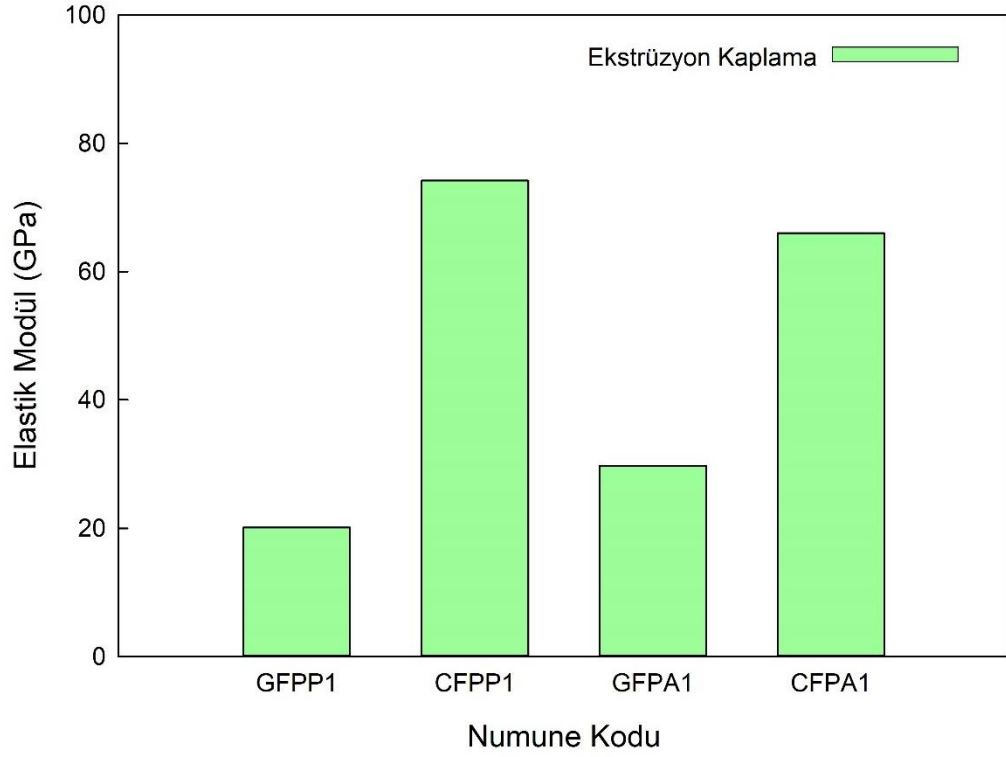
Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen polipropilen ve poliamid matrisli prepreglerin çekme mukavemeti, elastik modülü ve % uzama miktarı grafikleri sırasıyla Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da verilmektedir.

Ekstrüzyon kaplama yönteminde polipropilen ve poliamid olmak üzere iki farklı matris türü kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre poliamid matrisli prepreglerin her iki takviye elemanı için de çekme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Çekme mukavemetindeki bu fark matris malzemesinin mukavemet değeri ve elyaflar arası kuvveti homojen dağıtabilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle poliamid-12 matris malzemesinin çekme mukavemetinin daha iyi olduğu ve elyaflar arası kuvvet iletimini daha iyi sağladığı tespit edilmiştir. Ancak elastik modülleri karşılaştırıldığında karbon elyaf takviyeli polipropilen prepreglerin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Ardından tekrar poliamid-12 matrisli prepregler yüksek elastik modül değerleri göstermektedir.

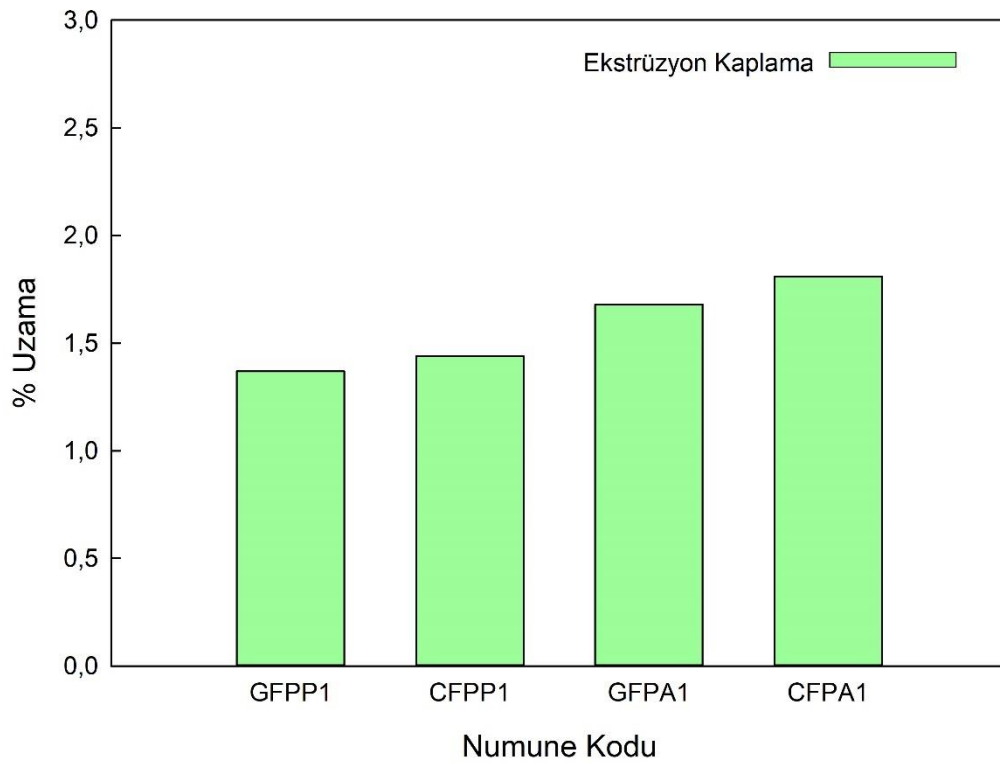
Polipropilen ve poliamid-12 matrisli prepreglerin uzama değerleri karşılaştırıldığında ise poliamid -12 matrisli prepreglerin göreceli olarak daha fazla uzadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin çekme mukavemeti grafiği



Şekil 4.15. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin elastik modül grafiği



Şekil 4.16. Ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin % uzama grafiği

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin cam elyaf ve karbon elyaf takviyeleri karşılaştırıldığında diğer üretim yöntemlerinde olduğu gibi karbon elyaf takviyeli prepreglerin mukavemet ve elastik modül değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

4.3.2. Darbe testi

Ekstrüzyon kaplama, toz kaplama ve film kaplama yöntemleriyle üretilen prepreglerin darbe mukavemetleri, matris malzemesi ve takviye malzemesine göre incelenmiştir. Her üç kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin darbe testi sonuçları Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Darbe testi sonuçları

Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)	Enerji (g/m ²)
Film Kaplama	GFPP-2	140,80 (± 10,14)	4,191 (± 0,289)

Tablo 4.4. (Devam)

Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Darbe Mukavemeti (kJ/m²)	Enerji (g/m²)
Film Kaplama	CFPP-2	101,11 (± 7,62)	3,223 (± 0,235)
	GFPP-1	156,94 (± 19,84)	4,925 (± 0,650)
Ekstrüzyon Kaplama	CFPP-1	163,42 (± 12,06)	4,971 (± 0,368)
	GFPA-1	214,72 (± 14,79)	6,008 (± 0,301)
Toz Kaplama	CFPA-1	177,25 (± 7,09)	5,371 (± 0,216)
	GFPA-3	159,29 (± 8,42)	4,944 (± 0,312)
	CFPA-3	132,22 (± 9,82)	4,006 (± 0,311)

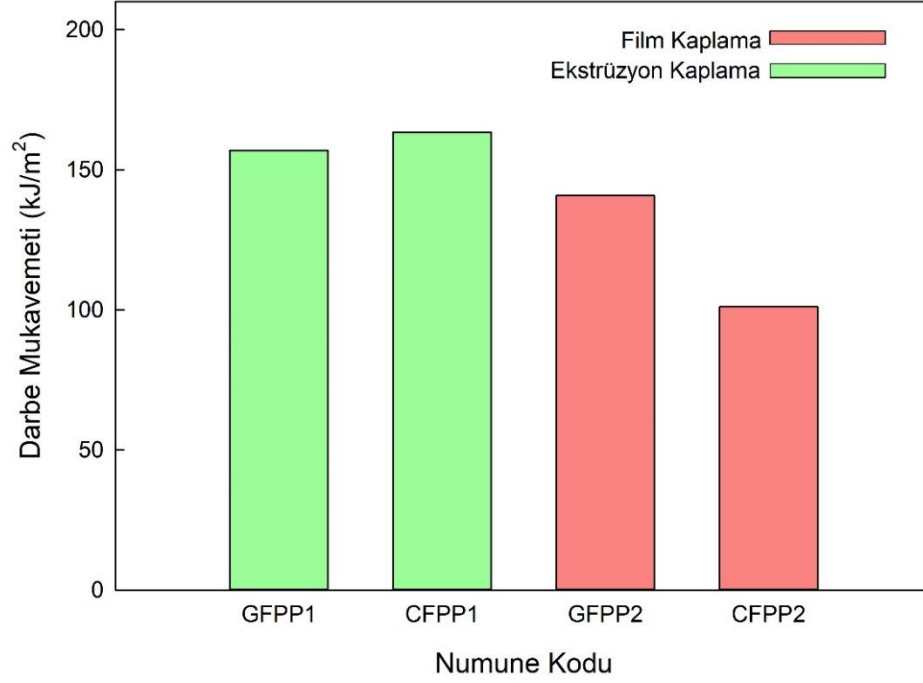
4.3.2.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları

Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemiyle üretilmiş polipropilen matrisli prepreglerin darbe mukavemeti Şekil 4.17. ve darbe enerjisi Şekil 4.18.'de görülmektedir.

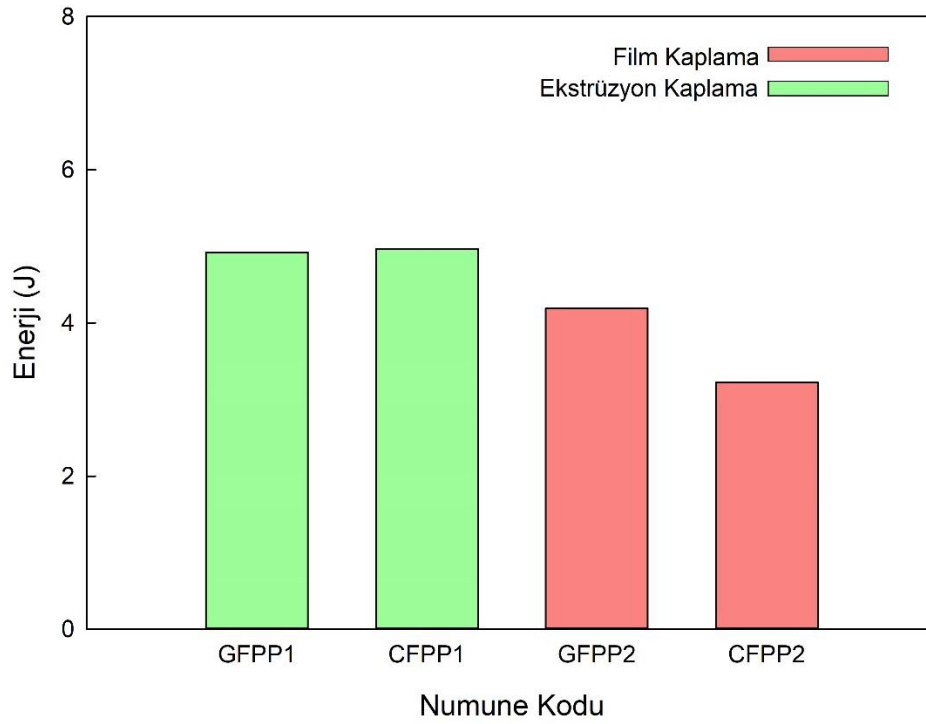
Ekstrüzyon ve film kaplama ile üretilen cam elyaf takviyeli prepreglerin test sonuçlarına göre ekstrüzyon kaplama sistemi ile gerçekleştirilen üretimlerin darbe mukavemetinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle polimerin eriyik formda verilmesi elyaf demetleri üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Diğer yandan ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilmiş cam elyaf takviyeli prepreglerin darbe enerjisinin de daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu da ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen numunelerin tokluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Cam elyaf takviyeli polipropilen prepreglerde görüldüğü gibi ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen karbon elyaf takviyeli polipropilen prepreglerde de darbe mukavemeti daha yüksektir. Ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilmiş numunelerin darbe mukavemetinin daha yüksek çıkması matris malzemesinin homojen bir şekilde kaplandığını ve elyaf-matris uyumunun gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca matris malzemesinin eriyik olarak hatta beslenmesi elyaf yönlenmesi, elyaf dağılımının homojenitesi gibi birçok özelliği olumlu etkilemiştir. Ekstrüzyon kaplama sistemi ile üretilmiş karbon elyaf takviyeli prepreglerin darbe enerjilerinin film kaplamaya göre

oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu da ekstrüzyon kaplama ile üretilmiş numunelerin tokluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe mukavemeti grafiği



Şekil 4.18. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe enerjisi grafiği

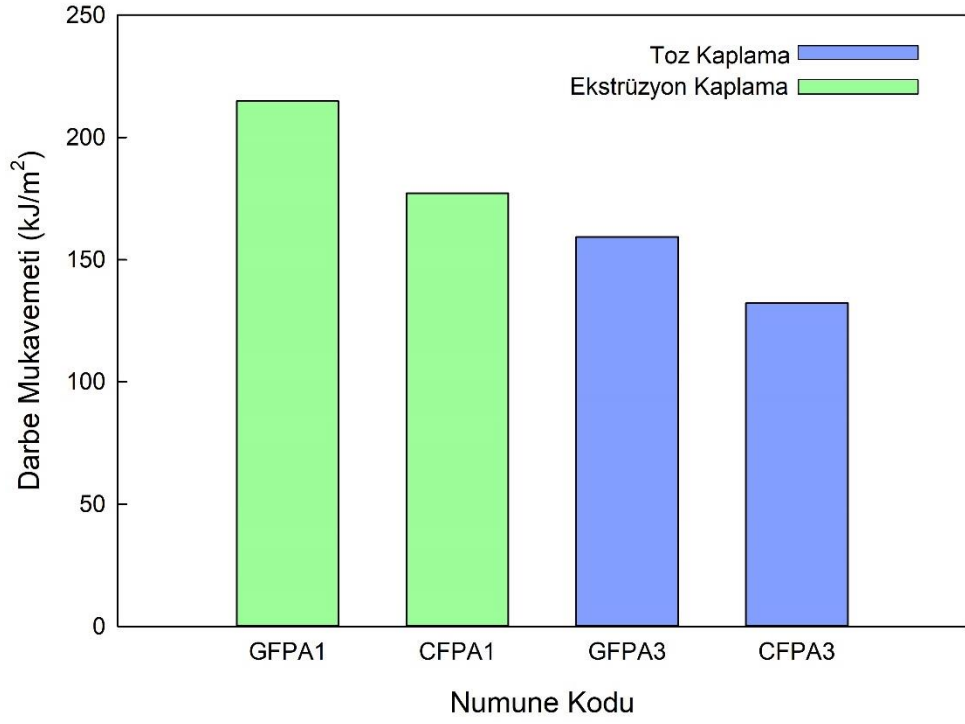
Film kaplama yöntemiyle üretilen cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli prepregler karşılaştırıldığında ise cam elyaf takviyeli prepreglerin darbe mukavemetinin ve darbe enerjisi daha yüksek olduğu söylenebilir.

4.3.2.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları

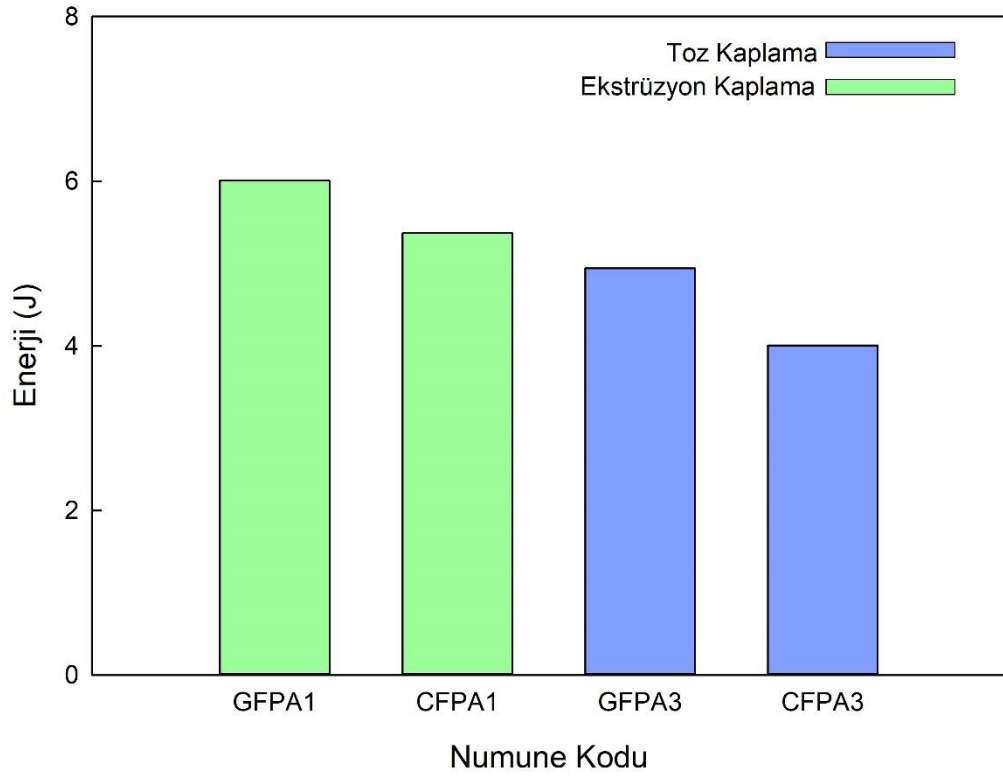
Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemiyle üretilmiş poliamid-12 matrisli prepreglerin darbe mukavemeti Şekil 4.19. ve darbe enerjisi Şekil 4.20.'de yer almaktadır.

Ekstrüzyon ve toz kaplama ile üretilen cam elyaf takviyeli prepreglerin darbe testi sonuçlarına göre ekstrüzyon kaplama ile üretilen prepreglerin darbe mukavemetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Polipropilen takviyelerde olduğu gibi poliamid takviyelerde de ekstrüzyon kaplama yöntemiyle gerçekleştirilen üretimlerde daha homojen bir matris yapısı oluşmaktadır. Ayrıca darbe enerjilerinin toz kaplama yöntemine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen malzemelerde tokluk özelliğinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Karbon elyaf takviyeli ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama ile üretilen prepreglerin darbe mukavemetleri, cam elyaf takviyeli prepreglerde olduğu gibi, ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerde daha yüksektir. Ayrıca darbe enerjisinin de ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilen numunede daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreğerlerin darbe mukavemeti grafiği



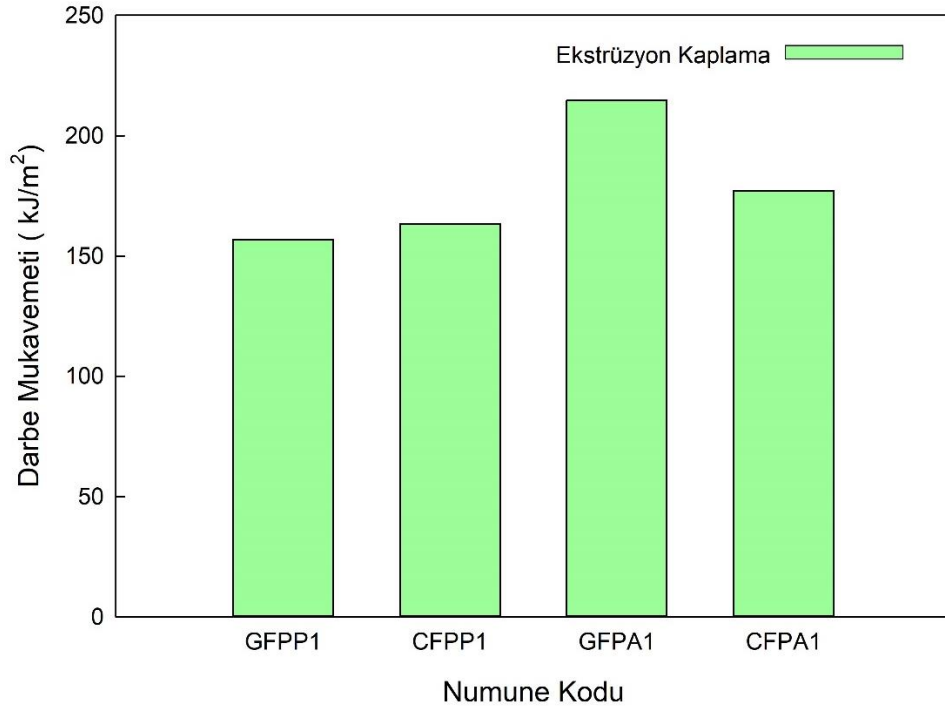
Şekil 4.20. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreğerlerin darbe enerjisi grafiği

Toz kaplama yöntemiyle üretilen cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli prepregler karşılaştırıldığında ise cam elyaf takviyeli prepreglerin darbe mukavemetinin ve enerji miktarının daha yüksek olduğu görülmektedir.

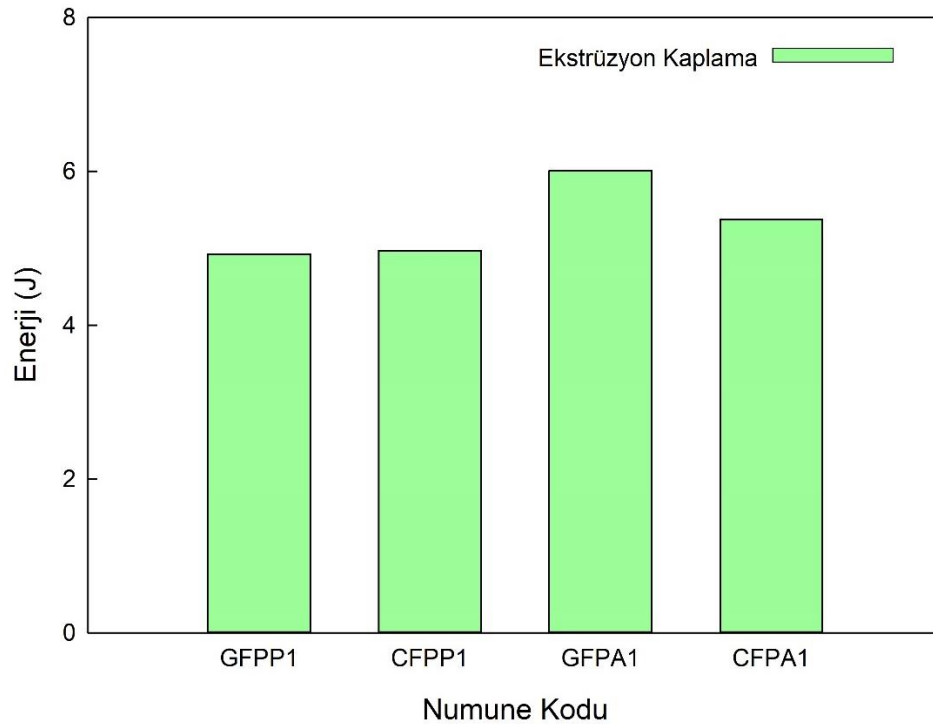
4.3.2.3. Ekstrüzyon kaplama numunelerinin darbe testi sonuçları

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilmiş polpropilen ve poliamid-12 matrisli prepreglerin darbe mukavemeti Şekil 4.21. ve darbe enerjisi miktarları Şekil 4.22.'de verilmektedir.

Darbe testi sonuçlarına göre poliamid-12 matrisli prepreglerde her iki takviye malzemesi için de darbe mukavemetinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Darbe mukavemetinin yüksek çıkmasının sebebi matris malzemesinin darbeye karşı göstermiş olduğu direnç ve elyaf arası darbe kuvveti iletiminin daha iyi olmasıdır. Diğer yandan darbe enerjisinin de poliamid-12 matrisli prepreglerde daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla poliamid-12 matrisli prepreglerin tokluk özelliğinin daha iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.21. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe mukavemeti grafiği



Şekil 4.22. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen prepreglerin darbe enerjisi grafiği

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli preprepregler karşılaştırıldığında ise cam elyaf takviyeli poliamid-12 preprepreglerin darbe mukavemetinin ve enerji miktarlarının daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak polipropilen matrisler arasında bakıldığında karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli preprepreglerde darbe mukavemeti ve darbe enerjisi değerleri birbirine çok yakındır. Tablo 4.4.'te görüleceği gibi cam elyaf takviyeli polipropilen preprepreglerin darbe mukavemetleri ve darbe enerji değerleri arasında çok sapma olduğu tespit edilmiştir. Bu da yer yer elyaf demetlerinde hasarlanmadan kaynaklı mukavemet düşüşü olabileceğini göstermektedir.

Tüm test numunelerinde darbe mukavemetinin ve malzeme tokluğunun ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilmiş preprepreglerde yüksek olduğu görülmektedir. Kuru elyaf yüzeyine matris malzemesinin eriyik olarak beslenmesi, impregnasyon miktarının yüksek olması (basınçlı emdirme sistemine bağlı olarak), ekstrüder ve levha kafa ile stabil kaplama yapılabilmesi prepreg özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir.

Darbe testi sonuçlarına göre ikinci en iyi kaplama türü toz kaplama yöntemidir. Toz kaplama yöntemi ile ön impregnasyonun sağlanabilmesi emdirme sisteminin proses şartlarını kolaylaştırmaktadır. Böylece matris elyaf demetlerinin arasında homojen bir şekilde yayılabilmektedir. Ancak toz kaplama yönteminde toz mekanik olarak (basınçlı hava vb.) elyaf yüzeyine beslenmektedir. Bu proses koşulu az miktarda da olsa elyaf demetlerine zarar verebilmektedir.

Darbe testi sonuçlarına göre en kötü sonuç veren yöntem ise film kaplama yöntemidir. Film kaplama yönteminde homojen bir kaplama işlemi uygulansa da elyaf demetleri içerisine impregnasyonu zorlaştırmakta ve böylece lamine içerisinde katların birbirine sağlıklı yapışması sağlanamamakta dolayısıyla darbe mukavemetleri düşük çıkmaktadır.

4.3.3. Eğme testi

Matris ve takviye malzemesine göre her üç kaplama yöntemiyle üretilen prepreglere eğme testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.5.'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Eğme testi sonuçları

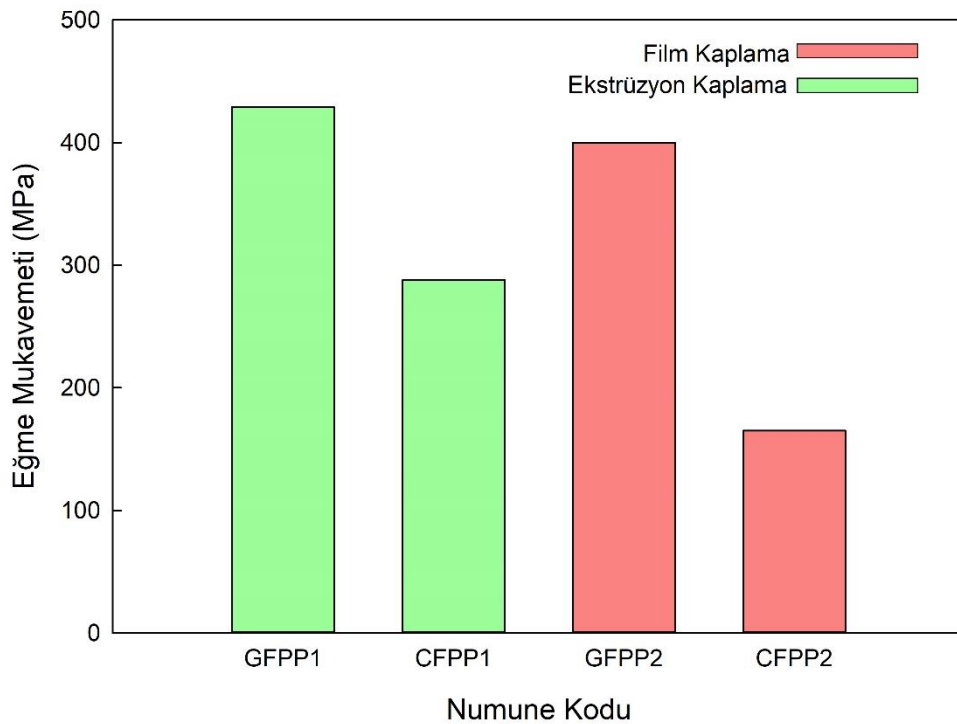
Kaplama Yöntemi	Numune Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (GPa)
Film Kaplama	GFPP-2	400 (\pm 13)	61,7 (\pm 3,4)
	CFPP-2	165 (\pm 4)	52,3 (\pm 2,6)
Ekstrüzyon Kaplama	GFPP-1	429 (\pm 24)	37,3 (\pm 0,7)
	CFPP-1	288 (\pm 10)	63,5 (\pm 4,8)
	GFPA-1	672 (\pm 59)	90,2 (\pm 5,0)
	CFPA-1	803 (\pm 48)	56,2 (\pm 5,2)
Toz Kaplama	GFPA-3	703 (\pm 31)	75,4 (\pm 5,8)
	CFPA-3	705 (\pm 50)	68,6 (\pm 4,5)

4.3.3.1. Ekstrüzyon ve film kaplama numunelerinin eğme testi sonuçları

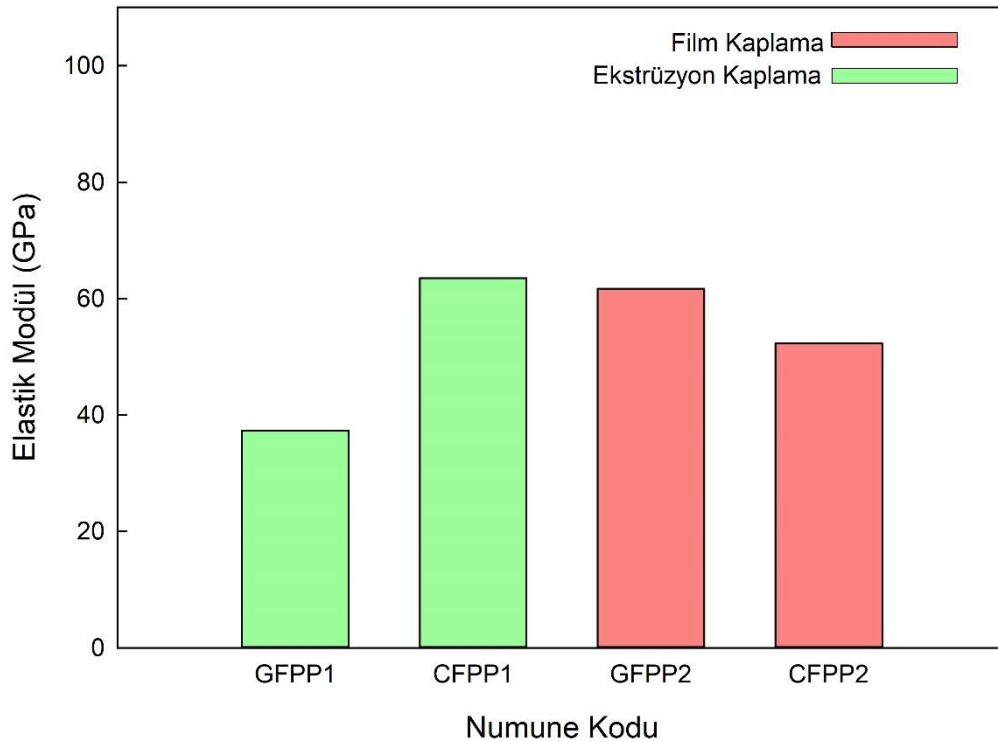
Ekstrüzyon kaplama ve film kaplama yöntemiyle üretilmiş polipropilen matrisli prepreglere eğme mukavemeti Şekil 4.23. ve elastik modülü Şekil 4.24.'te verilmiştir.

Ekstrüzyon ve film kaplama ile üretilen cam elyaf takviyeli prepreglerin eğme testi sonucuna göre ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti değerleri daha yüksektir. Elastik modül ölçümlerinden ise, film kaplama ile üretilmiş cam elyaf takviyeli prepreglerin elastik modülü 20 GPa daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buradan film kaplama ile üretilmiş cam elyaf takviyeli prepreglerin daha sert malzemeler olduğu anlaşılmıştır. Sistemin kök nedenin araştırılması ilerleyen dönem çalışmalarında termal analiz yöntemleriyle kristallenme miktarı incelenerek gerçekleştirilecektir.

Ekstrüzyon ve film kaplama ile üretilen karbon elyaf takviyeli prepreglerde ise hem eğme mukavemeti hemde elastik modülü değeri ekstrüzyon yöntemiyle kaplamada daha yüksektir. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle hat akışı boyunca homojen bir kaplama profili olduğu gibi elyaf demetlerinin enine kaplanmasında da homojen olduğu görülmektedir. Bu da ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilmiş numunelerin daha sert yapıda olduğu ve esnekliğinin düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.23. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği



Şekil 4.24. Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme elastik modül grafiği

Film kaplama yöntemiyle üretilen cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli prepregler karşılaştırıldığında ise cam elyaf takviyeli prepreglerin hem eğme mukavemetinin ve hem de elastik modülünün daha yüksek olduğu dikkat çekmiştir. Film kaplama üretim yöntemiyle üretilen prepregler esnekliği düşük ve görece sert malzemeler olarak görülmektedir.

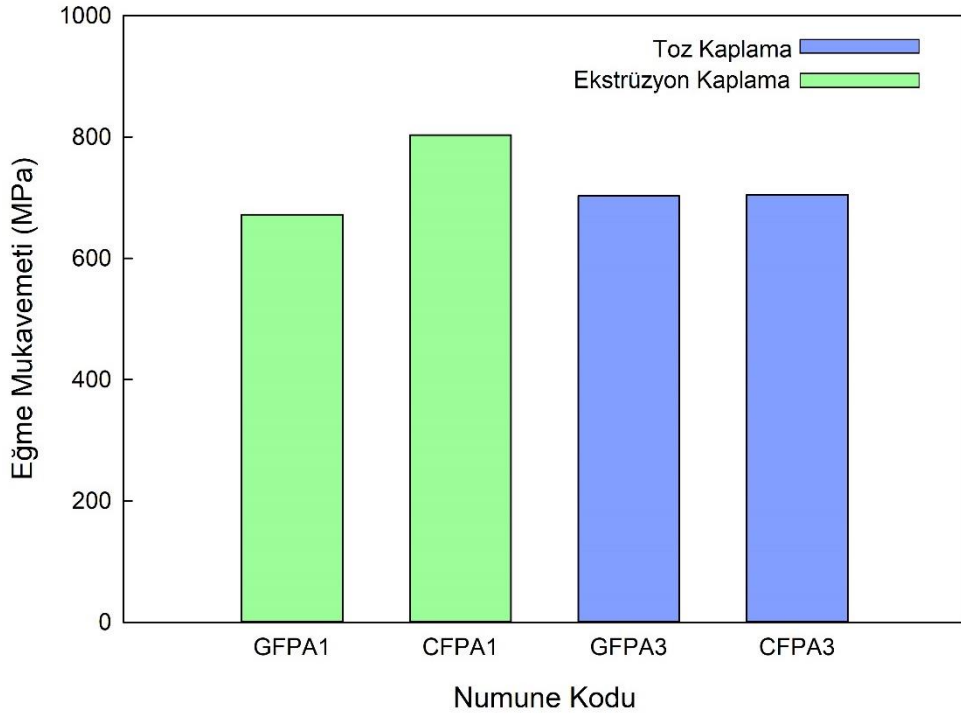
4.3.3.2. Ekstrüzyon ve toz kaplama numunelerinin eğme testi sonuçları

Ekstrüzyon ve film kaplama yöntemiyle üretilmiş poliamid-12 matrisli prepreglerin eğme mukavemeti Şekil 4.25. ve eğme elastik modülü Şekil 4.26.'de görülmektedir.

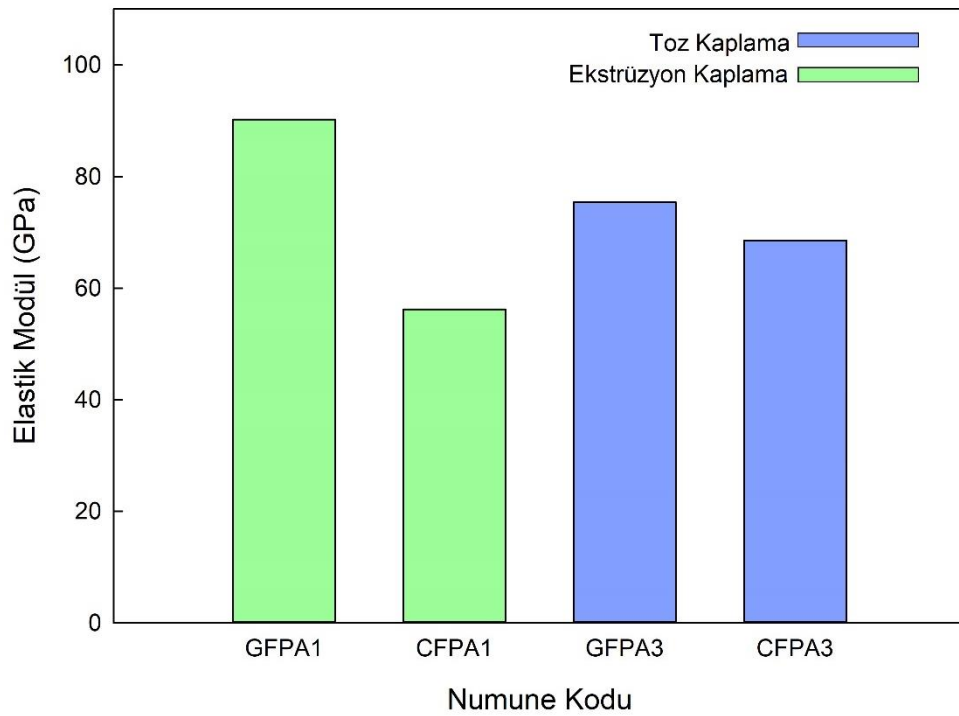
Ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama yöntemleriyle üretilen cam elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerin eğme testi sonuçlarında toz kaplama yöntemiyle üretilen prepreglerin eğme mukavemetinin, ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen prepreglere göre 30 MPa daha fazla olduğu görülmektedir. Her iki yöntemle üretilen prepreglerin impregnasyon derecelerinin yüksek olması, katlar arası yapışmayı olumlu şekilde etkilemesi ve matris elyafları homojen bir şekilde sarması nedeniyle

eğme mukavemeti sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Ancak elastik modüle bakıldığında ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen numunelerin değerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen numunelerin daha tok ve sert yapıda olduğunu göstermektedir.

Ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama yöntemleriyle üretilen karbon elyaf takviyeli prepreglerin eğme testi sonuçları incelendiğinde ekstrüzyon kaplama yönteminin, toz kaplama yöntemine göre eğme mukavemetinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile gerçekleştirilen prepreg üretimlerinde elyaf demetlerinin homojen bir şekilde kaplandığı ve katlar arası yapışmanın daha iyi sağlandığı görülmektedir. Ancak toz kaplama yöntemiyle üretilen numunelerin elastik modülünün bir miktar daha yüksek olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.25. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği



Şekil 4.26. Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemi ile üretilen preprepreglerin eğme elastik modül grafiği

Toz kaplama yöntemiyle üretilen cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli preprepregler karşılaştırıldığında ise her iki takviye ile üretilen preprepreglerin eğme mukavemetinin birbirine yakın değerde olduğu tespit edilmiştir. Ancak cam elyaf takviyeli malzemelerin elastik modülünün daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bilgiye dayanarak toz kaplam üretim yöntemiyle üretilen cam elyaf takviyeli preprepreglerin esnekliğinin düşük ve göreceli olarak sert malzemeler olduğu söylenebilir.

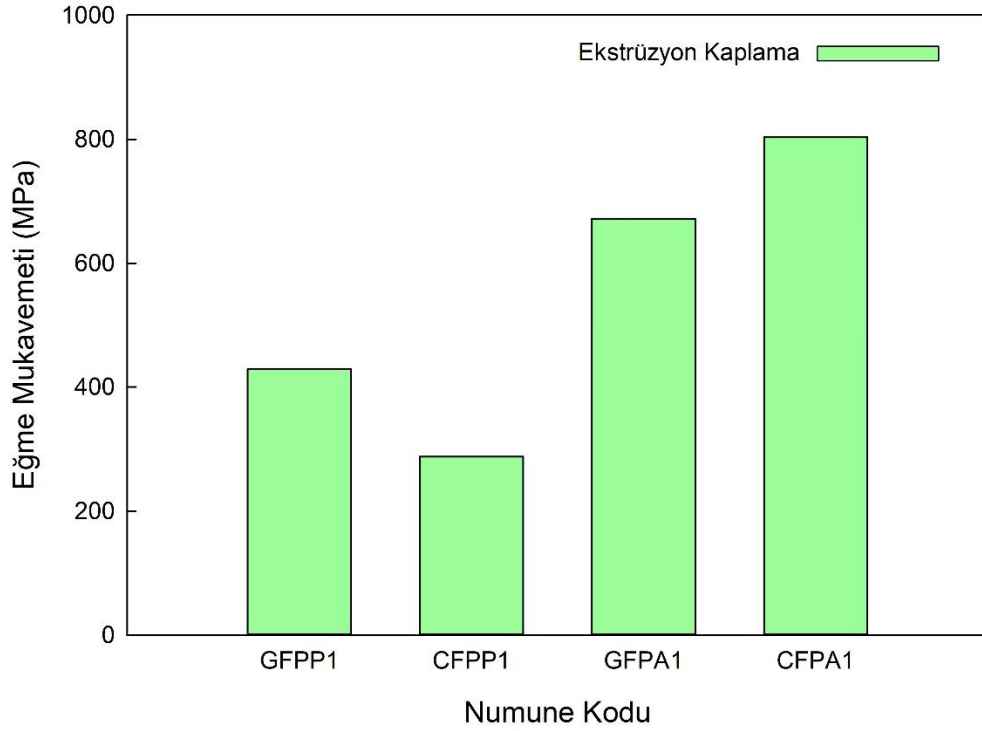
4.3.3.3 Ekstrüzyon kaplama numunelerinin eğme testi sonuçları

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilmiş polipropilen ve poliamid-12 olmak üzere iki farklı matris malzemesi kullanılmıştır. Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilmiş polipropilen ve poliamid-12 matrisli preprepreglerin eğme mukavemeti Şekil 4.27. ve eğme elastik modülü Şekil 4.28.'te yer almaktadır.

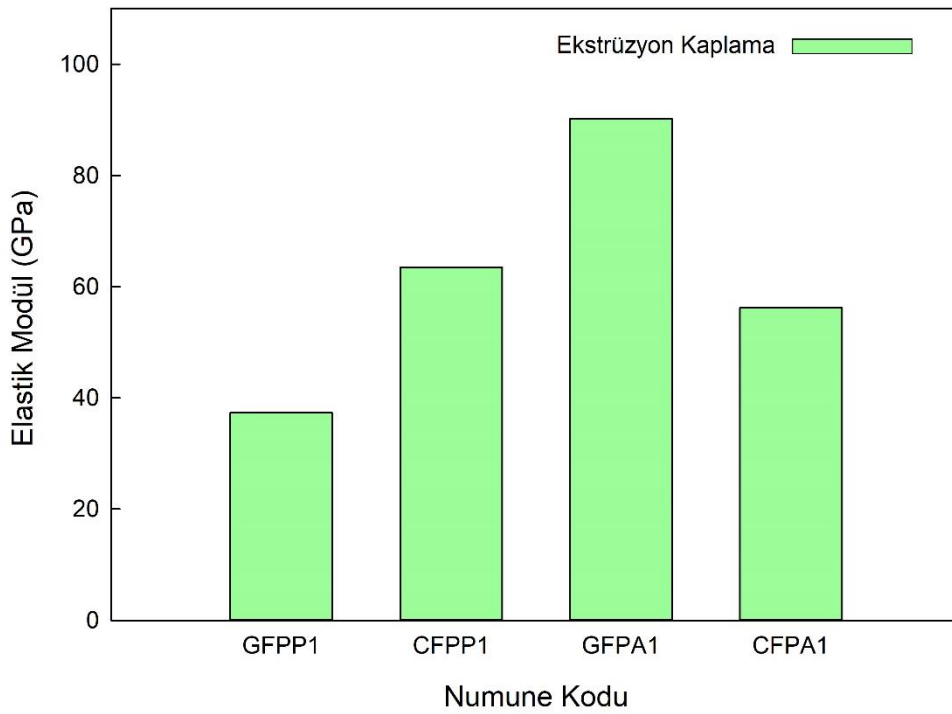
Eğme testi sonuçlarına göre poliamid-12 matrisli preprepreglerin eğme mukavemetlerinin her iki takviye malzemesi için de daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da poliamid-12 matrisinin eğme kuvvetine karşı gösterdiği direncin

daha yüksek olduğunu ve katlar arası yapışmayı daha iyi sağladığını göstermektedir. Her iki matris malzemesi için eğme elastik modülleri karşılaştırıldığında ise cam elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerin elastik modülünün en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Cam elyaf takviyeli polpropilen matrisler için yukarıda belirtildiği gibi ilerleyen çalışmalarda termal analiz yöntemiyle kristalizasyon oranı araştırılacaktır.

Ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen karbon elyaf ve cam elyaf prepregler karşılaştırıldığında ise polipropilen matrisler için cam elyaf takviyelerin, poliamid-12 matrisler içinse karbon elyaf takviyelerin eğme mukavemet değerlerinin yüksek olduğu dikkat çekmektedir. En yüksek elastik modül değerin cam elyaf takviyeli poliamid-12'ye ait olduğu görülmektedir.



Şekil 4.27. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin eğme mukavemeti grafiği



Şekil 4.28. Ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen prepeglerin eğme elastik modülü grafiği

Eğme test sonuçlarına göre en yüksek eğme mukavemeti değerleri ekstrüzyon kaplama yönteminde elde edilmiştir. Sonrasında toz kaplama yöntemi gelmektedir. Her iki üretim yönteminde de impregnasyon derecesinin yüksek olması, katlar arası yapışma mukavemetinin ve malzemenin eğme dayanımı üzerine olumlu katkı sağlamaktadır. Ayrıca ekstrüzyon kaplamanın elyaf demetlerine 90° yönünde sürekli homojen bir kaplama sağlayabilmesi ayrı bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

Eğme testi sonuçlarına göre film kaplama yöntemi ile üretilen numunelerin eğme mukavemetinin daha düşük olduğu görülmektedir. Film kaplama yöntemiyle rijit ve stabil bir kaplama yapılabilmesine karşın proses koşullarını zorlaştırması mukavemet değerlerine direkt olarak etki etmektedir. Ayrıca elyaf demetleri arasına işlememiş olan matris nedeniyle katlar arası mukavemetin düşük olmasına neden olmaktadır.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Termoset matrisli kompozitlerin raf ömrü, geri dönüştürülemez ve tekrar şekillendirilemez gibi sınırlayıcı özellikleri nedeniyle termoplastik kompozitler üzerine gerçekleştirilen araştırmalar hızla artmaktadır. Buna bağlı olarak süreksiz elyaf ve dokuma kumaşlar üzerine yapılan araştırmalar bulunmaktadır. Ancak tek yönlü sürekli elyaf takviyeli prepregler üzerine literatürde sınırlı kaynak bulunmaktadır.

Tek yönlü sürekli elyaf takviyeli prepregler ön emdirme işlemi uygulanmış yarı mamul ürünlerdir. Termoplastik prepreglerin geri dönüştürülebilir olması, raf ömürlerinin olmaması, tekrar tekrar işlenebilir olması, tamiratının daha kolay yapılması, kırılma tokluğunun yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Ancak termoplastik prepreglerde ön emdirme işlemi ve kalıplama işlemleri sırasında termoset matrisli prepreglere göre proses koşulları daha zordur.

Bu çalışma kapsamında tek yönlü sürekli elyaf takviyesi kullanılarak üretim yöntemlerinin etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı kaplama sistemi kullanılmıştır. Bunlar;

- Ekstrüzyon kaplama,
- Toz kaplama ve
- Film kaplama yöntemidir.

Sürekli elyaf takviyesi olarak termoplastik matrise uyumlu E-cam elyaf ve karbon elyaf, matris malzemesi olarak da polipropilen ve poliamid-12 kullanılmıştır. Polipropilen malzemeler film ve ekstrüzyon kaplama için, poliamid-12 hammaddesi ise toz kaplama ve ekstrüzyon için tercih edilmiştir. Bu çalışmada toz kaplama sistemlerinde kullanıma uygun polipropilen toz bulunması çok zordur. Toz formunda

bulunan polipropilenler de elektrostatik kaplama sistemleri için uygun değildir. Ayrıca polipropilenin toz formundaki maliyeti oldukça yüksektir. Aynı şekilde film kaplama sistemlerinde uygun poliamid-12 serisinin bulunması oldukça zor ve film maliyetleri oldukça yüksektir.

Çalışma kapsamında ağırlıkça %50 oranında 8 adet tek yönlü termoplastik prepreg üretimi gerçekleştirilmiş ve üretimler sırasında kaplama sistemi dışında tüm üretim parametreleri sabit tutulmuştur sadece matris malzemesine göre sıcaklık değerleri değiştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen her takviye ve matris elamanı ikilisine fizikokimyasal, morfolojik ve mekanik testler uygulanmıştır. Termoplastik matrisli prepreg numunelerine uygulanan testler ile kaplama yönteminin prepreg özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Fizikokimyasal test sonuçları incelendiğinde ekstrüzyon kaplama ve film kaplama yöntemleriyle daha stabil ve homojen bir kaplama elde edilebildiği görülecektir. Ekstrüzyon kaplama sisteminde ekstrüder yardımı ile homojen ve sürekli bir matris akışı sağlanabilmektedir. Ekstrüzyon kaplamada bulunan levha kafanın homojen akış dinamiği sağlanmasıyla elyafların dik ve yatay yönde homojen kaplandığı görülmüştür. Film kaplama sisteminde, ise ekstrüzyon kaplama sistemine nazaran matris malzemesi katı bir şekilde hatta beslenmektedir. Film kalınlığı belirlenerek kolaylıkla birim alandaki matris miktarı ayarlanabilmekte ve film hat akışı sırasında sistemden ayrılmadığı sürece homojen bir kaplama elde edilebilmektedir. Toz kaplama sistemlerinde proses zorluğu oluşturan ve birbirine bağlı birçok parametrenin mevcut olduğu görülmüştür. Toz kaplama sistemi içerisinde spreycaplama nozüllerinin homojen basınçlandırılmaması ya da elyaf demetlerine göre konumlandırılmaması kaplama kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Morfolojik incelemeler neticesinde ekstrüzyon kaplama ve toz kaplama yöntemlerinde impregnasyonun tamamen oluştuğu, film kaplama yöntemiyle üretilen tek yönlü termoplastik prepreglerde ise sadece alt ve üst yüzeyde impregnasyonun gerçekleştiği görülmüştür. Ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilen tek yönlü prepreg üretimlerinde matris malzemesinin eriyik şekilde verilmesi, emdirme sistemine

gelmeden önce ön impregnasyonun oluşmasını sağlamakta, daha sonra uygulanan emdirme işlemiyle birlikte nihai impregnasyon gerçekleşmektedir. Ancak cam elyaf takviyeli poliamid-12 matrisli prepreg için kısmen impregnasyon görülmüştür. Bu nedenle emdirme sistemi üzerinde proses parametrelerinin daha detaylı araştırılması gerekmektedir.

Toz kaplama sistemlerin de elyaf demetlerinin spreyle kaplama yöntemiyle kaplanması ön impregnasyon oluşmasını sağlamaktadır. Toz boyutlarının 25 µ mertebesinde olması nedeniyle elyaf demetleri içerisine kaplama sırasında rahatlıkla girebilmektedir. Ardından emdirme işlemine tabi tutulmasıyla impregnasyon gerçekleşmektedir.

Film kaplama yönteminde matris malzemesinin katı formda verilmesi proses koşullarını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle film kaplama sistemlerinde alt ve üst yüzeyin kaplandığı ancak elyaf demetlerinin içerisine matris malzemesinin emdirilemediği görülmüştür.

Mekanik incelemeler matris malzemesine göre gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon kaplama ve film kaplama ile gerçekleştirilen polipropilen matrisli ürünlere çekme, darbe ve eğme testleri uygulanmıştır. Cam elyaf takviyeli polipropilen prepreglerde çekme testi sonuçları film kaplama yöntemiyle ortalama 371 MPa dayanım gösterirken ekstrüzyon kaplama yöntemiyle ortalama 233 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Ancak darbe ve eğme testlerinde ekstrüzyon kaplama sisteminin performansı daha iyi çıkmıştır. Karbon elyaf takviyeli polipropilen prepreglerin çekme testi sonuçlarında ekstrüzyon kaplama yöntemi ile elde edilen numuneler ortalama 1050 MPa dayanım gösterirken, film kaplama yöntemi ile elde edilen numuneler ortalama 944 MPa dayanım göstermektedir. Aynı şekilde ekstrüzyon kaplama sistemi ile elde edilen ürünlerin darbe ve eğme testlerinde de performansı en yüksek çıkmıştır.

Ekstrüzyon ve toz kaplama yöntemleri ile üretilen poliamid-12 matrisli ürünlere uygulanan çekme testi neticesinde, ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen cam

elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerin çekme mukavemetinin 450 MPa ve toz kaplama yöntemi ile üretilen cam elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerin çekme mukavemetinin ise 349 MPa olduğu görülmüştür. Benzer şekilde darbe testinde de en yüksek değer ekstrüzyon kaplama yöntemi ile üretilen numunelere aittir. Eğme mukavemetinde en yüksek değer ise 30 MPa bir fark ile toz kaplama yöntemi ile üretilen numunelere aittir.

Karbon elyaf takviyeli poliamid prepreglerde ekstrüzyon kaplama yöntemiyle üretilen ürünlerin çekme mukavemeti 1305 MPa, toz kaplama yöntemi ile üretilen prepreglerin 1225 MPa olduğu tespit edilmiştir. Eğme ve darbe testlerinde de benzer sonuç görülmüş ve ekstrüzyon kaplama sistemiyle üretilen prepreglerin dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Ekstrüzyon kaplama ile üretilen polipropilen ve poliamid matrisli prepregler de ise poliamid-12 matrisinin üstün özellikleri tüm mekanik testlere yansımıştır. Örneğin karbon elyaf takviyeli poliamid-12 prepreglerde çekme mukavemeti 1305 MPa iken karbon elyaf takviyeli polipropilen prepreglerde çekme mukavemet 1050 MPa civarında seyretmektedir.

Bu çalışmanın sonucunda ekstrüzyon kaplama sisteminin, söz konusu elyaflar ve matrisler için performansı en yüksek tek yönlü termoplastik prepeg üretim yöntemi olduğu görülmüştür. Toz kaplama ve film kaplama yöntemlerinin ise proses parametreleri üzerinde detaylı çalışmalar yapıldığında umut verici üretim yöntemleri olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Advani, S., Sozer, E. ve Mishnaevsky, L. (2003) 'Process Modeling in Composites Manufacturing', in Marcel Dekker, Inc., 1–200.
- Ali, R., Iannace, S. ve Nicolais, L. (2003) 'Effects of processing conditions on the impregnation of glass fibre mat in extrusion/calendering and film stacking operations', *Composites Science and Technology*, 2217–2222.
- Bhamidipati, K., Didari, S. ve Harris, T. A. L. (2012) 'Experimental Study on Air Entrainment in Slot Die Coating of High-Viscosity, Shear-Thinning Fluids', *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 80, 195–204.
- Bijsterbosch, H. ve Gaymans, R. J. (1993) 'Impregnation of glass rovings with a polyamide melt. Part 1: Impregnation bath', *Composites Manufacturing*, 4(2), 85–92.
- British Standards Institution BSI (1999) 'BS-EN-ISO-1172-1999; textile-glass-reinforced plastics-Prepregs, moulding compounds and laminates-Determination of the textile-glass and mineral-filler content-Calcination methods', (1), 1–18.
- BS EN 2562:1997 (1999) 'Carbon fibre reinforced plastics — Unidirectional laminates — Tensile test parallel to the fibre direction'.
- BS EN ISO 14125:1998 (2002) 'Fiber-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties',.
- BS EN ISO 179-1, . (2010) 'BSI Standards Publication Plastics — Determination of Charpy impact properties', BSI Standards Publication.
- Campbell, F. C. (2004) *Manufacturing Process for Advanced Composites*. Elsevier Advanced Technology.1-437
- Cattanach, J. B., Guff, G. ve Cogswell, F. N. (1986) 'The processing of thermoplastics containing high loadings of long and continuous reinforcing fibers', *Journal of Polymer Engineering*, 6(1–4), 345–362.
- Devic, A.-C. ve ark. (2018) 'Polymer Composites Circularity', 1- 21.

- Ding, F., Giacomini, A. J. and Slattery, J. C. (2001) 'Sheet coating by drawdown of extruded polymer', *Journal of Coatings Technology*, 73(921), 127–134.
- Ding, X., Fuller, T. F. ve Harris, T. A. L. (2013) 'Predicting fluid penetration during slot die coating onto porous substrates', *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 99, 67–75.
- Dogu, M. ve Gurkaynak, M. A. (2015) 'Development of a Parametric Design Method for a Novel Slot-Die Geometry', in *Proceedings of the 2nd Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials*.
- EN ISO 527-5, T. (2010) 'TS EN ISO 527-5', (112).
- EN2559, D. (1997) 'Din En 2559', (3113).
- Gattinger, J., Kirsch, M. ve Kirchebner, B. (2018) 'Flexible composite strands through extrusion of crimped fiber reinforced thermoplastic elastomers', *Materials Today Communications*. Elsevier, 15, 43–47.
- Gonzalez-Ibarra, A., Davis, R. . ve Heisey, C. L. (1997) 'The effect of polyamic acid binder concentration on the processability and properties of LaRC TPI composites made by suspension prepregging', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 10, 85–105.
- Gülmez, S. (2018) Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler. Pamukkale Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi.
- Hartness, T. ve Carolina, N. (1988) 'Thermoplastic Technology Advanced Composite Systems', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1, 210–220.
- Hüner, Ü. (2008) Plastik esaslı kompozit malzemelerin sıcak birleştirme işlemlerinin incelenmesi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- Irving, P. E. ve Soutis, C. (2015) *Polymer Composites In The Aerospace Industry*.
- Iyer, S. R. and Drzal, L. T. (1990) 'Manufacture of Powder-Impregnated Thermoplastic Composites', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 3, 325–355.
- Jeol Ltd (2009) *SEM Scanning Electron Microscope A To Z Basic Knowledge For Using The SEM*, Jeol Ltd.
- Jones, R. (1999) *Mechanics of Composite Materials*. Taylor & Francis Inc.
- Karadağ, S. (2014) Cam elyaf/kalsit dolgulu ve polietilen ve geri dönüşüm PET polimer hibrit kompozit geliştirilmesi ve karakterizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.

- Karmaker, A. C. ve Hinrichsen, G. (1991) 'Processing and characterization of jute fiber reinforced thermoplastic polymers', *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 30(5–6), 609–629.
- Khagendra Kumar, Y. ve Singh Lohchab, D. (2016) 'Influence of aviation fuel on mechanical properties of glass fiber-reinforced plastic composite', *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(4), 58–65.
- Kim, J. W. ve Lee, J. S. (2016) 'The effect of the melt viscosity and impregnation of a film on the mechanical properties of thermoplastic composites', *Materials*, 9(6).
- Komornicki, J. ve ark. (2017) 'Polymer composites for automotive sustainability Polymer composites for automotive sustainability', *SusChem*.
- Koniuszewska, A. G. ve Kaczmar, J. W. (2016) 'Application of polymer based composite materials in transportation', *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 32(1), 1–23.
- Kouda, S. (2008) 'Prediction of processability at extrusion coating for low-density polyethylene', *Polymer Engineering And Science*, 1094–1102.
- Lacroix, F., Lu, H. Q. ve Schulte, K. (1999) 'Wet powder impregnation for polyethylene composites: Preparation and mechanical properties', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 369–373.
- Liu, D. ve ark. (2017) 'Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament', *Journal of Materials Science*. Springer US, 53(3), pp. 1887–1898.
- Liu, T. (1992) 'Minimum wet thickness coating in extrusion', *Chemical Engineering*, 47(7), 1703–1713.
- Mack, J. ve Schledjewski, R. (2012) *Filament winding process in thermoplastics*. Woodhead Publishing Limited.
- Mallick P. K. (2010) *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Woodhead Publishing Limited.
- Mayer, C., Wang, X. ve Neitzel, M. (1998) 'Macro-and micro-impregnation phenomena in continuous manufacturing of fabric reinforced thermoplastic composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 783–793.
- Mazumdar, S. K. (2002) *Composites Manufacturing*. CRC PRESS. 22-246

- Miller, A. ve Gibson, A. G. (1992) 'Impregnation techniques for thermoplastic matrix composites', *Composites Manufacturing*, 3(4), 223–233.
- Mitschang, P., Blinzler, M. ve Wöglinger, A. (2003) 'Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends', *Composites Science and Technology*, 63, 2099–2110.
- Mosallam, A. S. (2014) 'Polymer Composites in Construction: An Overview', *SOJ Materials Science & Engineering*, 2(1), 01-25.
- Muzzy, J. ve ark. (1989) 'Electrostatic prepregging of thermoplastic matrices', *SAMPE Journal*, 25, 15–21.
- Nam, J. ve Carvalho, M. S. (2010) 'Two-layer tensioned-web-over-slot die coating: Effect of operating conditions on coating window', *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 65(13), 4065–4079.
- Nayak, N. V. (2014) 'Composite materials in aerospace design', *Materials & Design*, 17(1), 56.
- Neşer, G. (2017) 'Polymer based composites in marine use: History and future trends', *Procedia Engineering*, 194, 19–24.
- Nesrin, S. K. ve ark. (2018) 'Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications', *Intech open*, 2, 64.
- Ning, C. Y., Tsai, C. C. ve Ta-Jo, L. (1996) 'The effect of polymer additives on extrusion slot coating', *Chemical Engineering Science*, 51(12), 3289–3297.
- Padaki, S. ve Drzal, L. T. (1999) 'A simulation study on the effects of particle size on the consolidation of polymer powder impregnated tapes', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 325–337.
- Park, J., Shin, K. ve Lee, C. (2014) 'Optimized design for anti-reflection coating process in roll-to-roll slot-die coating system', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Elsevier, 30(5), 432–441.
- Peltonen, P. ve ark. (1992) 'The Influence of Melt Impregnation Parameters on the Degree of Impregnation of a Polypropylene/Glass Fibre Prepreg', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 5(4), 318–343.
- Ramakrishna, S., Hamada, H. ve Cuong, N. K. (1994) 'Fabrication of Knitted Glass Fibre Fabric Reinforced Thermoplastic Composite Laminates', *Advanced Composites Letters*, 3(6), 189–192.

- Ramani, K., Woolard, D. E. ve Duvall, M. S. (1995) 'An electrostatic powder spray process for manufacturing thermoplastic composites', *Polymer Composites*, 16(6), 459–469.
- Rath, M., Kreuzberger, S. ve Hinrichsen, G. (1998) 'Manufacture of aramid fibre reinforced nylon-12 by dry powder impregnation process', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 933–938.
- Şahin, A. E. (2013) Pomza takviteli polimer matrisli kompozitlerin üretim ve erozif aşınma davranışının incelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisan Tezi.
- Salernitano, E. ve Migliaresi, C. (2003) 'Composite materials for biomedical applications: a review.', *Journal of applied biomaterials & biomechanics : JABB*, 1, 3–18.
- Savadori, A. ve Cutolo, D. (1993) 'increasing technical interest. This new generation of materials', *Makromol. Chem., Macromol, Symp.*, 68, 109–131.
- Selvaraju, S. ve Ilaiyavel, S. (2011) 'Applications of composites in marine industry', *Contemporary African American Women Playwrights: A Casebook*, 89–91.
- Shivi Kesarwani (2017) 'Polymer composites in aviation sector', *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(6), 518–525.
- Silva, R. F. et al. (2008) 'New Powder Coating Equipment to Produce Continuous Fibre Thermoplastic Matrix Towpregs', *Materials Science Forum*, 587–588, 246–250.
- Sönmez, M. (2009) Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye'den dört örnek firma üzerine bir inceleme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Ürünleri Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi.
- Stokes-Griffin, C. M. ve Compston, P. (2019) 'The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of CF/PA6 laminates manufactured in a laser tape placement process', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, pp. 84–91.
- Sun, S.-P. ve ark. (2014) 'A modified pultrusion process for preparing composites reinforced with continuous fibers and aligned hydroxyapatite nano needles', *Polymer Composites*, 37(4), 1137–1142.
- Tran, M. Q. ve ark. (2011) 'Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing', *Plastics, Rubber and Composites*, 40(2), 100–107.

- Türkmen, İ. ve Durmuş, H. (2013) ‘Deniz Taşıtlarının Üretiminde Kullanılan Kompozit Malzemeler’, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 196, 26–35.
- Turner, B. N. ve Gold, S. A. (2014) ‘A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process desing and modeling’, *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192–204.
- Vaidya, U. K. ve Chawla, K. K. (2008) ‘Processing of fibre reinforced thermoplastic composites’, *International Materials Reviews*, 53(4), 185–218.
- Vatangül, E. (2008) Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ANSYS 10 programı ile ısı gerilme analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bitirme Tezi.
- Wagner, J. R., Mount, E. M. ve Giles, H. F. (2014) ‘Extrusion Coating and Lamination’, in *Extrusion Coating And Lamination*, 551–554.
- Wang, R. M., Zheng, S. R. ve Zheng, Y. P. (2011) *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing Limited.
- Weinstein, S. J. and Gros, A. (2005) ‘Viscous liquid sheets and operability bounds in extrusion coating’, *Chemical Engineering Science*, 60, 5499–5512.
- Wu, G. M. ve Schultz, J. M. (2000) ‘Processing and properties of solution impregnated carbon fiber reinforced polyethersulfone composites’, *Polymer Composites*, 21(2), 223–230.
- Yıldızhan, H. (2008) Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi". Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz, U. ve Evcı, C. (2015) ‘Havacılık ve Savunma Sektöründe Kompozit Malzemelerin Geleceği’, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2), 77–109.
- Yu, W., Liu, T. ve Yu, T. (1995) ‘Reduction of the minimum wet thickness in extrusion slot coating’, *Chemical Engineering Science*, 50(6), 917–920.
- Zaniboni, C. ve Ermanni, P. (2006) ‘An electrostatic powder spray process for manufacturing polyphthalamide high performanca composite’, *Polymer Composites*, 16, 459–469.
- Zhang, L. (2015) ‘The Application of Composite Fiber Materials in Sports Equipment’, 450–453.
- Zısımopoulos, A. ve Tsouvalis, N. (2015) ““Use of Fiber Reinforced Plastics in Ship Construction: A Study of SOLAS regulation II-2/17 on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety””, *Fiberglass Reinforced Plastic (FRP)*.

ÖZGEÇMİŞ

Alperen ORMAN, 23.06.1992 tarihinde Edirne'nin Uzunköprü ilçesinde doğdu. İlk ve orta eğitimini Yunus Emre İlköğretim okulunda, lise eğitimini Uzunköprü Muzaffer Atasay Anadolu Lise'sinde tamamladı. 2010 yılında Uzunköprü Muzaffer Atasay Anadolu Lise'sinden mezun olduktan sonra Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2014 yılında bu bölümde lisans eğitimini tamamlayan Alperen ORMAN, 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimi sonrası 2014 yılında MİR Araştırma ve Geliştirme A.Ş. firmasında Asistan Ar-Ge Mühendisi olarak işe başladı. Halen MİR Araştırma ve Geliştirme A.Ş. firmasında Kompozit Üretim Birimi Ekip Lideri olarak çalışmaktadır.