

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PULTRUZYON YÖNTEMİYLE CTP ÜRETİMİ VE
ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MALZEME NİHAİ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Metalurji ve Malzeme Mühendisi Ali Meriç BAHAR

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL (YTÜ)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1 Kompozit Malzeme Tanımı	3
2.2 Takviye Malzemesi ve Matris Malzemeleri	8
2.2.1 Takviye Malzemelerinin Rolü	8
2.2.2 Matris Malzemelerinin Rolü	8
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	9
2.4 Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler	9
2.4.1 CTP’de En Çok Kullanılan Plastik Matrisler ve Genel Özellikleri	10
2.4.2 Termoset Kompozit Prosesinin Avantajları	13
2.4.3 Termoset Kompozit Prosesinin Dezavantajları	14
2.4.4 Termoplastik Kompozit Prosesinin Avantajları	14
2.4.5 Termoplastik Kompozit Prosesinin Dezavantajları	14
2.4.6 CTP’de En Çok Kullanılan Takviye Malzemeleri ve Genel Özellikleri	15
2.4.6.1 Cam Elyafı	16
2.4.6.2 Karbon Elyafı	18
2.4.6.3 Aramid Elyafı	19
2.4.7 Takviye Elemanlarının Kritik Özellikleri	21
2.4.7.1 Boyun Çapa Oranı	22
2.4.7.2 Fiberlerin Kısmi Hacim Oranı	22
2.4.7.3 Fiberlerin Yönlenmesi	22
2.4.7.4 Fiberin Özellikleri	22
3. PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ	24
3.1 Islatma/Emdirme	24
3.2 Yatırma	24
3.3 Birleştirme	24
3.4 Katılaştırma	25
3.5 Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	26
3.5.1 Prepreg Yatırma Yöntemi	26

3.5.1.1	Uygulama Alanları	27
3.5.1.2	Ana Hammaddeleri.....	28
3.5.1.3	Kullanılan Teçhizatlar	28
3.5.1.4	Parça Yapımı	29
3.5.1.5	Prepreg Yatırma Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları.....	31
3.5.2	Islak Yatırma Yöntemi	32
3.5.2.1	Uygulama Alanları	32
3.5.2.2	Ana Hammaddeleri.....	33
3.5.2.3	Teçhizat Gereksinimleri	33
3.5.2.4	Parça Üretimi.....	33
3.5.2.5	Proses Basamakları.....	34
3.5.2.6	Islak Yatırma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	34
3.5.3	Sprey Püskürtme Yöntemi.....	35
3.5.3.1	Uygulama Alanları	35
3.5.3.2	Başlıca Hamaddeleri.....	36
3.5.3.3	Kullanılan Teçhizatlar	36
3.5.3.4	Parça Üretimi.....	36
3.5.3.5	Proses Basamakları.....	37
3.5.3.6	Sprey Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	38
3.5.4	Elyaf Sarma Yöntemi	38
3.5.5	Reçine Transfer Kalıplama RTM/Reçine Enjeksiyonu.....	38
4.	PULTRUZYON YÖNTEMİ.....	40
4.1	Giriş.....	40
4.2	Pultruzyon Yöntemine Genel Bakış.....	40
4.3	Reçine Akışı	42
4.4	Pultruzyon Yönteminin Proses Adımları	43
4.5	Pultruzyon Yöntemi Üretim Parametrelerinin Matematik Modelle İfadesi	44
4.5	Pultruzyon Yöntemi Üretim Parametrelerinin Matematik Modelle İfadesi	44
4.5.1	2. Bölge İçin Uygulanacak Eşitlikler	44
4.5.2	1. Bölge İçin Uygulanacak Eşitlikler	45
4.5.3	Fiber Hacim Oranı ve Gözeneklilik Parametrelerinin Modellemesi.....	46
4.5.4	Geçirgenlik Parametresinin Modellenmesi	46
4.5.5	Çekme Hızı Parametresinin Modellenmesi.....	47
4.5.6	Fiber Hacim Oranı Parametresinin Modellenmesi	48
4.5.7	Viskozite Parametresinin Modellenmesi.....	47
4.6	Pultruzyonla Üretimde Kullanılan Başlıca Hamaddeler	51
4.7	Kullanılan Teçhizatlar	52
4.8	Parça Yapımı	53
4.9	Pultruzyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları	53
4.10	Pultruzyon Yönteminin Uygulama Alanları.....	55
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
5.1	Deney Numunelerinin Tedarik Edilmesi.....	57
5.1.1	Armaplast Kompozit ve Plastik.....	57
5.1.2	Pul-tech FRP.....	57
5.2	Numune Özellikleri	58
5.2.1	Takviye Malzemesi Özellikleri	58

5.2.2	Matris Malzemesi Özellikleri	60
5.3	Pultrude Profillerin Çekme Özelliklerinin Tayini	61
5.3.1	Deneyin Amacı	61
5.3.2	Deney Standardı ve Teorik Bilgi	61
5.3.3	Deney Parçaları	62
5.3.4	Değerler ve Hesaplamalar	62
5.3.5	Sonuçlar ve Değerlendirme	64
5.4	Pultrude Profillerin Eğilme Özelliklerinin Tayini	64
5.4.1	Deneyin Amacı	64
5.4.2	Deney Standartı ve Teorik Bilgi	64
5.4.2.1	Deney Parçaları	65
5.4.3	Değerler ve Hesaplamalar	65
5.4.4	Sonuçlar ve Değerlendirme	66
5.5	Pultrude Profillerin Darbe Özelliklerinin Tayini	66
5.5.1	Deneyin Amacı	66
5.5.2	Deney Standartı ve Teorik Bilgi	66
5.5.3	Değerler ve Hesaplamalar	68
5.5.4	Sonuçlar ve Değerlendirme	69
5.6	UV Işığına Maruz Kalan Pultrude Malzemelerin Özellik Değişiminin Tayini	69
5.6.1	Teorik Bilgi	69
5.6.1.1	Ultraviyole Işını Tanımı	69
5.6.1.2	Ultraviyole Radyasyonu	71
5.6.1.3	Ultraviyole Lamba Özellikleri	71
5.6.2	Deney Standartı ve Düzenegi	73
5.6.2.1	Laboratuvar UV Işık Kaynakları	74
5.6.2.2	Deney Ortamı	74
5.6.2.2.1	Işınım Değeri	74
5.6.2.2.2	Sıcaklık	74
5.6.2.2.3	Bağıl Nem Miktarı	75
5.6.3	Deneyin Amacı	75
5.6.4	Deneyin Yapılışı ve Elde Edilen Değerler	76
5.6.5	Sonuçlar ve Değerlendirme	77
5.7	Pultrude Malzemelerin Su Absorbsiyonu Özelliklerinin tayini	77
5.7.1	Deneyin Amacı	77
5.7.2	Teorik Bilgi	77
5.7.3	Deneyin Yapılışı	79
5.7.4	Hesaplamalar ve Grafik	80
5.7.5	Deney Sonuçları ve Yorumlar	81
6.	ABAQUS İLE 3 NOKTA EĞME DENEYİNİN MODELLENMESİ	82
6.1	ABAQUS 6.6-1 Programının Tanıtımı	82
6.2	Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Avantajları	82
6.3	Sonlu Elemanlarla Model Oluşturma Aşamaları	83
6.4	Modellemenin Uygulanışı	83
6.5	Sonuçlar ve Değerlendirme	93
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	94
	KAYNAKLAR	95

ÖZGEÇMİŞ	99
----------------	----

SİMGE LİSTESİ

σ	Akma dayanımı
E	Elastikiyet modülü
μ	Poisson oranı
G	Kayma modülü
R_m	Çekme dayancı
W	Işınım enerjisi
Φ	Toplam radyasyon değeri

KISALTMA LİSTESİ

PMK	Polimer matrisli kompozitler
FRP	Fiber reinforced plastics
PPE	Polipropilen
RTM	Reçine transfer metodu
UV	Ultraviyole
FEA	Finite element analysis.

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kompozit malzeme konseptinin şematik hali	4
Şekil 2.2 Cam elyafının üretim aşamalarının şematik olarak gösterilişi	18
Şekil 2.3 Boron kaplanmış silisyum karbür takviyeli alüminyumun fiber eksenine paralel özellikleri üzerinde fiber kısmi hacim oranının etkisi	22
Şekil 2.4 Fiber malzemelerinin gerilim-gerinim eğrisi	23
Şekil 3.1 Prepreg yatırma yöntemi üretiminden örnekler	27
Şekil 3.2 Uçakların ana iniş kapısı	28
Şekil 3.3 Temiz ortamda kompozit parça üretimi	29
Şekil 3.4 Prepreg yatırma yöntemi için vakum torbalama	30
Şekil 3.5 Vakum çantalama işlemine tabi tutulmuş havacılıkta kullanılan bir parça Otoklav içine girmeye hazır durumda	31
Şekil 3.6 A41-ft tip gezi teknesi	33
Şekil 3.7 Islak yatırma (el yatırması) yönteminin şematik olarak gösterilişi	34
Şekil 3.8 Bir duş teknesi üretiminde kullanılan sprej-püskürtme yöntemi	37
Şekil 3.9 Elyaf sarma makinası	39
Şekil 4.1 Pultrüzyon makinasının şematik olarak gösterilişi	41
Şekil 4.2 Pultrüzyon ürün tabakaları	43
Şekil 4.3 Sayısal Bölgenin Şematik Olarak Gösterilişi	44
Şekil 4.4 Polyesterin izobasinç eğrilerinin gösterilişi ($U=0,025$ m/sn, $EB= 5,2$ Mpa)	48
Şekil 4.5 Polyesterin izobasinç eğrilerinin gösterilişi ($U=0,025$ m/sn, $EB= 9,5$ Mpa)	48
Şekil 4.6 Polyesterin izobasinç eğrilerinin gösterilişi ($V_f= 0,68$, $EB= 5,2$ Mpa)	49
Şekil 4.7 Polyesterin izobasinç eğrilerinin gösterilişi ($V_f= 0,68$, $EB= 2,3$ Mpa)	49
Şekil 4.8 Polyesterin izobasinç eğrilerinin gösterilişi ($\mu=1,00$, $EB= 6,5$ Mpa)	50
Şekil 4.9 Farklı viskozite değerlerinde kalıp duvarlarına yapılan basıncın etkisinin gösterilişi	52
Şekil 4.10 Fiber makaralarının pultrüzyon makinasına geçişi	52
Şekil 4.11 Pultrüzyon yönteminde kullanılan donanımların gösterilişi	52
Şekil 4.12 Pultrüzyon yöntemiyle üretilmiş bazı örnekler	55
Şekil 5.1 Simetri eksenleri gösterilmiş tek yönlü takviyeli plastik kompozit	61
Şekil 5.2 Çekme deney numunesinin şematik gösterilişi	63
Şekil 5.3 Çekme deney numunelerinin çekme cihazında test edilişi	63
Şekil 5.4 Çekme testi sonunda deforme olmuş numunelerin gösterilişi	63
Şekil 5.5 Çekme hızıyla çekme dayancının değişiminin gösterilişi	64
Şekil 5.6 Eğme numunesinin şematik gösterilişi	65
Şekil 5.7 Eğildikten sonraki numunenin aldığı şekil	65
Şekil 5.8 Çekme hızıyla eğme dayancının değişiminin gösterilişi	66
Şekil 5.9 Darbe dayancı ölçme aleti	68
Şekil 5.10 Darbe testinden sonra numunenin aldığı hal	68
Şekil 5.11 Çekme hızıyla darbe dayancı değişiminin gösterilişi	69
Şekil 5.12 Ultraviyole radyasyon eşik kritik sınırlı değerler	71
Şekil 5.13 UV ışınımının dağılımı	72
Şekil 5.14 UV yayılımının lambalara olan mesafe ile varyantının gösterimi	73
Şekil 5.15 UV test düzeneği	73
Şekil 5.16 UV-A lambası	74
Şekil 5.17 UV yaşlandırmasından sonra çekme hızıyla çekme dayancı değerlerinin Değişiminin gösterilişi	77

Şekil 5.18	Su absorpsiyonu deney numunesi	79
Şekil 5.19	Su absorpsiyonu numunesinin hassas tartıda tartılması	79
Şekil 5.20	Su absorpsiyonu numunelerinin distile su içerisinde bırakılması	81
Şekil 5.21	Absorpsiyon miktarının günlük olarak değişiminin gösterilişi	81
Şekil 6.1	Analiz açıklamasının girilişi	84
Şekil 6.2	Parça detaylarının girilişi	85
Şekil 6.3	Pultrude malzeme özelliklerinin girilişi	86
Şekil 6.4	Parçanın tipinin seçimi	86
Şekil 6.5	Malzemenin tabaka kalınlığı ve fiberlerin açılarının girilişi	87
Şekil 6.6	En küçük sonlu eleman parçasının boyutunun girilişi	87
Şekil 6.7	Parçanın sonlu elemanlara ayrılmış hali	88
Şekil 6.8	Parçanın dik ekseninde yerdeğiştirmesinin sıfırlanarak mesnetlenmesinin gösterilişi	88
Şekil 6.9	Parçanın mesnetlenmiş hali	89
Şekil 6.10	Parçaya uygulanacak kuvvetin seçimi	89
Şekil 6.11	Parçanın destek noktaları belirtilmiş model hali	91
Şekil 6.12	Kuvvetin uygulama biçiminin seçimi	91
Şekil 6.13	Analizi yapılacak parçanın sonuç bölümüne gönderilmesi	91
Şekil 6.14	Parçanın “submit” komutuyla analizinin yapılması	91
Şekil 6.15	“Results” komutuyla sonuçların ekrana gelmesi	91
Şekil 6.16	Parçanın deforme olmuş halinin görüntüsü	92
Şekil 6.16	Parçada oluşan gerilmelerin gösterilişi	92

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Belli başlı plastik malzemelerin mekanik özellikleri 9
Çizelge 2.2	Termoset ve termoplastik malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları..... 10
Çizelge 2.3	Polimer malzemelerin ısııl özellikleri 13
Çizelge 2.4	Cam elyaf tipleri ve özellikleri 17
Çizelge 2.5	Belli başlı takviye malzemelerinin karşılaştırma tablosu..... 21
Çizelge 4.1	Farklı çekme hızı ve fiber hacim oranlarında enjeksiyon basıncı değişimi 47
Çizelge 4.2	Pultrude CTP'lerin diğer malzemelerle karşılaştırma tablosu 54
Çizelge 5.1	Kullanılan E-camının yüzde ağırlıkça içeriği..... 58
Çizelge 5.2	Kullanılan E-camının fiziksel özellikleri 59
Çizelge 5.3	Kullanılan E-camının ısııl özellikleri 59
Çizelge 5.4	Kullanılan E-camının elektriksel özellikleri..... 59
Çizelge 5.5	Kullanılan E-camı ham liflerinin termal dayançları..... 59
Çizelge 5.6	Sıvı haldeki polyeşter reçinenin özellikleri 60
Çizelge 5.7	Sertleştirilmiş polyeşter reçinenin özellikleri..... 60
Çizelge 5.8	Çekme numunesi fiziksel boyutları 62
Çizelge 5.9	Çekme testi sonuçları 63
Çizelge 5.10	Eğme testi sonuçları 66
Çizelge 5.11	Darbe testi sonuçları..... 69
Çizelge 5.12	UV ile yaşlandırma çevrimi 75
Çizelge 5.13	UV ışığına maruz bırakılan numunelerin çekme dayançlarının değişimi 77
Çizelge 5.14	Su absorpsiyonu deneyi sonuçları 80
Çizelge 6.1	Cam polyeşterin özellikleri 85

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda, günümüz teknolojisinin insanların yaşamının birçok bölümünde kullandıkları malzemelerin, konvansiyonel yöntem ve malzemelerden farklı olan, “Pultrüzyon” yöntemi üzerinde durularak, üretim parametrelerinin nihai malzeme özelliklerine ne şekilde etkileri olduğu üzerinde daha çok yoğunlaşarak sonuçlara ulaşılmıştır.

Tez çalışmam esnasında, öncelikle bana her zaman yardımcı olan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL’a, numune tedariki ve pratik teknik bilgilere ulaşmamda yardımcı olan Armaplast Kompozit ve Plastik ile Pultech-FRP firmalarına, teorik bilgilere ulaşmamda bana yardımcı olan Sayın Gülnaz POLA’ya ve ayrıca başta Sayın Süreyya AYDIN olmak üzere tüm Şahinler Metal San. Ve Tic. çalışanlarına ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

PULTRUZYON YÖNTEMİYLE CTP ÜRETİMİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MALZEME NİHAİ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ali Meriç BAHAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Bu tezin amacı, yüksek üretilebilirlik imkanı sağlayan pultruzyonla plastik matrisli kompozit malzeme üretme prosesinin, üretim parametrelerinin optimizasyonunun sağlanmasına yardımcı olmaktır. Günümüzde ilerleyen teknolojinin isteklerine karşılık verebilmek için kullanılan malzemelerin performanslarının üst düzey olması gerekmekte ve bu da kullanılan malzemelerin yüksek mekanik özelliklerine karşın, rahat üretilebilme, ekonomik ve tabi ki düşük ağırlık olmasıyla sağlanabilecektir.

Pultruzyon ile plastik matrisli kompozit malzeme üretimi son yıllarda önemli bir üretim yöntemi olmuş ve bu bahsedilen özelliklere cevap verebilecek nitelikte özelliklere sahiptir. Çünkü pultruzyon yöntemi ile sürekli ve yüksek mekanik özelliklere sahip nihai ürün üretilebilmektedir. Konvansiyonel malzeme tipleri ve üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, pultruzyonla plastik matrisli kompozit malzeme üretimi, hızlı, güvenilir, ağırlığına oranla çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip ürün elde edilmesine fırsat tanımaktadır.

Bu çalışmada da pultruzyon yöntemi detaylı olarak açıklanmış, proses adımları, teçhizat ve donanım, pultrude ürünlerin özellikleri, kullanım alanları gibi bir çok konuya değinilmiştir. Ayrıca deneysel bölümlerde pultruzyon üretim parametrelerinden biri olan farklı çekme hızlarına sahip numuneler test edilerek nihai ürün özellikleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra, atmosfere açık ortamlarda nem ve güneş ışığına maruz kalan kompozit profillerin bu ortamlar altındaki değişiklikleri de deneysel olarak irdelenerek bazı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pultruzyon, plastik matrisli kompozit, çekme hızı, sonlu elemanlar, abaqus.

JÜRİ:

1. Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
2. Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
3. Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN
- 4.

Kabul tarihi: 22.06.2009

Sayfa Sayısı: 99

PRODUCING CTP BY PULTRUSION METHOD AND THE EFFECTS OF PRODUCTION PARAMETERS TO THE FINAL PROPERTIES OF MATERIAL

Ali Meriç BAHAR

Metallurgical and Materials Engineering, M.S. Thesis

This research work is to help to the FRP producers regarding with pultrusion method, by changing some of the production parameters and examine the material's features by simulating the atmospheric conditions to reach to the optimal ones. Depend on the new material demands by the daily developing technology, this brings the necessities to produce the materials with high mechanical properties while you can produce it easily, economically and also with the low weight properties.

In the last decade, production of polymer matrix composites by using pultrusion method comes to a more important production method while it is answering the human desires. Because, pultrusion method gives opportunity to the customers to produce final product, continuously and with high mechanical properties. When we compare the pultrusion method with conventional ones, we can observe that with the pultrusion method we can produce the material at high speed while it is safe and compare to it's weight highly strength.

In this work also, the pultrusion method is to be explained in details, it' process steps, used instruments and hardware, the properties of pultrude products and the usage of them is determined. And on the other hand, at the experimental chapters, the samples with the variant pulling speeds are tested and made the examination of mechanical changes. Again at the same parts, the pultrude parts are examined under ultraviolet light and distilled water to examine them at their normal working conditions like sun and humidities.

Keywords: Pultrusion, plastic matrix composites, pulling speed, finite element, abaqus

JÜRİ:

1. Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
2. Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
3. Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN
- 4.

Kabul tarihi: 22.06.2009

Sayfa Sayısı: 99

1. GİRİŞ

Pultruzyon işlemi, yüksek üretilebilirlik, düşük maliyet ve iyi üretim kalitesi gibi özellikleri sayesinde kompozit sektöründe artış gösteren bir yöntem haline gelmektedir. Pultrude ürünler, hafiflik, korozyon dayanımı ve/veya düşük elektrik iletkenliğinin istendiği ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Pultruzyon ürünlerinin satıldığı pazarlarda ürünlerin şekilsel olarak bazı standartları vardır, bunlar çubuk, köşebent, I-kirişleri, paneller ve plaka şeklinde olabilir. Pultrude ürünlerin diğer kullanım alanı bulduğu yerleri sıralayacak olursak, merdiven korkulukları, olta kamışları, alet sapları, otobüs parçaları vs. verilebilir. Günümüzde artık, S-camı, karbon ve kevlar takviye malzemeleri ve epoksi, fenolik ve termoplastik gibi matris malzemelerini kullanarak pultruzyonla üretim yapılabilmektedir. Bu gibi avantajlar sayesinde pultruzyon yöntemi havacılık, taşımacılık, spor malzemeleri ve tıbbi donanım alanlarında da kullanım alanı bulabilmektedir. (Mazumdar, 2002)

Elyaf fiberler bir seri bobinlerden beslenirken kalıp arasına ulaşmadan önce termoset-reçine banyosundan geçmektedir. Kalıptan çıkan daha sonra sıcaklık ortamına giren ön şekillenmiş elyaf burada sıkıştırma ile son şekline ulaştırılır. Bazı hallerde kalıbın kendisi ısıtıldığından, termoset reçinenin ekzotermik reaksiyonunun da etkisi ile kalıptan geçerken son şekline ulaşmış olmaktadır. Soğutma; hava, cebri konveksiyon veya su ile gerçekleştirilmektedir. Balıkçı çubukları, izolator boruları genellikle bu tür çekme işlemi ile üretilmektedir. Profil çekme yönteminin gelecekte alüminyum ekstrüzyon sistemi ile daha çok rekabet edeceği tahmin edilmektedir.

Pultruzyon yöntemiyle yapılan üretimlerde üretim hızı arttırılırken, yeni ürünler tasarlanırken veya yeni reçine tipleri ve katkı malzemeleri geliştirilirken çekme hızı ana etken haline gelmiştir çünkü çekme hızı üretilebilirlik açısından bakıldığında en dominant faktör olarak gözükmektedir. (Mazumdar, 2002)

Çekme kuvveti kalıp içinde bütün uzunluk boyunca meydana gelen birçok karşı kuvvetlerin toplamına eşittir. Literatüre göre, çekme kuvveti; yönlendirme kuvveti, viskozite (yapışkanlık) kuvveti, sıkıştırma kuvveti ve sürtünme kuvvetlerini içermektedir. Yönlendirme kuvveti; fiber makarasından kalıp girişine gelen direnç kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Bu karşı kuvvet diğerlerine oranla daha küçük bir değere sahiptir, viskozite kuvveti; reçine jelleşmeden önce kalıp duvarında meydana gelen kuvvettir, fiberler ve kalıp duvarı arasında ince bir sıvı tabaka olduğu varsayılarak açıklanabilir. Sıkıştırma kuvveti; kalıp girişinde

konikleşen veya yuvarlaklaşan bölümlerde etkiyen bir kuvvettir, kalıp yüzeyine dik olarak etkimektedir. Sürtünme kuvveti, kompozit malzemenin çekip büzülerek kalıp duvarından uzaklaşmasına kadar etkiyen bir kuvvettir. Farklı bölgelere etkiyen direnç kuvvetinin mekanizmaları farklı farklıdır. (Mazumdar, 2002)

Çekme kuvvetinin etkilerini araştırmak için ilk ciddi çalışmalar 1980 li yılların başında gerçekleştirilmeye başlamıştır. Price ve Cupschalk isimli bilimadamları epoksi prepregler kullanarak çekme kuvvetinin etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçları göstermektedir ki; prepreg kalınlığının kalıp kalınlığına sıkıştırma oranı ile çekme kuvveti eksponansiyel olarak artış göstermektedir. Bu iki bilimadamı ayrıca, epoksi prepregin sıkıştırma oranına bağlı olarak bir amprik formül de bulmuşlardır. Modelleri göstermektedir ki; çekme kuvveti kalıp uzunluğuyla birlikte artmaktadır. Sumerak adlı bilim adamı da pultrüzyon yönteminde çekme kuvvetinin etkisiyle alakalı kapsamlı bir çalışmaya imza atmıştır. (Mazumdar, 2002)

Pultrüzyon yöntemi üretim hızının yüksek olduğu bir plastik matrisli kompozit malzeme üretim yöntemi olmakla birlikte, üretim prosesinin niteliğine bağlı olarak, diğer üretim yöntemleriyle ulaşılamayan yüksek fiber hacim oranlarına ulaşarak optimum dayanlara ulaşabilen sürekli bir üretim yöntemidir. Tezim boyunca, pultrüzyon ve diğer yöntemlerin karşılaştırması yapılarak deneysel bölümlerde teoriğin pratiğe uygulanışı kapsamlı olarak anlatılacaktır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Özellikleri birbirinden farklı en az iki malzemenin aralarında kimyasal bağ oluşturmada bir arayüzey ile oluşturdukları yeni malzeme gruplarını kompozit malzeme olarak tanımlayabiliriz. Kompozit malzemeye “ Çok Bileşenli Malzeme”, “ Çok Fazlı Malzeme”, “ Donatılı Malzeme” ve “Pekiştirilmiş Malzeme” gibi adlar da verilmektedir. Yukarıdaki tanıma göre, kompozit malzemede genelde dört koşul aranmaktadır;

- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı ve belirli arayüzlerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması
- Bileşenlerinin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olması.
- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması.

Yukarıdaki tanımlamalarda yer alan “ malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması” ifadesi, burada fiziksel anlamda bir araya getirilmeyi vurgulamaktadır. Bu tanımlamalara göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. Buna örnek olarak beton malzeme gösterilebilir. Beton, ayrıntılı olarak incelenecek olursa, seçilen her noktası, bileşimi oluşturan malzemelerden hangisine isabet ederse onun özelliğini taşıyacaktır. Ancak malzeme bütün olarak “beton özelliği”ne sahiptir.(Sarıbyık, 2007)

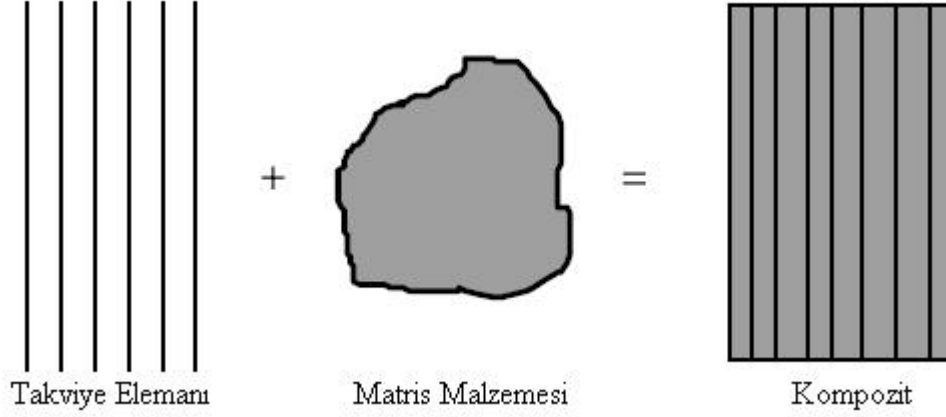
Bu açıdan bakıldığında, ahşap, kemik gibi doğa ürünü bileşik malzemeler; üçüncü boyuta çok küçük olan ve bu nedenle kesit içerisinde özellikleri katkıları hissedilemeyen boya, galvaniz gibi malzeme ve kaplamalar; mikroskobik açıdan yapısal farklılıklar gösterse de metal alaşımları, kompozit malzeme grubunda kabul edilmemektedir. (Sarıbyık, 2007)

Kompozit malzemeler, çok uzun zamandır insan hayatında bulunan fakat 1960’lı yıllardan itibaren polimer bazlı yapılar şeklinde endüstriyel anlamda üreti imkanı bulmuş bir malzeme grubudur. O zamandan sonra da kompozit malzemeler çokça kullanılan bir mühendislik malzemesi olmuş ve otomotiv parçaları, havacılık uygulamaları, spor malzemeleri v.s. gibi birçok alanda kendine kullanım alanı bulmuştur. Kompozit kullanımına olan rağbetin nedenini ürün performansı ve küresel malzeme pazarındaki diğer malzemelere göre sahip olduğu hafiflik gibi özellikleriyle açıklayabilmek mümkündür. Diğer malzemelerin arasında kompozit malzemeler çeliğin ve alüminyumun yerini alabilecek en önemli malzeme olarak görülmektedir ve hatta çelik ve alüminyumdan daha da iyi bir performans bile gösterdiği olmaktadır. Çelik parçaların yerine kompozit parçaların kullanılmasıyla yaklaşık olarak % 60- % 80 oranlarında bir ağırlık azalması, alüminyum parçaların yerine kullanılmasıyla da %20- %50 arasında bir ağırlık azalması sağlayabilmek mümkündür. Günümüzde artık kompozitlerin birçok mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek en uygun malzemesi olduğu söylenebilir. (Sarıbyık, 2007)

2.1 Kompozit Malzeme Tanımı

Kompozit malzemeleri, özellikleri birbirinden farklı en az iki malzemenin aralarında kimyasal bağ oluşturmaksızın bir arayüzey ile oluşturdukları yeni malzeme grupları olarak tanımlamak mümkündür. Farklı tipteki ve özellikteki malzemelerin kombinasyonundan oluşan yeni malzeme grubu da içerdiği malzemelerin iyi ve kötü özelliklerinin kombinasyonunu yansıtacak, bu sayede de bir malzemenin iyi bir özelliğine karşın kötü özellik içermesi diğer bir malzeme tarafından tolere edilerek nihai malzememiz yani kompozit malzememiz üstün

özelliikli olacaktır. Buradaki elastik modülü düşük olan malzeme matris malzemesi olarak yapının tokluğunu arttıran sünek malzeme olacak, bunun yanısıra yüksek elastiklik modüllü takviye elemanları da yapının dayanımını, sertliğini veren bileşen olacaktır.



Şekil 2.1 Kompozit malzeme konseptinin şematik hali

Kompozit malzemelerin konsepti aslında insanlardan önce doğa tarafından bulunmuş diyebiliriz, örneğin bir odunsu yapı alındığında selülozik lifler takviye malzemesi olarak yapı içinde matris malzemesi görevi gören odunsu öz olan ligninle birlikte mükemmel özellik veren bir kompozit malzeme meydana getirdiğini söyleyebiliriz. (<http://kobi.mynet.com/pdf/kompozit.pdf>)

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerden başlıcaları,

- Hafiflik
- Rijitlik
- Güzel görünüm
- Yüksek çekme, eğilme, çarpma, yorulma dayancı,
- Aşınma ve korozyona karşı yüksek direnç
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık
- Elektriksel ve ısıl direnç
- Ses yalıtkanlığı

Ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir. Ayrıca böylelikle dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşürülebilmektedir. Bu amaca yönelik olarak kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hemen hemen tamamı, önceki bölümde de değindiğimiz gibi, ilkel şekilde de olsa başlangıçtan beri kullanılagelen yöntemlerdir. Ancak, hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenleri zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Bir kompozitin yapısı genelde “matris” olarak kabul edilen sürekli bir faz ile, onu içinde dağılı değişik özelliklere sahip donatı fazından meydana gelmektedir. Bu yapı özellikle taneli ve lifli kompozit malzemeler için geçerlidir. Sadece tabakalı kompozitlerde üretim ve malzemenin yapısı farklılık göstermektedir. (<http://kobi.mynet.com/pdf/kompozit.pdf>)

İlk modern sentetik plastiklerin 1900'lerin başında geliştirilmesinin ardından, 1930'ların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay biçim verilebilir olması, metallere oranla düşük yoğunlukta olması, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanımı plastiğin yükselmesindeki en önemli özelliklerdir. Bir çok üstün özelliğinin yanı sıra sertlik ve dayanıklılık özelliklerin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar. Ayrıca kompozit malzemeler dayanıklılık ve sertlik yönünden metallerle yarışabilecek olmasının yanında çok da hafiftirler. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeyken gösterdikleri değerlerin çok üstünde değerler alabilirler. Elyafların bu özellikleri çapları 2-25 mm kadar olabilen küçük çaplı elyaflarda daha belirgin olarak görülebilir. Yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyafların üretimleri ile gerçekleşmiştir. (Bechtold, 2002)

Günümüzde mekanik organik veya seramik esaslı elyaflardan yapılan kompozitler düşük performanslı ev eşyaları ve spor malzemelerinden yüksek performanslı roket motorları ve uçak kanatlarına kadar değişen çeşitli uygulamalara sahiptirler. Elyaflar yapı içerisinde bir uçtan diğer uca kadar uzanan sürekli elyaflar, uzun elyafların çeşitli boyutlarda kesilmesi ile elde edilen sürekli olmayan elyaflar, çeşitli dokulama ve örgüler şeklinde kullanılmaya elverişlidirler. (Bechtold, 2002)

Elyaf matris kompozitlerin yanı sıra elyaf-elyaf kombinasyonundan oluşan kompozitler de endüstride kullanılmaktadır. Buna örnek olarak ağır metallerin taşınımı için kullanılmakta olan konveyör kayışları gösterilebilir. Elyaf-matris kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler elyafın şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf-matris arayüzeyleridir. (Bechtold, 2002)

Günümüzde kullanılan sürekli ve sürekli olmaya elyaflar genellikle dairesel kesitlidirler. Ancak, dikdörtgen, hekzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli elyaflar da kullanılabilir. Dikdörtgen kesitli elyaflarda birim hacimde kullanılmış olan elyaf oranı yüksek tutulabilmektedir. Hekzagonal şekilde elyafların mukavemeti oldukça yüksek olmasına rağmen üretimde zorluklarla karşılaşmaktadır. (Bechtold, 2002)

Elyaflara uzunlukları açısından yaklaşıldığında mekanik özelliklerin yanı sıra kompozit üretiminde işlem seçimini de etkilediği görülmektedir. Sürekli elyaflarla çalışmanın kolaylık avantajı bulunsa da tasarım açısından sürekli olmayan elyaflara göre çok daha sınırlı seçenekler sunmaktadır. Sürekli elyafların en genel uygulamalarından biri filaman sarma uygulamasıdır.

Elyaf yönlenmesi kompozit özelliklerini etkileyen faktörler arasında büyük öneme sahip olan faktörlerden biridir. Kompozit malzemenin mukavemet ve rijitliğinin alabileceği en büyük ve en küçük değerle ara değerler pekiştiricilerin yönlenmesine bağlıdır. Elyaflarda bir, iki ya da üç boyutlu yönlendirme yapılması mümkündür. Bir boyutlu yönlendirme sonucunda kompozitin dayanımı mukavemeti elyaf eksen yönünde maksimum değere ulaşır. İki boyutlu pekiştirmede mukavemet her yönde farklı bir değerdedir. Üç boyutlu durumda ise kompozit malzeme büyük ölçüde izotropik özellik gösterir. Herhangi bir yöndeki mekanik özellikler bu yönde kullanılan elyafların hacim yüzdesi ile orantı vermektedir. (Fink, Bank, 2006)

Elyaf kompozitlerin mekaniksel özelliklerini etkileyen faktörlerden biri de arayüzey bağlıdır. Kompozit malzemeye dışarıdan uygulanan gerilmeler arayüzeydeki kayma gerilmeleri vasıtasıyla matristen elyaflara iletilir. Bu bağların zayıf olması durumunda yükleme koşullarında elyaflar matristen ayrılır ve gerilim büyük ölçüde düşük mukavemetli olan matrise etkir. Matrisle elyaflar arasındaki fiziksel ya da kimyasal uygunluğun mevcut olmaması veya uygun şekil vermek tekniğinin seçilmemesi durumunda arayüzey özellikleri zayıflar. Bu nedenle kompozit malzeme tasarımlarında elyafların uygun bir malzeme ile kaplanması işlemi öngörülmektedir. Bu sayede arayüzey arabileşiklerinin oluşumu

engellenebilmektedir. Cam elyaf takviyeli elyaflarda elyaflar üzerine uygulanan kaplamalar, bor elyafları ile pekiştirilmiş alüminyum kompozitlerde bor elyafların SİC ile kaplanması bu tür uygulamalara örnek olarak gösterilebilir. (Fink ve Bank, 2006)

Elyaf kompozitlerde matris malzemesinin esas fonksiyonları elyafları bir arada tutmak, yüzeylerini korumak, kompozit malzemenin şekillendirilmesini sağlamak ve en önemlisi gerilmeleri yüksek mukavemet değerlerine sahip elyaflara iletmektedir. Elyaf kompozitler bileşenlerin organik ya da inorganik esaslı olmasına göre gruplandırılabilirler.

- Organik elyaf-organik matris (grafit epoksi)
- İnorganik elyaf-organik matris (camelyaf-polyester,epoksi,PVC)
- İnorganik elyaf-inorganik matris (Si, Al_2O_3)
- Organik elyaf-inorganik matris (grafit-seramik, cam seramik)

Matris malzeme içinde yeralan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modülü ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Elyafların ince çaplı üretilmeleri ile büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Üstün mikroyapısal özellikleri, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri, boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması ve elastik modülünün çok yüksek olması elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleridir. Sürekli elyaf tabakalı kompozitler, diğer kompozit tiplerine göre uçak yapılarında daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri, elyaf takviyelerinin yönlenmelerine göre değişken bir dağılım gösterir. Elyaf doğrultusunda çok yüksek bir mukavemet değerine sahipken, elyaflara dik doğrultuda çok az veya hiç mukavemet göstermezler. Uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmiş olan ileri kompozit malzemelerde elyaf oranı %70 değerine ulaşmaktadır. Bu yapıları oluşturmak için yarı-mamül (prepreg) tabakalar kullanılmaktadır. Elyafli kompozit yapısı ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf

yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Mukavemette önemli olan bir diğer unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise, elyaf ile temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı olumsuz yönde etkilemektedir. (Fink ve Bank, 2006)

Elyaf takviyeli malzemeler matris içerisine gömülü sürekli elyaflardan oluşmuşlardır. Bu tür malzemelerin havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlamasının esas nedeni önemli ölçüde ağırlık tasarrufuna imkan vermesidir. Bugünkü bilinen elyaf takviyeli malzemelerin kullanımı ile sağlanabilen ortalama ağırlık tasarrufu %225 dolaylarındadır. Bunun yanı sıra elyaf takviyeli malzemeleri havacılık endüstrisinin alüminyum alaşımları gibi klasik malzemelerine kıyasla üstün dayanım/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranları sağlamaktadırlar.

Havacılık endüstrisinde başlıca cam, bor, karbon, aramid elyaflar ile epoksi ile reçinenin birleştirilmesinden oluşturulan cam/epoksi, bor/epoksi, karbon/epoksi, aramid/epoksi malzemeler kullanılmaktadır. Elyafları bir arada tutacak, yükü elyaflara iletecek ve elyafları çevre etkisinden koruyacak ideal bir matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir sıvı durumundayken daha sonra kolayca dayanıklı katı bir yapı oluşturabilmeli ve takviye

2.2 Takviye Malzemesi ve Matris Malzemeleri

Yukarıda da bahsedildiği gibi farklı özellikler içermesi gereken matris malzemesi ve takviye elemanlarının nihai kompozit yapısında meydana getirmesi beklenen farklı özellikleri de vardır şimdi bu yapıların kompozit malzemeye yaptığı etkilerin neler olduğunu incelersek.

2.2.1. Takviye Malzemelerinin Rolü

Takviye malzemelerinin kompozit yapıdaki rollerini şu şekilde sıralayabiliriz;

- Yükün büyük bir bölümünün taşınması fiberler tarafından sağlanır, genelde bu oran yükün %70-90'ı arasında değişir.
- Yapıya sertlik (stiffness), dayanım, ısıl kararlılık ve diğer yapısal özelliklerin kazandırılması,
- Kullanılan fiber tipine bağlı olarak elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlığın sağlanması.

2.2.2. Matris Malzemelerinin Rolü

Takviye malzemelerinin sıralanan bu özelliklerine karşın matris malzemelerinin nihai yapı üzerindeki rollerini de şu şekilde sıralayabiliriz;

- Fiber malzemelerini birarada tutarak yükün fiberlere taşınmasını sağlar, ayrıca yapıya rijitlik ve şekil verir,
- Matris fiberleri sararak fiberlerin ayrı ayrı davranmasına imkan sağlar bu sayede de çatlak ilerlemesi durdurulur veya yavaşlatılır,
- Yüzey kalitesini artırır,
- Matris malzemesi, takviye malzemesinin korozyona uğramasını engeller ve mekanik hasara dayanımını artırır
- Seçilen matris malzemesinin tipine göre, üretilen kompozit malzemenin sünekliliği, darbe dayanımı v.b. özellikleri etkilenir. Sünek bir matris malzemesi yapının tokluğunu arttıracaktır. Yüksek tokluk değerleri için, termoplastik-bazlı kompozitler seçilebilir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri matris malzemelerine göre sınıflandıracak olursak;

- Metal matrisli kompozit malzemeler,
- Plastik matrisli kompozit malzemeler,
- Seramik matrisli kompozit malzemeler

şeklinde sıralayabiliriz. Bu çalışmada plastik matrisli kompozit malzemelerin bir üretim yöntemini açıklayacağımız için şimdi plastik matrisli kompozitlerden biraz bahsedelim.

2.4. Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler

İsminden de anlaşılacağı gibi matris malzemesinin polimer yapılı olan kompozitler plastik matrisli kompozitler adını almaktadır. (<http://kobi.mynet.com/pdf/kompozit.pdf>)

Plastik matris olarak termoset veya termoplastik malzeme kullanılır. Genel olarak plastik malzemeler, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik, iyi korozyon dayanıklılığı, düşük ısı ve elektrik iletkenliği ve iyi yüzey kalitesine sahiptir. Plastik matris malzemeleri çoğunlukla polyster, epoksi, fenolik, polimit gibi malzemelerdir.

Çizelge 2.1 Belli başlı plastik malzemelerin mekanik özellikleri (www.camelyaf.com)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
ABS	1.02-1.06	30-60	15-35	15-30

Epoksi reçine	1.11-1.40	30-70	2.2-40	1-10
Naylon 66	1.13-1.15	65-86	2.0-2.8	60-300
Polietilen	9.14-9.60	8-35	0.2-1.4	100-1200
PVC	1.30-1.50	30-70	1.0-3.5	10-300
PTFE	2.10-2.20	20-35	0.3-0.6	350-550
SAN	1.06-1.08	65-85	3.2-3.6	2-5

Kullanılan termoplastik ve termoset plastikleri maksimum çalışma sıcaklıklarıyla birlikte gösterecek olursak;

Çizelge 2.2 Termoset ve termoplastik malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları
(www.camelyaf.com)

Malzeme Tipi	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)
Termosetler	
Vinilester	60-150
Polyester	60-150
Fenolik	70-150
Epoksi	80-215
Termoplastikler	
Polietilen	50-80
Polipropilen	50-75
Polyester	70-120
Asetal	70-95

2.4.1 CTP’de En Çok Kullanılan Plastik Matrisler ve Genel Özellikleri

Fiber takviyeli kompozitlerde en çok kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Bu malzemeye günlük dilde “plastikler” de denmektedir. Bu sektörde, örneğin cam lifli takviyeli polimer matrisli malzemelerin “cam takviyeli plastikler”, kısaca CTP diye adlandırılmaktadır.

Malzeme olarak polimerler içyapılarına göre, termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadırlar. Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak her iki gruba giren malzeme de kullanılmaktadır.

Termoplastikler, düz veya dallı zincirlerden yapılmış maddelerdir. Zayıf bir yapıya sahip olup, (ikinci dereceden) Van der Waals bağlarıyla bağlanarak oluşmuşlardır. Yanal bağların zayıflığı nedeniyle bu gruba giren malzemeler yükselen sıcaklık karşısında yumuşamaktadır. Sıcaklık azalınca malzemede yeniden sertleşme görülür. Sıcaklık etkisine bağlı bu yumuşama, sertleşme özelliği, malzemenin yapısının buharlaşmayla bozulmadığı sürece devam etmektedir. (Chen ve Wang, 1998)

Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahip oldukları için, matris malzemesi olarak kullanıldıklarında, uygulamada matrisle lif fazı arasındaki bağların kurulması termoset malzeme grubuna göre daha zor olmaktadır. Ayrıca, termoplastiklerin yükselen sıcaklık karşısında yumuşaması nedeniyle, bu malzemenin kullanım sıcaklığı seviyesi de düşüktür. Akrilikler, fluorokarbon esaslı plastikler, poliamidler ve PVC gibi vinil esaslı plastikler gruba girmektedir. (Chen ve Wang, 1998)

Termosetler, monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlar sonucunda yanıl bağlarla birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelen malzemelerdir. Kovalan bağlarla, üç boyutlu olarak bağlanmış oldukları için oldukça rijit bir yapıya sahiptirler. Üretimleri sırasında gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonu geriye dönüşlü olmadığından termoset grubundaki maddelerin tekrar ısıtılarak yumuşatılmaları ve şekillendirilmeleri mümkün değildir. Fenolik reçineler, polyester, silikn, alkid ve epoksi reçineler gibi malzeme bu gruba girmektedir.

Polyester reçineler, cam takviyeli plastiklerin üretiminde en çok kullanılan matris malzemelerindendir. Bunlar, doymuş polyesterler ve doymamış polyesterler olarak iki grupta toplanırlar. Doymuş polyester reçineler, termoplastik özellikler gösteren, enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan malzemelerdir. Doymamış polyesterler ise, uygun bir katalizör aracılığıyla yapı oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam takviyeli plastik malzeme üretiminde en çok bu malzeme kullanılmaktadır. Bu malzeme, mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri, kullanım amacına göre tasarım kolaylığı, boya ve benzeri katkı maddelerini kabul edişi gibi nedenlerle, olanakları geniş ve ekonomik bir malzeme niteliği taşımaktadır. Cam takviyeli plastik malzeme üretiminde “polyester reçine” terimi genellikle “doymamış polyester reçine” anlamında kullanılmaktadır. Polyester matrisli, değişik cam elyafıyla takviye edilmiş kompozitlerin özellikleri ve bunların çelikle ve alüminyumla karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Plastik matrisli kompozit malzeme üretiminde çok geniş bir matris malzemesi seçeneği kullanımı söz konusudur. Bunları önem sırası şeklinde sırayla tanımlayacak olursak;

Polyester; Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan izoftalik polyester. Polyester reçineler polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar. Türkiye’de Cam Elyaf A.Ş.’ nin yanı sıra Boytek Reçine, Boya ve Kimya Sanayi Ticaret A.Ş. gibi firmalar da genel amaçlı kullanımlar için polyester üretmektedir. Reçinelerin avantajları; kolay kullanım ve çok düşük maliyetli olmasıdır (0.5 – 1 \$/kg), dezavantajları ise;sertleşme sırasında yüksek oranda çekme, zehirli sitiren gazı yayma, orta mekanik özellikler ve kısa raf ömrüdür.

Epoksiler; havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanları gibi geniş kullanım alanına sahiptirler. Avantajları iyi mekanik özellikler, suya dayanım, ıslakken 140°C, kuruyken 220°C ‘ye kadar ısı dayanımı ve sertleşme sırasında düşük oranda çekme; dezavantajları ise yüksek maliyet(5 – 25 \$/ kg) cilde aşırı zararlı ve doğru karışımın hayati bir önemi olmasıdır.

Vinil ester; Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanıma sahip ve polyesterden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına karşın aşırı sitiren içermesi, polyesterden daha pahalı olması(4-7\$/kg),iyi özellikler için ikincil kür işlemlerine ihtiyaç duyulması ve sertleşme sırasında yüksek oranda çekmesi gibi olumsuz özellikleri de vardır.

Bismaleimid (BMI); Uçak motorlarında ve yüksek ısıya maruz kalan parçalarda kullanılır.Son derece yüksek ısı dayanımının yanı sıra (yaşken 230°C, kuru halde 250°C) çok yüksek maliyeti vardır(80 \$/kg).

Fenolikler; Ateşe dayanım ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Kür işleminin buharlaşma özelliği hava boşlukların oluşmasına ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olur. Uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve demiryollarında kullanılır.Avantajları; Yüksek ateş dayanımı, düşük maliyet (4 – 8 \$/kg); dezavantajları ise yaş halde son derece zararlı olması oldukça kırılğan ve düşük yüzey kalitesine sahip olmasıdır.

Silikon; yüksek ateş dayanımı, yüksek ısılarda ürün özelliklerini koruyabilme ve düşük maliyete sahiptir (30 \$/kg’ dan az). Fakat kür işlemi için yüksek ısı gereklidir.

Cynate Ester; Esas olarak uçak endüstrisinde kullanılır. Mükemmel yalıtkanlık özelliğine sahiptir. Yaş durumda 200°C' ye kadar dayanımı vardır.

Çizelge 2.3 Polimer malzemelerin ısı özellikleri

Malzeme	Erime Sıcaklık Aralığı(°C)
PP	160-190
PA	220-270
PES- Poli Eter Sülfon	-
PEI-Polietirimid	-
PAI-Poliamid İmide	-
PPS-Polfenilen Sulfit	290-340
PEEK- Polietir Eter Keton	350-390

Epoksi reçineler, laminat ve döküm uygulamalarında kullanılmaktadır. Uygulamaların birçoğunda, reçine ile sertleştirici maddenin kullanılması, hemen kullanılabilir, uygun ürünü elde edebilmek için yeterli olabilmektedir. Epoksi reçinelerin polyester malzemeye göre sağladığı önemli bir avantaj, sertleşme sırasında %1-2 oranında görülen düşük düzeydeki çekme özelliğidir. Bu hacim kaybı dolgu maddeleri aracılığıyla uygulama açısından ihmal edilebilecek düzeye, sıfır mertebesine çekilebilmektedir.

Laminat uygulamaları ve hazır kalıplama bileşenleri için matris malzemesi olarak polyester ve epoksi reçinelerden başka reçineler de kullanılmaktadır. Bunlar, vinil ester reçineleri, furan reçineleri, polyester ve epoksi reçineleri tamamlayıcı özellikler taşımaktadır. Bunlar, cam takviyeli plastiklerin kullanım aralığını genişletirler. Diğer reçineler ise, presle kaplanan kompozitlerin kullanım aralığını genişletmektedir.

2.4.2 Termoset Kompozit Prosesinin Avantajları

En çok kullanılan termoset reçineler; epoksi, polyester ve vinylesterlerdir. Bu malzemeler tek-parçalı veya çift-parçalı sistemler halinde olabilirler ve oda sıcaklığında genellikle sıvı haldedirler. Bu reçine sistemleri belirli sıcaklıklarda veya bazen de oda sıcaklığında kürlenerek son şekillerini alırlar. Termoset kompozitler ile üretimin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Termoset kompozitlerin prosesi çok daha kolaydır çünkü başlangıç reçine sistemi sıvı haldedir

- Fiberlerin termosetler tarafından ısıtılması kolaydır, bu sayede boşluklar ve gözenekler daha az bulunabilir.
 - Isı ve basınç kullanımına az ihtiyaç duyduğundan enerjiden kazanç sağlanmaktadır.
 - Basit ve ucuz bir takım sayesinde termoset kompozit üretilmektedir.
- (Giordano ve Nicolais, 1997)

2.4.3 Termoset Kompozit Proseslerinin Dezavantajları

- Termoset kompozitlerin kürleme süreleri uzun sürer ve bu yüzden termoplastik kompozitlere göre daha yavaş üretim gerçekleşmesine neden olur
- Bir kere kürlenerek katılaştırılabilir, termoset parçaları tekrar bir forma sokup yeni bir şekil verilemez
- Termoset kompozitlerin tekrar kullanımı çok zordur

2.4.4 Termoplastik Kompozit Proseslerinin Avantajları

Termoplastik kompozitlerin ilk baştaki hammaddeleri katı haldedir ve son şeklini alması için eritilmesi gerekmektedir. Termoplastik kompozitlerin üretimlerinin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Proses çevrim zamanı çok kısadır çünkü işlem süresince herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmez ve bu sayede yüksek-hacimli kompozit üretim tekniklerinde rahatça kullanılabilir. Örneğin, kalıp enjeksiyon yöntemi için proses çevrim süresi 1 dakikadan daha az bir süredir ve bu sayede de yüksek üretim hızlarının istendiği örneğin otomotiv-parçaları üreten yerler için çok uygundur.
- Termoplastik kompozitler tekrar şekil alabilirler ve uygulanan ısı ve basınç ile tekrar üretilirler.
- Termoplastik kompozitlerin geri kazanımı çok kolaydır.

2.4.5 Termoplastik Kompozit Proseslerinin Dezavantajları

Termoplastik kompozitlerin dezavantajlarını sıralayacak olursak;

- Termoplastik kompozitlerin üretimi için çok ağır ve güçlü takım malzemeleri gerekmektedir. Bu da yüksek maliyetli takım malzemesini gerektirmesi demektir. Örneğin bir kalıp enjeksiyon metodu için takım maliyeti 5000 \$ iken elyaf sarma yönteminde kullanılan mandrel maliyeti 500 \$ dır.

- Termoplastik kompozitlerin üretim prosesleri çok kolay değildir ve bazen ısı ve basıncı uygulayabilmek için karmaşık aletlere ihtiyaç duyarlar.

2.4.6 Polimer Kompozitlerde En Çok Kullanılan Takviye Malzemeleri ve Genel Özellikleri

Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde değişik kaynaklardan elde edilen farklı özelliklere sahip lifler kullanılmaktadır. Ayrıca, kullanılan lifler değişik boylarda ve biçimde olabilmektedir. Konuyla ilgili yayınlarda liflerle ilgili kesin bir tanım yer almamaktadır. Genellikle yapılan tanımlarda lif malzemenin çapı ve boy/çap oranı belirleyici bir kriter olarak kabul edilmektedir ve bu değer lif narin oranı diye de adlandırılmaktadır. Ancak yine de lifin belirli bir boyuttan ince olması gerektiğinden, lif çapı da sınırlayıcı bir değerdir.

İlgili Amerikan Standardı (ASTM) uyarınca, bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/ortalama çap oranının en az 10 ($l/d \geq 10$) olması, lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm^2 'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir.

Günümüzde kompozitlerin takviye edilmesinde boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı lifler kullanılmaktadır. Örneğin, cam lifleri gibi lifler üretim sırasında demetler halinde hazırlanmaktadır.

Kompozitlerin takviye edilmesinde kullanılan lifler, E-modülü değerleri, kullanılan matris malzemesinin E-modülü ile kıyaslanarak, matrsten daha düşük ve daha yüksek E-Modülü değerine sahip lifler olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Ancak, kompozitin özellikleri için de önemli olan bu ayrım, sabit matris özelliği için, diğer bir deyişle aynı matris malzemesi için anlam taşımaktadır.

Plastik matrisli kompozitlerin üretimi esnasında kullanılan takviye malzemelerini sırasıyla verecek olursak;

- Cam elyafı
- Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
- Bor elyafı
- Oksit elyafı
- Yüksek yoğunluklu polietilen elyafı

- Poliamid elyafı
- Polyester elyafı
- Doğal organik elyaflar

Şimdi de bu takviye malzemelerinden en çok tercih edilenleri sırasıyla açıklayalım.

2.4.6.1 Cam Elyafı

Cam lifleri veya diğer bir deyişle cam elyafı, fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan takviye malzemelerindendir. Üstün özelliklerinin yanı sıra ekonomik bir takviye türü olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir.

Cam liflerinin ticari anlamda üretimine 1930'lu yıllarda İngiltere'de başlanmış olmasına karşılık bu malzeme plastik malzemenin takviye edilmesine 1950'lerin başından itibaren başlanmıştır. Cam liflerinin çimento kompozitlerinin takviye edilmesinde kullanımıyla ilgili ilk önemli çalışmaları Sovyetler Birliği'nde Biryukovich ve arkadaşlarının 1960'lı yılların başlarında yaptıkları araştırma ve uygulamalar ile 1964 yılında yayımladıkları bir kitap oluşturmaktadır. (Fink ve Bank, 2006)

Başlangıçta, cam liflerinin üretiminde A-camı veya açık adıyla "alkali cam" kullanılmıştır. Bunu çok az alkali içeren ve çok üstün elektriksel ve mekanik özelliklere sahip bir borsilikat camı olan "elektrik dayanımlı camın kısa adı E-camının kullanılmaya başlaması izlemiştir. E-camı, uygulamada en çok kullanılan takviye malzemelerinden biridir. Anca bu malzeme beton ve harçlardaki alkali ortamdan etkilenmekte ve zamanla tahrip olmaktadır.

Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve kullanılanıdır. Cam elyafı özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Özellikle cam elyafı ile matris arası yapışma gücünü arttıran "silan" bazlı ve elyaf üzerinde ince film oluşturan kimyasalların sonra kullanım sahaları artmıştır. (Fink ve Bank, 2006)

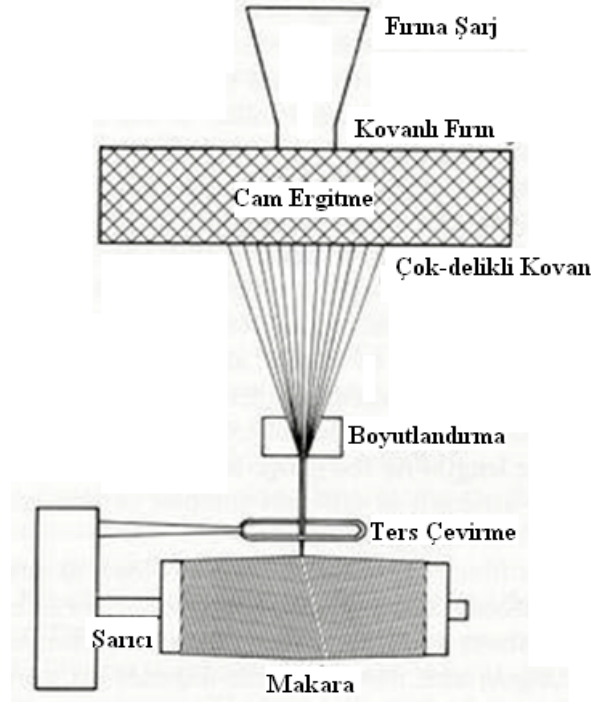
Elyaf lar işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam elyafı halen aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir.

İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilabilmektedir. Çizelge 2.3'te cam elyafların tipleri ve onlara ait özellikler verilmektedir. (Fink ve Bank, 2006)

Çizelge 2.4 Cam elyaf tipleri ve özellikleri (www.camelyaf.com.)

Cam Elyaf Tipi	Açıklama
A Camı	Pencerelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.
C Camı	Yüksek kimyasal direnç gösterir. depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.
E Camı	Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir. Türkiye'de Şişecam Grubuna bağlı olan Cam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından E camı elyafı üretilmektedir. Hem yurtiçine, hem yurt içine satış yapan firmadan doğrudan veya bayileri aracılığıyla ürün satın almak mümkündür. 1976'dan beri faaliyet gösteren firma Avrupa'nın önemli elyaf üreticilerinden biridir.
S + R Camı	Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam'ın yarisi kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlalaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir.

Cam elyafının kullanım amacına bağlı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımın artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 Cam elyafının üretim aşamalarının şematik olarak gösterilişi (www.camelyaf.com)

Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

2.4.6.2 Karbon Elyafı

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3-5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtır. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır. (Fink ve Bank, 2006)

Karbon elyafları piyasada 2 biçimde bulunmaktadır, bunlar;

Sürekli elyaflar; dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda, ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler. (Fink ve Bank, 2006)

Kırpılmış elyaf; Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemeden elde edilir; bunar zift ve PAN (Poliakrilonitril)'dir. Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon elyafları kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir.

PAN'ın karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir;

- Oksidasyon: Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300 derecede ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H'nin ayrılmasını daha uçucu olan O 'nin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek graphite teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.
- Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.
- Yüzey iyileştirmesi karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.
- Kaplama; Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir arayüz görevi görür.

Karbon elyafının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modülüs özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir. (Bechtold, Wiedmer ve Friedrich, 2002)

2.4.6.3 Aramid Elyafı

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (AkzoNobel) olarak

bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid elyafı üretilmektedir. (Ford, 1997)

Geçen yirmi yıl boyunca, yüksek teknoloji ürünleri olarak bilinen aramid elyafı önemli bir mesafe katetmiş olup uzay, denizcilik, spor ürünleri, eğlence, otomotiv ve silah endüstrisi gibi klasik kompozit pazarlarına hitap etmiştir. Yüksek düzeyde yönlendirilmiş olan bu polimer, düşük yoğunluk ile yüksek modül ve yüksek düzeyde yapışma özelliği ile yüksek mukavemet/ağırlık oranını üründe bir araya getirmektedir. Mukavemet ve modül değerleri yanısıra, liflerin kolaylıkla ıslatılabilmesi ve üründe darbe dayanımı özellikleri dolayısıyla yaygın olarak kullanılan reçinelerin çoğunluğu ile kullanılabilir. Aramid elyafının negatif ısıl genleşme katsayısından dolayı, ısıl yayılmanın önem taşıdığı ortamlarda fayda sağlamaktadır. Aramid elyafı, fiyat/performans değerlerini sağlamak üzere tasarlanmış cam ve karbon elyafının kombinasyonu şeklinde olan hibrid ürünler halinde de mevcuttur. Yalnızca yapısından kaynaklanan sınırlamalar kompozit tasarımında dikkate alınmalıdır. Aramid ürünleri iplik, fitil, kırılmış elyaf şeklinde mevcuttur. Aramid elyafı iplik olarak farklı desenlerde dokunmuş kumaş şeklinde, fitil olarak da elyaf sarma veya şerit şeklinde kullanılmaktadır. Kırılmış lifler ise hazır kalıplama bileşimlerinin içine karıştırılmaktadır. Önemli özellikleri sıralayacak olursak; (Ford, 1997)

- Yüksek dayanıklılık
- Yüksek darbe dayanımı
- Yüksek asınma dayanımı
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek kimyasal dayanımı
- Kevlar elyafı kompozitler Cam elyafı kompozitlere göre 35% daha hafiftir
- E Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığı
- Genellikle rengi sarıdır
- Düşük yoğunluktur, verilebilir.

Dezavantajlar ise şöyle sıralanabilir;

- Bazı tür aramid elyafı ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.
- Elyaflar çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reçinede mikroskopik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır.

Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafının bazı kullanım alanlarını verecek olursak;

- Balistik koruma uygulamaları (Askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler)
- Koruyucu giysiler (Eldiven, motorsiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları)
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği
- Hava araçları gövde parçaları
- Tekne gövdesi
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum
- Fiberoptik ve elektromekanik kablolar
- Debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarında
- Yüksek ısı ve basınçlarda kullanılan conta, salmastra vb.

En çok bilinen ve kullanılan aramid elyafı Dupont firmasının tescilli ismi olan Kevlar'dır. Kevlar 29, and Kevlar 49 olarak iki çeşidi bulunmaktadır. Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliğine sahiptir ve bu nedenle çoğunlukla kurşun geçirmez yelek gibi uygulamalarda kullanılırlar. (Saha, 2005)

Kompozitlerin üretiminde kullanılan belli başlı takviye malzemelerinin özelliklerini verdikten sonra, bu takviye malzemelerinin mekaniksel özellik olarak karşılaştırmasını Çizelge 2.5'te görebiliriz.

Çizelge 2.5 Belli başlı takviye malzemelerinin karşılaştırma tablosu

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (Gpa)
E-Camı	2,55	2000	80
S-Camı	2,49	4750	89
Alüminyum	3,28	1950	297
Karbon	2,00	2900	525
Kevlar 29	1,44	2860	64
Kevlar 49	1,44	3750	136

2.4.7 Takviye Elemanlarının Kritik Özellikleri

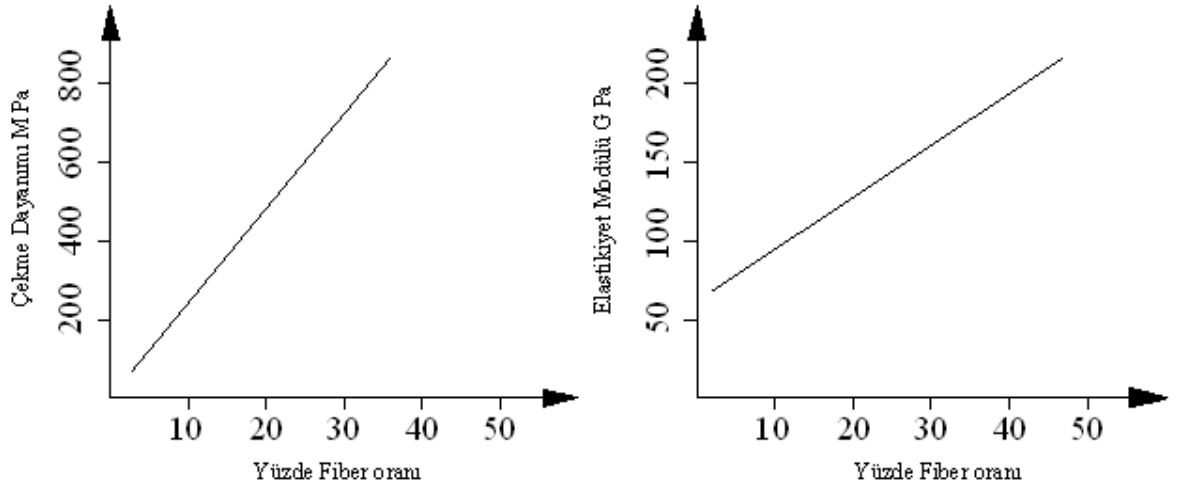
Fiber takviyeli bir kompozit tasarlandığı zaman pek çok faktör dikkate alınmalıdır. Bunlardan en önemlilerini açıklamalarıyla birlikte vermeye çalışalım.

2.4.7.1 Boyun Çapa Oranı

En iyi özellikleri veren sürekli fiberlerin üretimleri zordur. Buna karşın boyun çapa oranı büyük olan matrise katılmış numuneler, halen yüksek bükülmezlik ve dayanım sağlarlar.

2.4.7.2 Fiberlerin Kısmi Hacim Oranı

Daha yüksek takviye kısmi hacim oranı kompozitin dayanımını ve bükülmezliğini arttırmaktadır. Buna karşın fiberlerin matris tarafından sarılmadığı üst limit oluşmaktadır.



Şekil 1- Boron kaplanmış silisyum karbür fiber takviyeli alüminyumun fiber eksenine paralel özellikleri üzerinde fiber kısmi hacim oranının etkisi

2.4.7.3 Fiberlerin Yönlenmesi

Tek yönlü dizilmiş fiber takviyeli malzemeye uygulanan yük fiberlere paralel ise optimum bükülmezlik ve mukavemet elde edilebilir. Ancak tek yönlü olarak dizilmiş fiberler oldukça anizotropik davranış gösterebilir. Bunun yerine fiberler enine ve boyuna veya açılı olarak dizilirse maksimum dayanımdan ödün verilir ancak kompozitte daha uniform özellikler kazanılır.

2.4.7.4 Fiberin Özellikleri

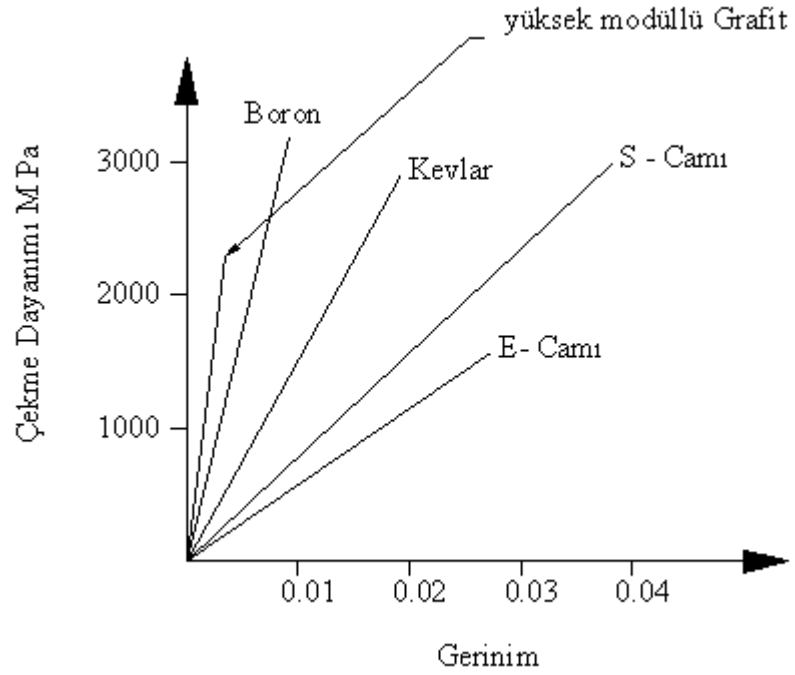
Fiber malzeme güçlü, bükülmez, hafif ve yüksek/bir ergime sıcaklığına sahip olmalıdır. Özgül dayanım ve özgül modül aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\text{Özgül dayanım} = \sigma/p \quad (2.1)$$

$$\text{Özgül modül} = E/p \quad (2.2)$$

Burada σ akma dayanımı, ρ yoğunluk ve E elastikiyet modülüdür. Yüksek özgül dayanım ve özgül modüllü malzemelerde fiber kullanımı tercih edilmektedir. En yüksek özgül modül, genellikle karbon ve boran gibi düşük atom numarası ve kovalent bağa sahip malzemelerde bulunmaktadır. Bu iki element aynı zamanda yüksek dayanım ve ergime sıcaklığına sahiptir. Bunlar bir kompozit malzeme de kullanılmalı ancak çok gevrek ve reaktif oldukları için tek başına hizmete sunulmaz.

Ticari ismi aromatik polyamid polimerler olan, benzen halkaları içeren bir omurga ile mukavemetlendirilen kevlar, düşük ergime sıcaklığına sahip olmakla beraber mekanik özellikleri mükemmeldir. Alümina, ve camda çok hafiftir ve yüksek dayanım ve özgül modüle sahiptir. Berilyum ve tungsten metalik bağlı olmakla beraber, yüksek modüle sahip olmaları bunları belirli uygulamalar için ilgi çekici konuma getirmektedir.



Şekil 2.4 Fiber malzemelerinin gerilim-gerinim eğrisi

3. PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Plastik matrisli kompozit parça üretiminde 4 ana basamak vardır;

- a. Islatma/emdirme
- b. Yatırma
- c. Birleştirme
- d. Katılaştırma

Bütün kompozit üretim teknikleri bu yukarıda saydığımız basamakları içermektedir, fakat farklı şekilde üretim yolları vardır. (Liang ve Garga, 2005)

3.1 Islatma/Emdirme

Bu basamakta takviye malzemeleri ve matris malzemesi reçineler birlikte karıştırılarak bir lamine yapısı elde edilir. Örneğin elyaf sarma yönteminde fiberler reçine içinden geçirilerek ıslatma/emdirme sağlanır. Yatırma yönteminde, malzeme tedarikçilerinin kontrollü ortamda ıslattıkları prepregler kullanılmaktadır. Islak yatırma yönteminde, her bir ürün katmanı bir rulo ile ıslatılarak sağlıklı bir ıslatma sağlanmaktadır. Bu basamağın uygulanmasının amacı reçinenin bütün fiberlere ulaşmasını sağlamaktır. Viskozite, yüzey gerilimi ve kılcıl damar hareketi, ıslatma prosesini etkileyen en önemli parametrelerdir. (Liang ve Garga, 2005)

3.2 Yatırma

Bu basamakta, kompozit laminelerinin fiber-reçine karışımlarının veya prepreglerin istenen açılarda ve şekilde düzenlenmesi ile şekillendirilmesi gerçekleştirilir. İstenen kompozit kalınlığı farklı kalınlıktaki fiber-reçine karışımlarının inşa edilmesi ile belirlenir. Elyaf sarma yönteminde, istenen fiber dağılımı mandrel ve taşıyıcı bölümün hareketleriyle ortaya çıkmaktadır. Prepreg yatırma yönteminde ise, prepregler spesifik fiber oryantasyonlarıyla yatırılır, bu işlem manual olarak (el ile) veya bir makine yardımıyla yapılabilir. RTM yönteminde (reçine enjeksiyon metodu) parçanın ilk şeklini belirleyen fiberlerin yerleştirme şekliyle belirlenir ve daha sonra reçine enjekte edilerek lamine eldesi mümkün kılınır.

3.3 Birleştirme

Bu basamak, prepreglerin veya laminelerin her bir katmanı arasındaki birleşimini içermektedir ve ayrıca proses süresince katmanlar arasında kalmış olabilecek havanın dışarı atılması sağlanır. Birleştirme basamağı, iyi kalite bir parçanın üretilebilmesi için çok önemli

bir basamaktır. İyi birleştirilmemiş parçalarda hava boşlukları ve ıslak noktalar kalabilir. Sürekli fiberli kompozitlerin birleştirilmesinde iki önemli basamak bulunmaktadır, bunlar;

- Gözenekli ortamdan reçine geçişi
- Elastik fiber deformasyonu

Birleştirme işlemi süresince uygulanan basınç, reçine ve fiberler tarafından paylaşılmaktadır. Fakat buna rağmen uygulanan basınç tabanda reçine tarafından karşılanmaktadır (sıfır fiber elastik deformasyonu). Basınç kuvveti artınca fiberler elastik deformasyon yaşarlarken reçine sınıra doğru akmaya başlar. Fiber deformasyonunu ortadan kaldırarak sadece reçinenin akışına neden olacak birçok farklı birleştirme yöntemleri vardır. (Liang ve Garga, 2005)

3.4 Katılaştırma

Son basamak katılaştırma basamağıdır, bu basamak termoplastik reçine ile üretilmiş kompozitler için bir dakikadan az sürede tamamlanırken, termoset malzemelerle üretilmiş bir kompozit malzeme için 2 saati bulmaktadır. Vakum veya basınç bu basamakta kullanılan en önemli mekanizmalardır. Katılaştırma zamanını azaltmak, üretim oranını arttırabilme proses sayesinde gerçekleştirilebilir. Termoset kompozitlerde, katılaştırma hızı reçinenin formülasyonuna ve kurutma kinetiğine bağlıdır. Termoset reçinelerde, genellikle yüksek kurutma sıcaklıkları ile çapraz-bağ prosesini hızlandırma sağlanmaktadır. Termoplastiklerde ise katılaştırma süresince herhangi bir kimyasal değişim yaşanmadığı için katılaştırma çok kısa sürelere ihtiyaç duymaktadır. Termoplastik proseslerinde, katılma hızı soğutma hızına bağlı olarak değişmektedir. Termoset kompozitlerde ise, hızlı bir katılma için sıcaklık yükseltilir ve rijit bir yapı elde edebilmek için soğutulması gerekir. (Liang ve Garga, 2005)

Yukarıda sıralanan 4 basamak hem termosetlerde hem termoplastikler kullanılarak üretilen kompozitlerde kullanılan proses basamaklarıdır. Sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulan proseslerde farklı fiber oryantasyonlarına sahip olunabilmesi için farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. (Lackey ve Vaughan, 1994)

Malzeme sektörü, ekonomide tüm faaliyetlere girdi sağlayan temel, yayılgan (jenerik) alanlardan biridir. Bu niteliği açısından mikro-elektronik, biyoteknoloji ve nanoteknoloji ile birlikte sinai üretimin karakterini dönüştürecek ana teknolojik alanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Savunma, havacılık, mikro-elektronik, iletişim ve otomotiv sektörlerinde kullanılacak ileri malzemelerin ortaya çıkışı, malzeme biliminin bu gereksinimleri karşılayabilecek çok disiplinli, proses ağırlıklı bir alana dönüşmesiyle birlikte ilerlemektedir.

Buna ilişkin olarak polimerik ve kompozit malzemeler, akıllı ve işlevsel malzemeler,gibi önümüzdeki yıllarda önemli çekim alanları oluşturacak ileri malzeme alanları, ülkemiz için de önemli fırsat alanlarıdır. (Jones, 1998)

3.5 Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit üretim yöntemlerini, termoset kompozitlerin üretimi ve termoplastik kompozitlerin üretimi şeklinde iki geniş ana gruba ayırabiliriz. Ticari uygulama alanlarında termoset kompozitler kompozit satışının büyük bir bölümünü domine etmektedir. Termoset kompozitler %75 lik gibi bir kompozit üretim oranına sahiptirler. Termoset kompozitlerin termoplastik kompozitlere göre üretimdeki avantajlarına bağlı olarak çok daha fazla üretilmeleri ile üretim şekilleri daha çok olgunlaştırılmış geliştirilmiştir. Termoset kompozitlerin ilk kullanımı (cam fiber takviyeli işlenmemiş polyester) 1940 ı yılların başlarına rastlamaktadır, termoplastik kompozitlerin üretimi daha sonralara rastlamaktadır. (Jones, 1998)

Bu bölümde anlatılacak kompozit üretim prosesleri aşağıda sayılan başlıkları içermektedir;

- Prosesin önemli kullanım alanları
- Proseste kullanılan hammaddeler
- Alet ve kalıp gereksinimleri
- Parçanın yapılması
- Isı ve basıncın uygulanma yöntemleri
- Ana proses basamakları
- Prosesin sınırlamaları

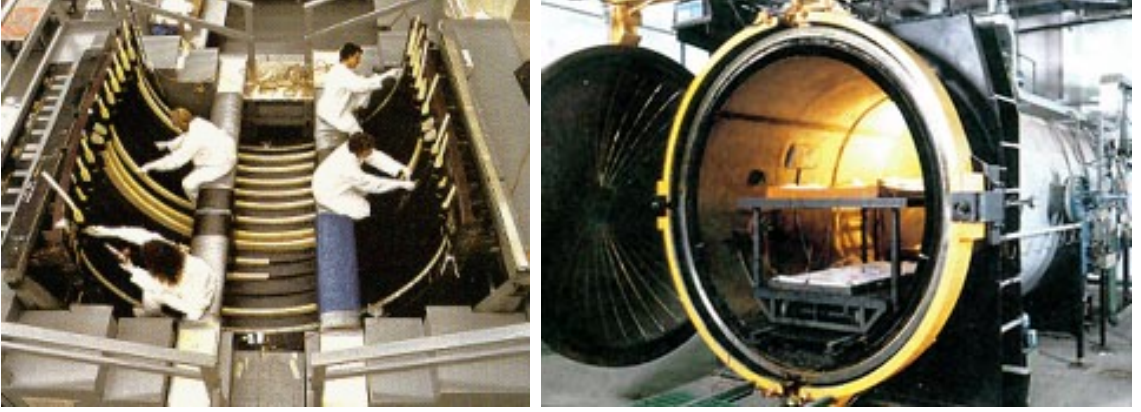
Ticari uygulamaların %75 lik bir bölümünde termoset kompozitler kullanılmaktadır.Bu tip kompozitlerin kullanımı havacılık, otomotiv, denizcilik, bot, spor aletleri v.b yerleri domine etmektedir. Piyasada birçok farklı tipte olumlu ve olumsuz yanlarıyla üretim teknikleri bulunmaktadır. Avantajlar ve sınırlamalar her üretim tekniği için farklı şekillerde bulunmaktadır. Ticari olarak üretim yapılmasına imkan veren teknikler aşağıda sıralanmaktadır. (Jones, 1998)

3.5.1 Prepreg Yatırma Yöntemi

Yatırma yöntemi iki ana gruba ayrılmaktadır, bunlar; prepreg yatırma yöntemi ve ıslak yatırma yöntemidir. Islak yatırma yöntemine daha sonra değinilecektir. Bu bölümde havacılıkta geniş kullanım ve uygulama alanı bulan prepreg yatırma yöntemi irdenelecektir.

Bu yöntemle ayrıca, otoklav prosesi veya vakum bagging prosesi denilmektedir. Yüksek fiber oranına sahip komplike şekilli parçalar bu yöntem ile üretilmektedir. (Mazumdar, 2002)

Prepreg yatırma yöntemi açık kalıplı ve düşük-hacim kapasiteli bir yöntemdir. Bu proseste prepregler kesilip kalıp içine istenilen fiber oryantasyonunda kalıba yerleştirilir. Vakum bagging den sonra, kalıp ile birlikte kompozit parça bir fırına veya otoklavın içine yerleştirilerek kürlendirme ve birleştirme için ısıtılıp basınca maruz bırakılır. (Mazumdar, 2002)



Şekil 3.1 Prepreg yatırma yöntemi üretiminden örnekler

Prepreg yatırma yöntemi yoğun bir çalışma gerektiren bir yöntemdir. Bu yüzden işçilik maliyetleri elyaf sarma, pultrüzyon ve diğer yüksek-hacimli proseslere göre 50-100 kat daha fazla olmasına karşın prototip parçaların ve az miktarda parçaların istendiği durumlarda prepreg yatırma yöntemi diğer yöntemlere nazaran daha büyük bir avantaja sahiptir.

3.5.1.1 Uygulama Alanları

Prepreg yatırma yöntemi havacılık sanayinde prototip parça imalinde oldukça geniş bir uygulama alanı bulmuş bir kompozit üretim yöntemidir. Kanat yapıları, radomlar, yat parçaları ve spor malzemeleri bu yöntem ile üretilmektedir. (Mazumdar, 2002)



Şekil 3.2 Uçakların ana iniş kapısı (www.composites-europe.com)

3.5.1.2 Ana Hammaddeleri

Grafit/epoksi prepregler, bu yöntemde en çok kullanılan malzemelerdir. Glass/epoksi ve kevlar/epoksi çiftleri de grafit/epoksiye oranla daha da az olsa kullanılmaktadır. Grafit/epoksinin daha çok tercih edilmesinin nedeni diğerlerine göre daha hafif ve güçlü olması ile birlikte çok yüksek miktarda ağırlık kaybını önlemektedir. Havacılıkta da öncelikle istenecek en önemli özelliklerden birinin de hafiflik olduğu düşünülürse karbon fiberli prepreg yapılar bu alanda çok kullanılacaktır. Üstelik grafit/epoksi prepregler ile diğer prepregler arasında maliyet açısından çok büyük farklar bulunmamaktadır. (Mazumdar, 2002)

Epoksinin dışında, yüksek-sıcaklık reçineleri olan polyimide, polycyanate ve BMI de prepreg sistemlerinde kullanılmaktadır. (Mazumdar, 2002)

3.5.1.3 Kullanılan Teçhizatlar

Prepreg yatırma yöntemi için gerekli olan alet açık kalıptır, bu kalıba prepregler istenen fiber oryantasyonunda ve sırasında yatırılır. Prototip yapım durumunda takımlar metalden, ağaçtan veya plastikten üretilir. Havacılık parçalarının üretiminde, takım malzemesi genellikle carbon/epoksi prepregler, carbon/cyanate ester prepregler, carbon/BMI prepregler, cam/epoksi prepregler, cam/cyanate ester prepregler veya epoksi-üretan bazlı takım malzemeleridir. (Mazumdar, 2002)

3.5.1.4 Parça Yapımı

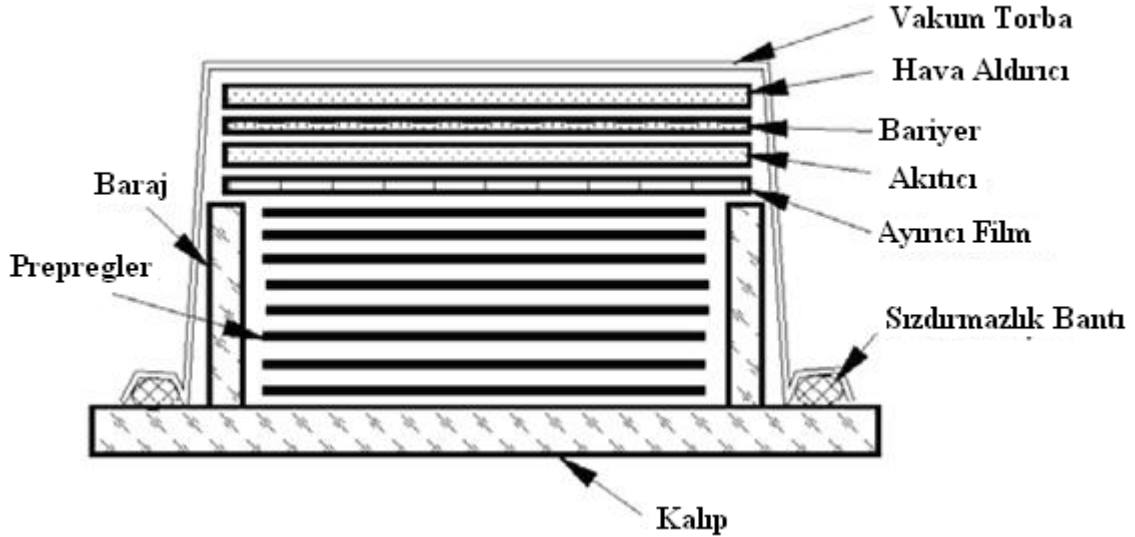
Bu proses için kullanılacak hammadde dondurulmuş haldeki prepregdir. Kompozit parça üretimi için prepreg soğutucudan çıkartılarak oda sıcaklığına gelmesi sağlanır. Oda sıcaklığına ısıtılan prepreg daha sonra istenilen boyda ve şekilde kesilir. Kesme işlemi için prepreg kesme tahtasının üstüne yerleştirilir ve çelikten yapılmış bir cetvel ve bir kesici bıçak ile kesme işlemi gerçekleştirilir. Havacılıkta kullanılan kompozit uygulamalarında bu işlem sıcaklık ve nem kontrollü temiz ortamlarda yapılmaktadır, oda içerisinde p bulunması yasaktır, çalışanlar başlarına, ayakkabılarına ve vücutlarına temiz kıyafetler giyerek çalışmaktadırlar. (Mazumdar, 2002)



şekil 3.3 Temiz ortamda kompozit parça üretimi (www.composites-europe.com)

Üretimin istenilen miktarda gerçekleştirilebilmesi için ise otomatik kesiciler kullanarak prepregler kesilmektedir. Böyle bir durumda prepreg kesme masasına yatırıldıktan sonra bıçağın yerine kullanılan lazer veya ultrasonik kesiciler yardımıyla prepregler yine istenen ebat ve şekilde kesilebilmektedir. Bu kullanılan makinalar bilgisayar kontrollü olup kullandıkları yazılım sayesinde kesme optimizasyonu gerçekleştirebilmektedir. Bu kullanılan yazılım ile ıskarta miktarı minimum miktara çekilir ve ayrıca arka arkaya hızlı ve sabit kesimlerin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlar. Makina, birbirlerine yapışık birkaç kat prepregleri bir kerede kesebilmekte ve bu da verimliliği yaratmaktadır. Çoğunlukla, parça imalinde tek yönlü fiberli prepregler kullanılmaktadır. Katmanlar farklı şekillerde kesilerek istenen fiber düzeninin elde edilmesi sağlanır. (Mazumdar, 2002)

Parça yapılar prepregin açık kalıbın üstüne yatırılması ile elde edilir. İşlem bittikten sonra parçanın rahat çıkarılabilmesi için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcısı da uygulanır. Prepregin arkasındaki film çıkarıldıktan sonra üretim şemasına bağlı kalınacak şekilde yatırılırlar. Havacılıkta kullanılacak parçalar ve güvenliğin önemli olduğu uygulamalarda kullanılacak parçalarda kalite kontrol personeli tarafından dizilimin düzenliliği her birkaç parça konduktan sonra kontrol edilir. (Mazumdar, 2002)



Şekil 3.4 Prepreg yatırma yöntemi için vakum torbalama

Bütün prepregleri uyguladıktan sonra önemli olan durum içerde hapsolup kalmış havanın olmamasıdır. Sıkıştırıcı rulolar, bu arada sıkışıp kalabilecek havanın dışarı çıkmasına ve tam bir temas olmasını sağlayacaklardır. (Mazumdar, 2002)

Öncelikle bütün prepregler istenen düzende ve fiber oryantasyonunda dizildikten sonra kütleme ve birleştirme için vakum bagging hazırlıkları yapılacaktır. Vakum bagging için gerekli olan basamakları şu şekilde sıralayabiliriz; (Mazumdar, 2002)

- Ayrıcı filmler prepreglerin üzerlerine uygulanır. Kalıp ayırıcı film delikli olduğundan dolayı içeri girebilecek havaya, reçine geçişine izin verir bir şekildedir.
- Bleeder denilen gözenekli yapı kalıp ayırıcı filmin üzerine uygulanır. Bleeder'in işlevi, nemi absorbe etmek ve prepreg yığınının gelen reçinenin geçişine izin vermektir.
- Daha sonra bleeder in üzerine engelleyici bir film uygulanır. Bu film ayırıcı filme benzer fakat gözenekli değildir.

- Hava alma katmanı uygulanır, bu katman bleeder gibi gözenekli bir yapıdadır. Bu hava alma katmanının (breather) görevi parça üzerinde her yerde eşit miktarda basıncın oluşmasını sağlamak ve ayrıca hava ve buharın yapıdan atılabilmesini sağlamaktır.
- Son katman vakum çantasıdır. Malzemesi genellikle poliamid (PA) film veya tekrar kullanılabilir bir elastomerdir. Bu film birbirine istiflenmiş prepreglerin her tarafından bir mühür şeridi kullanılarak mühürlenir. Daha sonra vakum çantasının içine bir nozul yerleştirilerek vakumlama işlemi tamamlanır. Bu aşamadan sonra parça otoklav içerisinde ısı ve basınç uygulamaları için uygun duruma gelmiştir.



Şekil 3.5 Vakum çantalama işlemine tabi tutulmuş havacılıkta kullanılan bir parça otoklav içine girmeye hazır durumda (www.composites-europe.com)

3.5.1.5 Prepreg Yatırma Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları

Öncelikle bu yöntemin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Prepreg kullanıldığı için yüksek fiber hacim oranlı (%60'dan fazla) kompozit parçaların üretimine imkan verir. Prepregler genellikle %60'dan fazla hacim oranında fiber içerirler.
- Kompleks parçaların üretimi bu yöntemle kolaylıkla gerçekleştirilebilir.
- Bu proses prototip parçaların üretimi için çok elverişlidir. Düşük maliyetli takım kullanılması avantajına sahip olmasına karşın yüksek maliyetli bir yatırım olan otoklav kullanılmaktadır.
- Çok dayanımlı ve sert malzemelerin üretimi bu yöntemle gerçekleştirilebilir.

Prepreg yatırma yöntemi eski ve uzun süredir kullanılan bir yöntem olmasına karşın dezavantajları veya sınırlamaları da mevcuttur;

- İşçi gücüne büyük miktarda ihtiyaç duyulur ve yüksek-hacimli parçaların üretimi için uygun değildir.
- Prepreg yatırma yöntemi ile parça imali oldukça maliyetli bir üretimdir. (Mazumdar, 2002)

3.5.2 Islak Yatırma Yöntemi

Yakın zamana kadar ıslak el yatırma yöntemi kompozit parçaların üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biriydi. Günümüzde de hala deniz taşıtlarının prototip üretimlerinde oldukça geniş bir üretim alanı bulan bir yöntemdir. Bu yöntemde öncelikle sıvı haldeki reçine kalıba uygulanır ve daha sonra üstüne takviye elemanı yerleştirilir. Bir rulo sayesinde fiberlerin reçine ile emdirilmesi sağlanır. Yeni bir fiber-reçine ikilisi bir önceki katmanın istenen kalınlığa ulaştıktan sonra uygulanır. Bu yöntem gayet esnek bir yöntem olup farklı tipte dokuma ve mat malzemelerinin yerleştirilmesiyle parçanın optimize edilmesine olanak sağlar. (Mazumdar, 2002)

Takviye elemanının elle(manual) olarak yerleştirilmesinden dolayı bu yönteme **el yatırması yöntemi** de denilmektedir. Bu yöntem düşük ilk yatırım maliyeti ve uzmanlık bilgisiyle üretime imkan verdiği için avantaj teşkil etmektedir. (Mazumdar, 2002)

3.5.2.1 Uygulama Alanları

Islak yatırma yönteminin ticari uygulama alanlarına bakılacak olursa, bu yöntem çoğunlukla bot yapımında, rüzgar gülü pervanelerinde, depolama tanklarında ve yüzme havuzları üretiminde tercih edilen bir kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemin proses kolaylığı ve ilk yatırım maliyetinin düşük olması bu yöntemin prototip üretiminde de kullanım alanının geniş olmasına yol açmıştır. Bu yöntem ile kompleks parçaların üretimi de gayet rahattır.



Şekil 3.6 A41-ft tip gezi teknesi (www.composites-europe.com)

3.5.2.2 Ana Hammaddeleri

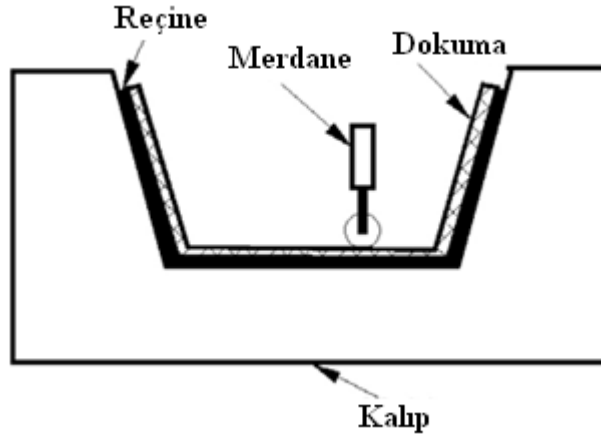
Örgü cam elyaf, kevlar ve karbon fiber ile birlikte E-camı bu üretim yönteminde tercih edilen takviye elemanlarıdır. Epoksi, polyester ve vinylester reçineler ıslak-yatırma prosesi süresince parçanın ihtiyaçları doğrultusunda kullanılan matris malzemeleridir. Polyester reçine, deniz taşıtlarında ve diğer ticari uygulamalarda en çok tercih edilen reçinedir. Cam elyaflar botun iskeletinin üretiminde kullanılmaktadır, cam elyaflar sprey tabancası sayesinde küçük parçalar halinde kesilerek kalıp üzerine uygulanmaları sağlanır. (Mazumdar, 2002)

3.5.2.3 Teçhizat Gereksinimleri

Diğer üretim yöntemlerine kıyasla ıslak yatırma yönteminde kullanılan kalıp tasarımı daha basit ve kolaydır, çünkü proses genellikle oda sıcaklığında bir kürlleme ve düşük basınç değerleriyle yürütülebilmektedir. Çelik, odun, GRP ve diğer malzemeler prototip uygulamaları için kalıp malzemesi olarak kullanılabilirler. Kalıp dişi veya erkek kalıp olabilir. Duş tekneleri üretimi için erkek kalıp kullanılmaktadır. Deniz taşıtları endüstrisinde, FRP (fiber reinforced plastics)'den yapılmış tek-tarafli dişi kalıp ile yatların üretimi yapılabilmektedir. Kalıbın dış kabuğu odundan yapılmış bir çerçeve ile kuvvetlendirilmektedir. (Mazumdar, 2002)

3.5.2.4 Parça Üretimi

Aşağıdaki resimde şematik olarak gösterilmiş olan ıslak-yatırma yöntemi ile kompozit parçanın kalınlığı uygulanan reçine ve takviye eleman katmanları tarafından belirlenir. Rulo yardımıyla reçinenin dağılarak yüzey boyunca üniform bir dağılım göstermesine sağlar. Rulo ile sıkıştırma hareketi ile fiberlerin homojen olarak ıslatılması sağlanır. (Mazumdar, 2002)



Şekil 3.7 Islak yatırma (el yatırması) yönteminin şematik olarak gösterilişi

Daha sonra parça genellikle oda sıcaklığında kürlenir ve katılaştıktan sonra kalıptan çıkarılır. Prosesin bütün işlem süresi komponentlerin boyutu ve reçinenin formülasyonuna bağlı olarak belirlenir. Bot gibi büyük-boyutlu parçalar genellikle oda sıcaklığında kürlenirler.

Bu yöntemin kalite kontrolü oldukça zordur, üretilen parçanın kalitesi büyük ölçüde üretimi gerçekleştiren kişinin kabiliyetine bağlıdır. (Mazumdar, 2002)

3.5.2.5 Proses Basamakları

Islak yatırma yöntemindeki başlıca proses basamakları şu şekilde sıralanabilir;

- Kalıp ayırıcı kalıba uygulanır
- Yüzey kalitesinin A kalite olması için dış yüzeye jelkot sürülür, takviye elemanları yerleştirilmeden önce jelkot katılaşmasını tamamlar
- Takviye elemanı kalıp yüzeyine yerleştirilir ve reçine ile ıslatılır. Bazen ise ıslatılmış haldeki yapı direk olarak kalıba yatırılır.
- Rulo kullanarak reçinenin bütün yüzeye üniform olarak dağılımı sağlanır.
- İstenilen kalınlık elde edildikten sonra yeni takviye katmanları yerleştirilir.
- Sandviç yapılarda ise lamine yapı arasına balsa odunu, köpük veya balpeteği yapılı çekirdek malzemesi yerleştirilerek adhesif olarak birleştirilir. En alttaki lamine yapı ilk başta yapılan lamine yapıya benzer şekilde yapılır.
- Parça, oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda kürlenerek işlem tamamlanır.

3.5.2.6 Islak Yatırma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Islak el yatırma yöntemi en eski kompozit üretim yöntemlerinden biri olup aşağıda sıralanan avantajlara sahiptir;

- İlk yatırım maliyeti diğer yöntemlere göre daha düşüktür, çünkü kullanılan teçhizat diğer yöntemlerde kullanılan teçhizata göre daha basit ve önemsizdir.
- Yöntem çok basit ve kullanışlıdır. Herhangi bir fiber tipi herhangi bir fiber düzeninde seçilerek kullanılabilir.
- Prototip bir parçanın imali oldukça ucuzdur çünkü kullanılan kalıp basit bir yapıdadır. Ayrıca bu yöntemde kullanılan sıvı reçine, mat ve dokumalar prepreglere göre daha ucuzdur.

Islak yatırma yöntemi şu şekilde dezavantajlara sahiptir;

- Proseste işgücü önemlidir
- Proses daha çok prototip gibi büyük parçaların imali için uygundur.
- Kullanılan kalıp açık olduğu için stiren yayımlaması önemli bir sorundur
- Üretilen parçaların kaliteleri parçadan parçaya göre değişebilir ve sabit değildir.
- Yüksek fiber hacim oranlı kompozit parçalar bu yöntemle üretilemez
- Proses temiz değildir. (Mazumdar, 2002)

3.5.3 Sprey Püskürtme Yöntemi

Sprey püskürtme yöntemi, el yatırması yöntemine benzer bir proses olmasıyla birlikte reçinenin ve fiberlerin kalıba uygulanışı şeklinden bu metodla farklılıklar göstermektedir. El yatırması yönteminde işgücüyle bir üretimin gerçekleşmesi söz konusudur çünkü reçine ve fiberler kalıp üzerine elle ya da manual olarak yerleştirilir fakat sprej püskürtme yönteminde ise sprej tabancaları ile saatte 1000-1800 lb miktarında malzemeyi dağıtabilmek püskürtmek söz konusudur, fiberler ve reçine sprej tabancasında kesilmek suretiyle hızlı bir şekilde kalıp yüzeyine yollar. Sprej püskürtme yöntemi cam fiberin pahalı olmayan tipi olan düzensiz şekildeki cam fiber (roving) kullandığı için daha hızlıdır. (Mazumdar, 2002)

3.5.3.1 Uygulama Alanları

Sprej püskürtme prosesiyle büyük ve orta ölçekli parçalar, düşük fiber oranından orta fiber oranına kadar üretililebilmektedir. Parçada dayanımın çok önemli olmadığı, yüksek dayanım değerlerine ihtiyaç duyulmadığında püskürtme yöntemi uygun bir üretim yöntemidir. Duş tekneleri, yüzme havuzları, tekne kaplamaları, depolama tankları vs. bu yöntem ile üretilmektedirler. (Mazumdar, 2002)

3.5.3.2 Başlıca Hammaddeler

Bu proste kulanılan takviye malzemeleri olan cam fiber rovingler, 10mm-40mm boyutlarında kesilerek kalıba uygulanır. Yüksek mekanik özellikler için, dokuma tabakaların ve kırılmış fiberlerin kombinasyonu kullanılır. En çok kulanılan malzeme cinsi E-camı olup bunun yanı sıra, karbon ve kevlar sarımlar(roving) da kulanılmaktadır. Bu proste takviye elemanın bütün parçaya göre ağırlıkça yüzde oranı %20-%40 arasındadır. Sprey-püskürtme yönteminde en çok kulanılan reçine sistemi DCDP polyester reçinedir, bunun yanında isophthalic polyester ve vinylester de kulanılan diğr reçinelerdir. (Mazumdar, 2002)

3.5.3.3 Kulanılan Teçhizatlar

Bu yöntemde kulanılan kalıp sistemi ıslak yatırma (el yatırması) yönteminde kulanılan kalıp sistemiyle özdeşdir. Uygulamaya bağı olarak dişi ve erkek kalıplar kulanılmaktadır. Küvetler ve duşlar erkek kalıpla üretilirken, tekne iskelet ve güverteleri dişi kalıpla üretilmektedir. Banyo tekneleri üretiminde FRP kalıplar kulanılmaktadır. (Mazumdar, 2002)

3.5.3.4 Parça Üretimi

Sprey püskürtme yöntemindeki üretim basamakları ıslak yatırma yöntemiyle çok benzerdir. Bu proste önce kalıp ayırıcı kalıba uygulandıktan sonra jelkot sürülür. Jelkot 2 saat süreyle katılaşına kadar bırakılır. Önce jelkot katılaşı daha sonra sprej tabancası ile fiber-reçine karışımı kalıp yüzeyine gönderilir. Sprej tabancası sarımdan gelen sürekli fiberi önceden belirlenen boylarda kırparak daha sonra reçine/katalizör karışımı içinden geçirilmek koşuluyla püskürtür. Reçine/katalizör karışımı sprej tabancasının içinde ya da tam tabancanın önünde olabilir. Fakat reçine/katalizör karışımının tabancanın içinde olması işlemi yürüten operatörün sağığı açısından daha olumludur. (Mazumdar, 2002)



Şekil 3.8 Bir duş teknesi üretiminde kullanılan sprej-püskürtme yöntemi

Sprej püskürtme yönteminde üretilen parçanın kalınlığı püskürtme şekline bağlı olarak gelişir ve yüzeyin kalitesi operatörün becerisine bağlıdır. Malzeme kalıp yüzeyine püskürtüldükten sonra, fırçalar ve rulolar yardımıyla içerde kalmış havanın dışarı atılması sağlanarak fiberlerin iyi ıslatılması sağlanır. Dokuma tabakalar veya sürekli elyaf matlar performans gereksinimleri doğrultusunda yapıya eklenebilir. Reçinenin kurlenmesi oda sıcaklığında yapılır ve kurlenme işlemi reçinenin formülasyonuna bağlı olarak 2-4 saat arası sürebilir. Kurlenme işleminden sonra parça kalıptan çıkartılarak bitirme ve yapısal gereksinimler doğrultusunda test edilir.

3.5.3.5 Proses Basamakları

Sprej püskürtme yöntemindeki proses basamakları lamine yapıların yapılması dışında ıslak yatırma yöntemiyle aynıdır. Başlıca proses basamaklarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Kalıp cilalanıp temizlenerek kalıptan parça çıkarma işlemi için uygun hale getirilir.
- Kalıp yüzeyine jelkot uygulanarak sertleşmesine izin verilir.
- Fiberlerin jelkot yüzeyinden dışarı taşmamaları için engel vazifesi gören bariyer kaplaması uygulanır.
- Bu bariyer kaplaması fırında kurlenmiştir.
- İşlenmemiş olan reçine, kalsiyum karbonat veya alüminyum trihidrat gibi filler lar ile karıştırılarak hazır hale getirilir.
- Reçine, katalizör ve kırılmış fiberler sprej tabancası yardımıyla kalıp yüzeyine püskürtülür. Sprej tabancası istenen model ve kalınlıkta ürün inşa eder.

- Merdane yardımıyla düzgün ve pürüzsüz bir yüzey elde edilip içerde sıkışmış hava varsa onun da dışarı atılması sağlanır.
- İstendiği takdirde odun, köpük veya balpeteği yapılar lamine yapıların arasına yerleştirilerek sandviç yapı da elde edilebilir.
- Parça kalıptan çıkartılıp, son işlemler için gönderilir.
- Kalite kontrol personeli, parçanın boyutsal toleranslarını, yapısal sağlamlığını ve düzgün yüzey özelliklerini inceleyip, geçiş kriterleri doğrultusunda parçaya onay veya red kararı verir. (Mazumdar, 2002)

3.5.3.6 Sprey Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yöntemin şu şekilde avantajları bulunmaktadır;

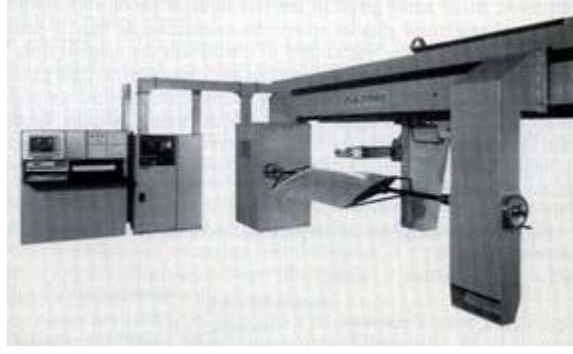
- Küçük boyutludan büyük boyutluya kadar birçok parça üretiminde ekonomik bir yöntemdir
- Ucuz teçhizat ve ucuz malzeme kullanır.
- Küçük hacimliden orta hacimliye kadar parçaların imaline uygundur.

Yöntemin dezavantajlarını sıralayacak olursak;

- Yüksek dayanımlı parça imal edilemez.
- Fiberlerin hacim oranlarının ve buna bağlı olarak kalınlığın kontrolü zordur, çünkü bu kontrol bir operatör tarafından gerçekleştirilmektedir.
- Havaya açık bir kalıp kullanıldığından dolayı stiren salınımı sorun yaratabilir.
- Bu proses ile parçanın bir yüzeyi çok düzgün olurken diğer yüzey kaba ve pürüzlü olabilir.
- Bu proses boyutsal doğruluğun ve yinelenebilir üretimin önemli olduğu durumlara uygun değildir. Sprey püskürtme yöntemi iyi bir yüzey bitirme işlemi veya boyutsal kararlılık sağlamayabilir. (<http://www.arageportal.com>)

3.5.4 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi reçine ile ıslatılmış fiberlerin döner bir mandrel yardımıyla belirli bir açıyla parça üzerine sarılması çalışma esasına dayanan bir kompozit üretim tekniğidir.



Şekil 3.9 Elyaf sarma makinesi

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır. (Mazumdar, 2002)

3.5.5 Reçine Transfer Kalıplama RTM / Reçine Enjeksiyonu

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunlukla jelkotlu veya jelkotsuz olarak her iki yüzeyin de düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğunu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyaf ın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır. (Mazumdar, 2002)

4. PULTRUZYON YÖNTEMİ

4.1 Giriş

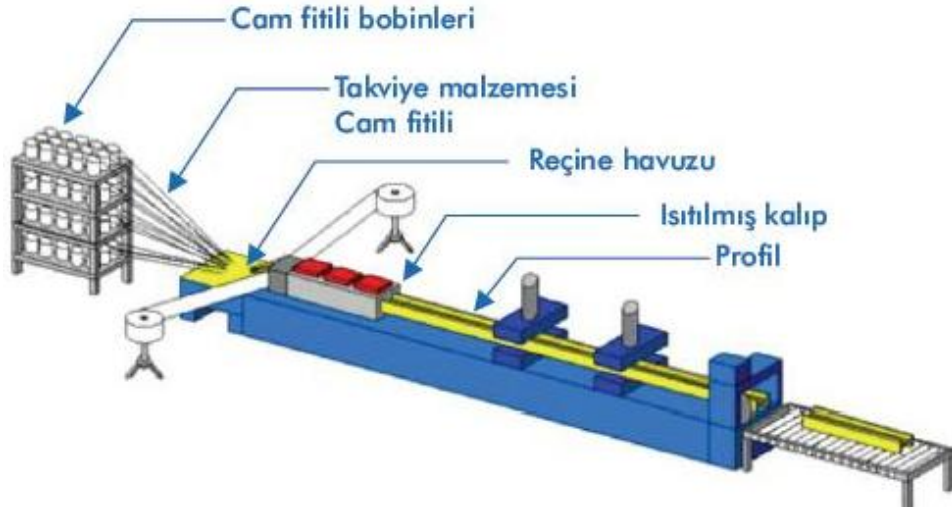
Pultruzyon, düşük maliyetli ve iyi kalite gereksinimli orta hacim oranlarından yüksek hacim oranlarına kadar ticari ve askeri ürünlerin üretiminde kullanılan bir kompozit üretim yöntemidir. Pultrude ürünler, hafiflik, korozyon dayanımı ve/veya düşük elektrik iletkenliğinin istendiği ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Pultruzyon ürünlerinin satıldığı pazarlarda ürünlerin şekilsel olarak bazı standartları vardır, bunlar çubuk, köşebent, I-kirişleri, paneller ve plak şeklinde olabilir. Pultrude ürünlerin diğer kullanım alanı bulduğu yerleri sıralayacak olursak, merdiven korkulukları, olta kamışları, alet sapları, otobüs parçaları vs verilebilir. Günümüzde artık, S-camı, karbon ve kevlar takviye malzemeleri ve epoksi, fenolik ve termoplastik matris malzemelerini kullanarak pultruzyonla üretim yapılabilmektedir. Bu gibi avantajlar sayesinde pultruzyon yöntemi havacılık, taşımacılık, spor malzemeleri ve tıbbi donanım alanlarında da kullanım alanı bulabilmektedir. (Ünal ve Gülten, 1998)

Elyaf yani fiberler bir seri bobinlerden beslenirken kalıp arasına ulaşmadan önce termoset-reçine banyosundan geçmektedir. Kalıptan çıkan daha sonra sıcaklık ortamına giren ön şekillenmiş elyaf burada sıkıştırma ile son şekline ulaştırılır. Bazı hallerde kalıbın kendisi ısıtıldığından, termoset reçinenin ekzotermik reaksiyonunun da etkisi ile kalıptan geçerken son şekline ulaşmış olmaktadır. Soğutma; hava, cebri konveksiyon veya su ile gerçekleştirilmektedir. Balıkçı çubukları, izolator boruları genellikle bu tür çekme işlemi ile üretilmektedir. Profil çekme yönteminin gelecekte alüminyum extruzyon sistemi ile daha çok rekabet edeceği tahmin edilmektedir.

4.2 Pultruzyon Yöntemine Genel Bir Bakış

Pultruzyonla kompozit üretim yöntemini, takviye malzemesinin ön şekillendirmeden sonra bu ön şekillenmiş takviye elemanlarının reçine tarafından ıslatılması ve bu ıslatılmış yapının daha sonra kürlenerek katı bir yapıya dönüştürülmesi kombinasyonu şeklinde özetleyebiliriz. Bu bahsedilen 3 basamak arka arkaya tekrarlanarak devamlı bir üretim şeklinde meydana gelir. Pultruzyon yönteminde kullanılan makine ve donanım üretim açısından çok önemli bir yere sahiptir, üretim süresince malzemenin çekilmesi ve sonlanmasına kadar geçen sürede mekanik donanım önem arz etmektedir. Pultruzyon yönteminde üretim hammaddelerle başlar ve 20-30 dakika arasında bir süre sonra pultruzyon makinasının sonundan bitmiş parçayı almak mümkündür. Üreticiler pultruzyon prosesine birçok yeni yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Birçok ticari pultruzyon üreticileri ıslak-banyo tekniğini kullanmaktadırlar. Bu yöntemin ilk

basamağında gereken tipteki takviye elemanları belli bir düzende tedarik edilir. Bu malzemeler makaralardan sürekli olarak sistem içinden çekilir. Birçok pultrude ürünler, polyester reçine içinden sadece aynı yönde dizilmiş sürekli fiber kullanarak üretim yapmaktadır. Çok daha karmaşık yapılı tabakasal yapılara ihtiyaç duyulduğunda, gelişigüzel dağılımlı mat ve/veya dokumalar eklenmek suretiyle farklı yönlerdeki kuvvetlere de dayanımlı ürün elde etmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca, takviye elemanlarını hibrit (melez) karışım şeklinde kullanarak da yüksek performanslı üretim yapmak da mümkündür.



Şekil 4.1 Pultruziyon makinasının şematik olarak gösterilişi (www.composites-europe.com)

Şekillendirme kılavuzları, bu takviye elemanlarını reçine banyosuna girmeden önce buraya uygun şekle sokar ve daha sonra bu ıslak-banyo denilen yerden geçtikten sonra fiberler matris malzemeleri ile kaplanmış olmaktadır. Islatılmış haldeki bu fiber/matris kombinasyonu, parçaya son şeklini verecek olan ısıtılmış kalıp içerisinden geçirilerek istenen şekilde parçanın üretimi gerçekleştirilmiş olur. Isıtılmış bu kalıp içerisinde, termoset reçinenin kurlenmesi için belli bir sıcaklık-basınç çevrimine maruz bırakılır. Sıcaklık profili, kalıp boyunca dağıtılmış ısıtıcı elemanlar sayesinde kontrol edilmektedir. Bazı durumlarda, reçine ve/veya fiber ön ısıtmaya maruz bırakılarak kurlmeye ve kurutmaya yardımcı olabilir. Uygulanan sıcaklığı süresi, parçanın kalıp içerisinden çekilme (pultrude) edilme hızıyla bağlantılıdır. Isıtılmış kalıp içinden geçirildikten sonra tamamen kurlenmiş haldedir ve prosesin son adımında istenen boyda kesme işlemi yapılır. (Ünal ve Gülten, 1998)

Islak-banyo tekniği, fenolik, epoksi ve bismaleimid gibi yüksek performanslı matrisler kullanılığında birçok olumsuzluklar içerir. Bu bakımdan bu yöntemin yerine geçebilecek başka bir yöntem ise, kalıp içinde bulunan fiberlere dışardan reçine enjekte edilmek yoluyla

Üretimin gerçekleştirilmesidir. Bu teknik, RTM (reçine transfer yöntemi) ve pultrüzyon yönteminin birleşimi şeklinde düşünülebilir ve bu yöntem sayesinde konvansiyonel olmayan pultrüzyon parçalarının da imali mümkün olmaktadır. Açık bir reçine banyo sistemi kullanılmadığı için hem yapıdan uzaklaşan hava kabarcıkları kontrol edilebilecek hem de sağlık ve evre açısından da daha olumlu olacaktır. (nal ve Gülten, 1998)

Çekilen malzeme kalıp içinden geçerken farklı çekme hızları, reçine tipleri ve kalıp uzunlarına bağlı olarak farklı ısı bölgelere maruz kalmaktadır. Çekilen parçalara uygulanan farklı çekme hızları çekme aletinin ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir. Ve son olarak da istenen boyuta getirilen pultrude parça uygun bir kesme aparatıyla kesilerek üretim sonlandırılır. (etinbaş, 2006)

İşlem esnasında malzemenin davranışlarını etkileyen parametreyi sıcaklık, polimerizasyon derecesi ve matris malzemesi viskozitesi olarak gösterebiliriz. Termoset malzemelerin işlenmeleri esnasında polimerizasyon reaksiyonları (kürlenme) ve nihai özellikler ve kompozit parçanın kalitesini etkileyen matrisin riyolojik değişimleri de vuku bulmaktadır.

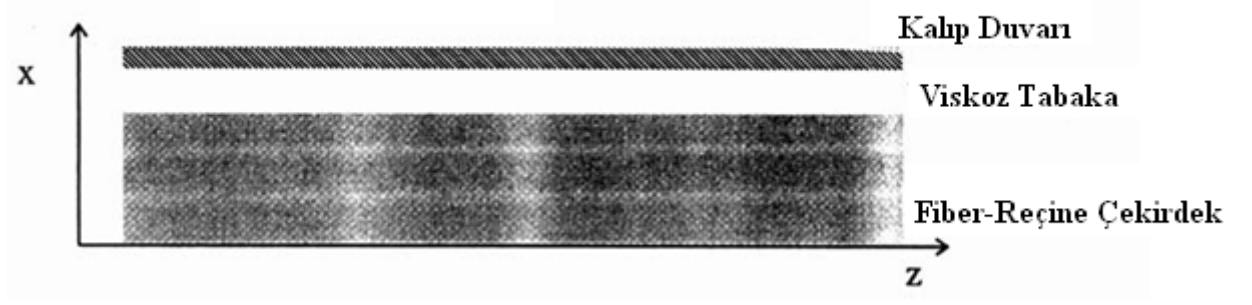
Pultrüzyon işlemi sıvı reçinenin kalıp içerisinden geçerken katıya dönüşümüyle nihai kompozit yapıya ulaşımı işlemine bağlı bir üretim yöntemi olarak söylenebilir. Katıya yakın yapıdaki kalıptan çıkan malzeme kalıptan çıktıktan sonra malzemenin çekilebilmesine imkan verebilecek özelliklerde olmalıdır. Bu işlem esnasında dikkat edilecek değişken olan en önemli hususlardan biri de polimerizasyon derecesi ve sıcaklıkla birlikte değişen viskozitedir. İşlem esnasında kontrol edilebilecek iki parametre kalıp sıcaklığı ve çekme hızıdır.

Polimerizasyon reaksiyonları fiber/reçine sisteminin kalıp içerisinden geçmesi esnasında sıcaklık artışı ile birlikte aktive olur. Ekzotermik reaksiyonun doğal bir sonucu olarak pultrude parçalar güçlü sıcaklık gradyanları, polimerizasyon dereceleri ve kalınlık kesiti arasında viskozitenin oluşumuna neden olur. Buna bağlı olarak da kalıp duvarlarının dizaynı, kompozit malzemenin kalıbın sonuna ulaşmadan önce tamamıyla jelleşmenin meydana getirecek, gradyan büyümelerini kontrol edebilecek şekilde yapılacaktır. Kalın kompozit malzemelerde, aynı anda farklı sıcaklık ve kürlenme derecelerine bağlı olarak farklı fiziksel durumlara ulaşılabilmesi söz konusudur. (etinbaş, 2006)

4.3 Reçine Akışı

İslatılmış fiberler kalıp içerisinden geçerken, kalıp duvarı ve fiber/reçine kütlesi arasında viskoz bir yapı oluşur. Fiber-reçine çekirdeği kalıp içerisinden sabit bir hızda hareket eder,

fakat kalıp duvarı ve ilk fiber tabakası arasında bir hız bölgesi (boşluğu) meydana gelir. Buradaki fiber-reçine çekirdeğinin sürükleyici etkisi viskoz akışın oluşmasına neden olur. Bu tabakanın efektif aralığı kesin olarak belirlenmeden önce kalıp duvarı ve ilk fiber katmanı arasındaki aralık olarak kabul edilmekteydi. Aşağıdaki grafikte kalıp duvarı ve ilk fiber katmanı arasındaki mesafeyi gösteren bir grafik verilmiştir;



Şekil 4.2 Pultrüzyon ürün tabakaları

Pultrüzyon kalıbı giriş bölgesi, viskoz sürüklenme kesiti ve sürtünmeli kesit olarak şematize edilebilir. Koniksel giriş kesiti düşük-sıcaklık, düşük-viskoziteli bölgedir ve reçinenin geri akışından kaynaklanan basınç artışı ile karakterize edilebilir. İkinci kesitte, reçine kalıp duvarı ve ilk fiber katmanı arasına akarak viskoz kesme kuvvetlerini doğurur. Jelleşmeden sonra ise kalıp duvarları ile yarıkatı/lastik kıvamındaki reçine arasında sürtünme kuvvetleri meydana gelmeye başlar. Her bölgede kalınan süre, çekme hızı, kalıp sıcaklığına ve elbette ki bunlara bağlı olarak reçine tipine göre değişir. (Atarsia ve Bokhili, 2000)

4.4 Pultrüzyon Yönteminin Proses Adımları

Pultrüzyon yönteminde izlenen başlıca proses basamaklarını şu şekilde sıralayabiliriz;

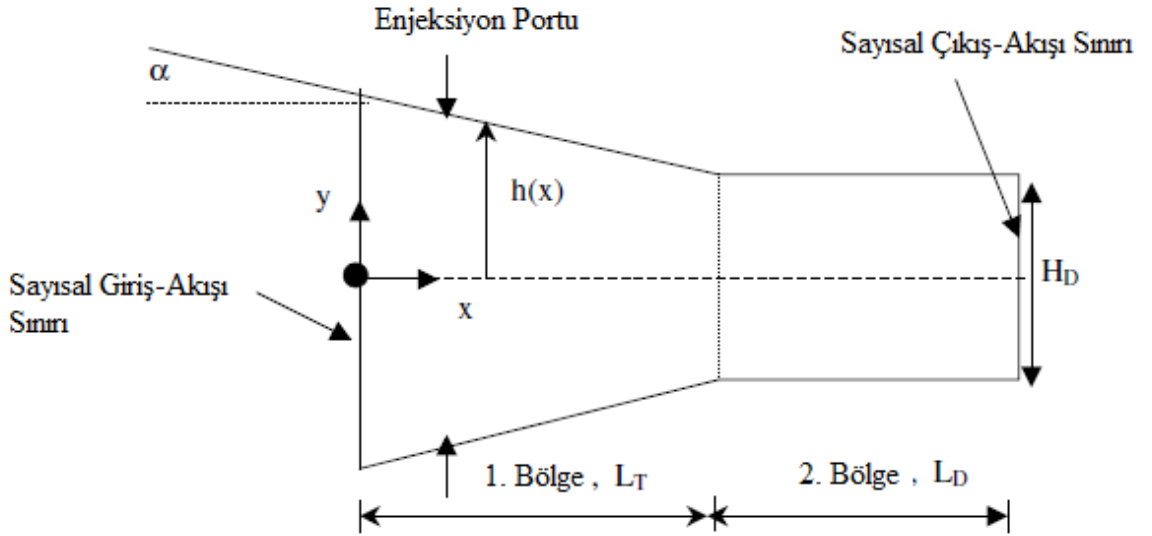
- Fiber makaraları sepet içinde saklanır.
- Ayrı ayrı fiber makaraları reçine banyosu içinden geçirilir.
- Sertleştirici ve reçine sistemleri bir kap içinde karıştırılır ve daha sonra reçine banyosuna dökülür.
- Kalıp, reçinenin kürlenebilmesi için belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır.
- Reçine-emdirilmiş fiberler kalıp içerisinden belli bir hızla çekilir
- Daha sonra çekilmiş malzeme belirli boyutlarda kesilir.
- Yüzey boyama için hazırlanır. Bitirme işlemleri için yüzey işlemleri önemli bir durumdur, çünkü pultrüzyon prosesi için kalıp içinden çıkarma önemli bir olgudur. Bu kalıptan ayrılmaları bir tür ciladır ve parçanın dış yüzeyinde meydana getirilen bir filmidir.

4.5 Pultruziyon Yöntemi Üretim Parametrelerinin Matematik Modelle İfadesi

Reçine enjeksiyon sistemi uygulanan pultruziyon proseslerinde, kalıp girişindeki basınç bölgesi ve hız bölgelerinin sayısal olarak çözülmesinde kullanılan matematik modelin geliştirilebilmesi için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır;

- Darcy'nin, gözenekli ortam içerisinde akış kanunu göz önünde tutulmalıdır,
- Reçine viskozite değerinin izotermal olduktan çıkışa dek sabit olarak alınması gerekmektedir,
- 2. Bölgedeki pultrude edilecek olan kompozit malzemenin fiber hacim oranının sabit olması; 1. Bölgedeki pultrude edilecek olan kompozit malzemenin fiber hacim oranının enjeksiyon odasının açısına göre değişebilir özellikte olması,
- Sayısal bölge girişinde, iç basınç (P_0) değerinin 1 atmosfer basıncı olarak alınarak bu şekilde kabul edilmesi,

Nümerik model, 2 boyutlu kartezyen koordinat sistemi baz alınarak hazırlanmaktadır.



Şekil 4.3 Sayısal Bölgenin Şematik Olarak Gösterilişi (Rahatekar,SS ve Roux J.J., 2002)

4.5.1 2. Bölge İçin Uygulanacak Eşitlikler

Fiber matris içerisinde geçecek reçine akışını simüle etmek için, nümerik model Darcy eşitliğini kullanmaktadır. 2. bölgedeki eşitlikler olan; süreklilik eşitliği, x-momentum eşitliği ve y-momentum eşitlikleri sırasıyla aşağıda verilmektedir;

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

$$u = U - \frac{K_{11}}{\mu\phi} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.2)$$

$$v = -\frac{K_{22}}{\mu\phi} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4.3)$$

Buradaki P değeri reçine basıncını, u değeri, eksenel yöndeki reçine hızını, v değeri, karşıt yöndeki reçine hızını, K_{11} değeri, eksenel yöndeki geçirgenliği, K_{22} değeri, karşıt yöndeki geçirgenliği, ϕ değeri, poroziteyi ve μ değeri de reçine viskozitesini vermektedir.

4.5.2 1. Bölge İçin Uygulanacak Eşitlikler

1. bölge için de 2. bölge için verilmiş olan eşitliklere benzer şekilde sırasıyla süreklilik eşitliği, x-momentum eşitliği ve y-momentum eşitliklerini verecek olursak;

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

$$u = U - \frac{K_{11}}{\mu\phi} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.5)$$

$$v = V - \frac{K_{22}}{\mu\phi} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4.6)$$

U değeri, fiber hızının (pultrüzyon çekme hızı) x-komponenti ve V değeri de enjeksiyon odası giriş açısından dolayı meydana gelen fiber hızının y-komponenti olarak tanımlanabilir. Fiber hızının y-komponenti ayrıca şu şekilde de ifade edilebilir;

$$V = -U \left(\frac{y}{h(x)} \right) \tan \alpha \quad \text{for } -h(x) < y < h(x) \quad (4.7)$$

$$h(x) = mx + b \quad (4.8)$$

Buradaki $h(x)$ değerini x 'in bir fonksiyonu olarak 1. bölgenin alçak ve yüksek duvarlarının bölgesel yükseklikleri olarak tanımlanabilir. Örneğin; $\alpha=0$ olduğu zaman eşitlik 4.7'de olduğu gibi herhangi bir giriş açısı olmayacak ve fiber hızı sıfır olacaktır. Nümerik tekniği daha da basitleştirmek için bölgesel değişen basınç (P) için basit bir eşitlik elde edilir. Hangi sayısal bölgenin dikkate alınacağına bağlı olarak, basınca dair eşitliklerin 2 tipi bulunmaktadır. 2. bölge için, Eşitlik 4.2 ve 4.3'ü, Eşitlik 4.1'de yerine koyarak 2. bölge için ϕ değeri sabit olduğu sürece aşağıdaki eşitliği elde ederiz; (Rahatekar ve Roux ,2002)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{11}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{22}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = U \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (4.9)$$

1. bölgedeki basınç bölgesinin eşitliğini elde etmek için Eşitlik 4.5 ve 4.6'yı alarak Eşitlik 4.4 yerine koyarak aşağıdaki eşitliği elde ederiz;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{11}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{22}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = U \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\varphi}{h(x)} \tan \alpha \right) \quad (4.10)$$

4.5.3 Fiber Hacim Oranı ve Gözeneklilik Parametrelerinin Modellemesi

Bitmiş kompozit malzemenin fiber hacim oranı, kompozit malzemenin kalıbın düzgün kesiminden geçerkenki fiber hacim oranı olarak belirlenmelidir. 1. bölgedeki fiber hacim oranı 2. bölgedekine göre farklı değerlere sahip olabilir. Fiber hacim oranı, kalıbın konik kesiminden içeriye doğru girerek düz bölgesine doğru ilerledikçe artış gösterir. Bunun nedenini bu konik kesimden geçmeden önce daha büyük kesit alanına dağılmış aynı miktardaki fiberlerin, daralmadan dolayı daha küçük kesit alanında aynı miktarda bulunarak fiber hacim oranı değerini arttırması olarak açıklayabiliriz. Gözenekliliği şu şekilde açıklayabiliriz; (Rahatekar ve Roux ,2002)

$$\Phi(x) = (1 - V_f(x)) \quad (4.11)$$

Buradaki $V_f(x)$ değeri bize bölgesel fiber hacim oranını vermektedir. Buradaki gözeneklilik miktarı bu poroz bölgelerden geçebilecek reçine miktarı olanağını verir.

4.5.4 Geçirgenlik Parametresinin Modellenmesi

Nümerik modelleme ile, farklı geçirgenlik değerlerine bağlı olarak basınç değerinin K_{11} ve K_{12} için nasıl değiştiğini de açıklamak mümkün olabilecektir. Eşitliğini verecek olursak;

$$K_{11} = \frac{D_f^2 (1 - V_f)^3}{16C V_f^2} \quad (4.12)$$

Buradaki D_f değeri fiber çapını, C de bir sabit değeri belirtmektedir. Buradaki C değeri 0,093 olarak alınabilir. Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler için K_{11} eşitliği verdikten sonra K_{22} için de verecek olursak;

$$K_{22} = C_1 \left(\frac{\sqrt{V_{fmax}}}{\sqrt{V_f}} - 1 \right)^{5/2} R_f^2 \quad (4.13)$$

Buradaki C_1 nümerik değeri 1,2 ve V_{fmax} nümerik değeri de 0,82 olarak alınabilir.

4.5.5 Çekme Hızı Parametresinin Modellenmesi

Çekme hızı pultrüzyonla plastik matrisli kompozit malzeme üretim yönteminde önemli bir yere sahip parametrelerden biridir. Pultrüzyonla kompozit malzeme üretimi esnasında çekme hızı parametresi çok rahatlıkla değiştirilebilen bir değer olmasına karşın bu değişikliğin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Düşük hızlarda pultrüzyonla kompozit malzeme üretimi daha kolaydır, fakat düşük hızlar üretim yapılmasının bir de verimlilik üzerindeki negatif etkisi düşünülmelidir. Yüksek çekme hızlarında üretim yapmak verimliliği arttıran bir durum olmasına karşın takviye malzemelerinin iyi ıslatılamaması problemiyle karşı karşıya kalılabilmektedir. (Rahatekar ve Roux ,2002)

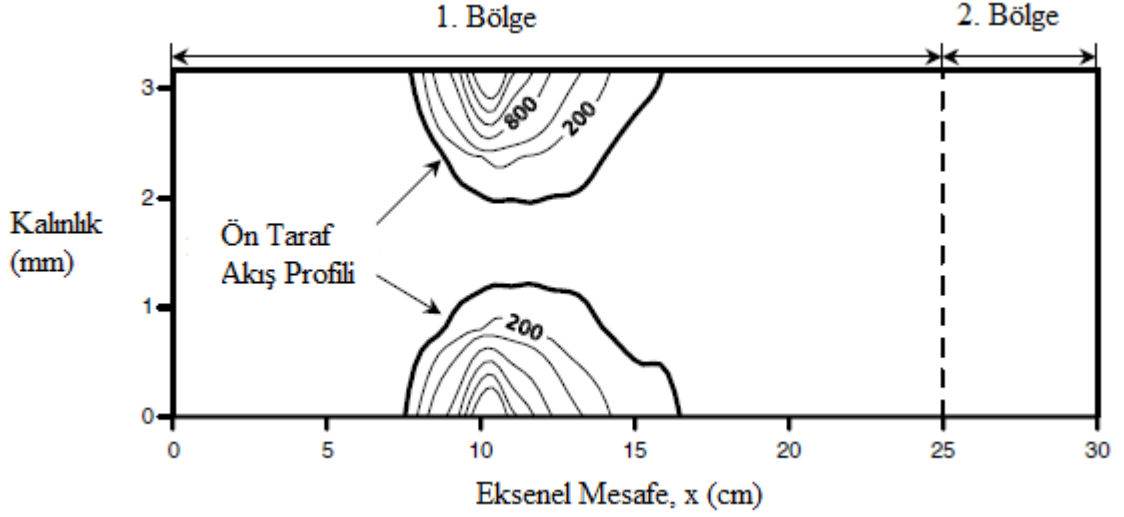
Tam bir ıslatmaya ulaşılabilmesi için bir enjeksiyon basıncı tam olarak uygulanması (fiberlerin reçine enjeksiyon ortamını terketmeden önceki hali için) aşağıda belirtilen çekme hızları için modellenmiştir.

- 0,050 m/sn
- 0,025 m/sn
- 0,020 m/sn
- 0,015 m/sn

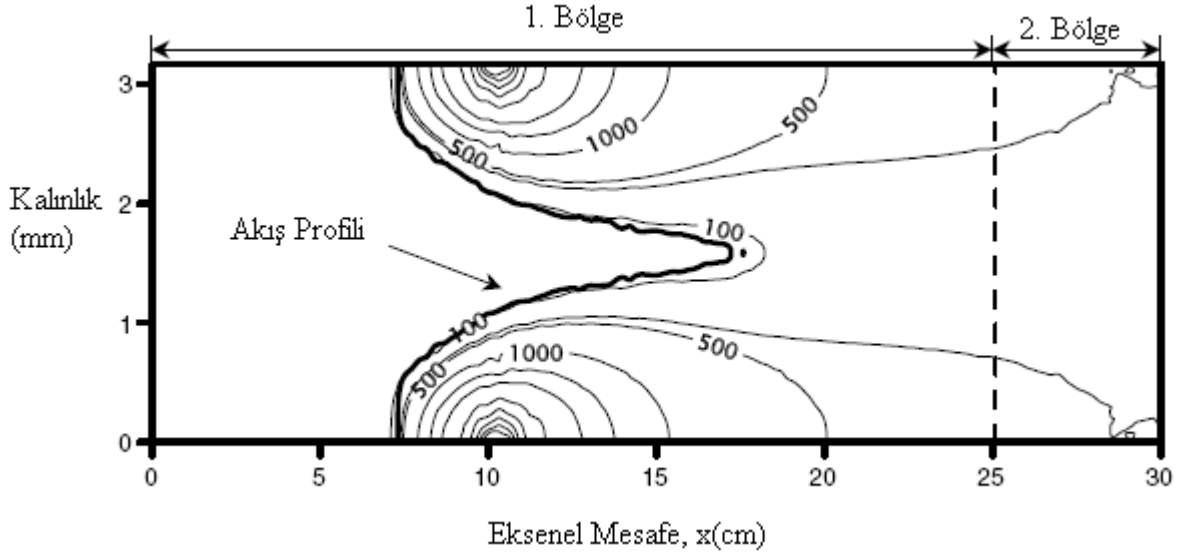
Çizelge 4.1 Farklı çekme hızı ve fiber hacim oranlarında enjeksiyon basıncı değişimi
(Rahatekar ve Roux ,2002)

No	Çekme Hızı (m/sn)	Viskozite (μ)	Fiber Hacim Oranı (%V _f)	Enjeksiyon Basıncı (EB,Mpa)
1	0,050	0,75	0,68	9,5
2	0,025	0,75	0,68	5,2
3	0,020	0,75	0,68	4,1
4	0,015	0,75	0,68	3,5
5	0,025	0,75	0,68	1,8
6	0,025	0,75	0,68	3,9
7	0,025	0,75	0,68	5,2
8	0,025	1,00	0,68	6,5
9	0,025	0,75	0,68	5,2
10	0,025	0,75	0,64	2,3

Şekil 4.4 ve 4.5'e bakılacak olursa, aynı fiber hacim oranları ve viskozite değerlerine sahip iki polyester reçine kalıp geçişi durumunda farklı çekme hızları uygulandığı takdirde buna bağlı olarak enjeksiyon basıncı değerleri de değişmektedir. 0,050 m/sn çekme hızına sahip olan 1 No'lu durumda enjeksiyon basıncı değeri 9,5 MPa iken, 0,025 m/sn çekme hızına sahip 2 No'lu durumda enjeksiyon basıncı değeri 5,2 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 4.4 Polyesterin izobasınç eğrilerinin gösterilişi,
($U=0,025$ m/sn, $V_f=0,68$, $EB=5,2$ Mpa)



Şekil 4.5 Polyesterin izobasınç eğrilerinin gösterilişi,
($U=0,050$ m/sn, $V_f=0,68$, $EB=9,5$ Mpa)

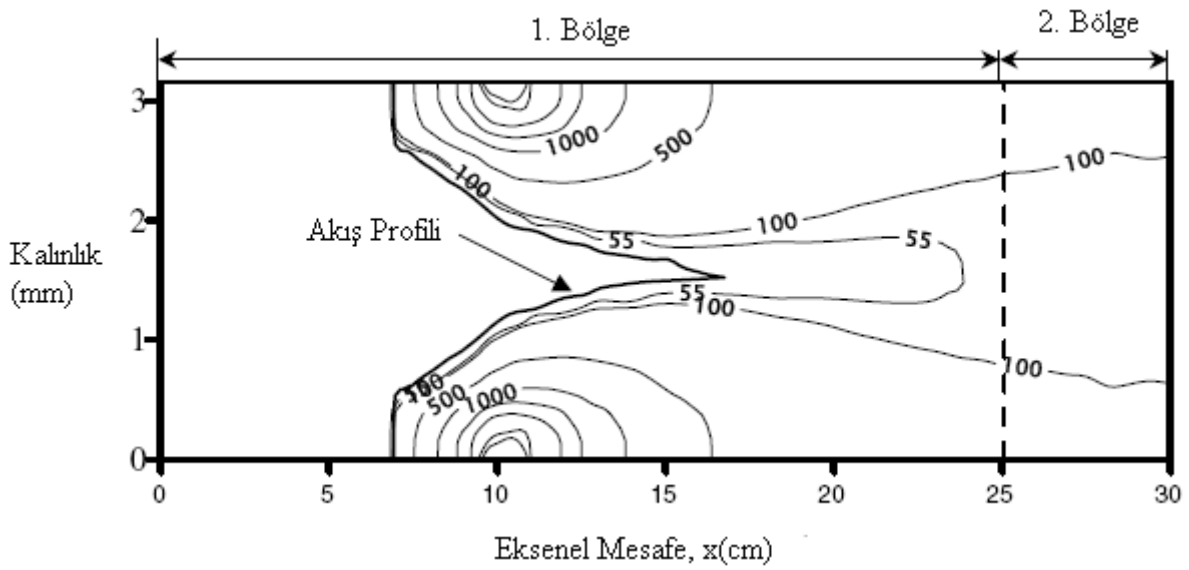
4.5.6 Fiber Hacim Oranının Etkisinin Modellenmesi

Fiber hacim oranını, kompozit malzemedeki toplam fiber hacminin, malzeme toplam hacmine oranı olarak tanımlamak mümkündür. Bölüm 4.5.5'te verilen reçine sistemi için, kompozit

Şekil 4.6 ve 4.7 gözönüne alındığı takdirde, aynı çekme hızı ve viskozite değerlerine sahip iki durumda, yükselen fiber hacim oranları enjeksiyon basıncının da artmasına neden olan bir durum teşkil etmektedir. (Rahatekar ve Roux ,2002)

4.5.7 Viskozitenin Etkisinin Modellenmesi

Reçine viskozite değeri de pultrüzyonla üretim esnasında kullanılan ve son değerlere etki eden önemli bir parametredir. Reçinenin viskozitesi; reçinenin tipine, sıcaklığına, doldurucunun tipine ve reçine karışımı hazırlanırken kullanılan doldurucunun miktarına bağlıdır. (Rahatekar ve Roux ,2002)

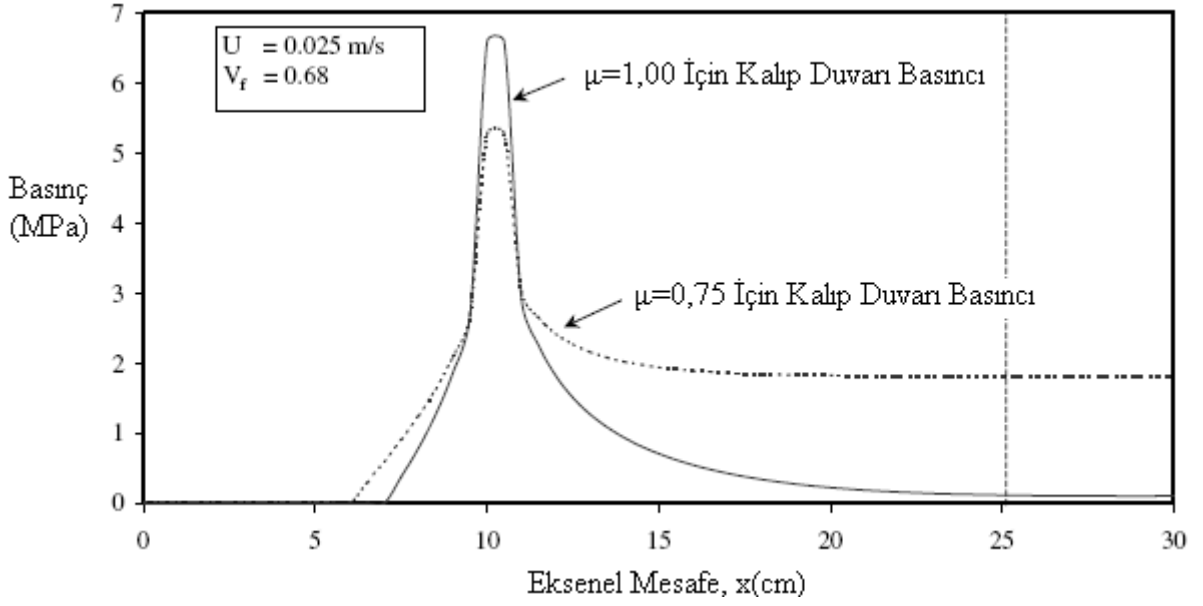


Şekil 4.8 Polyesterin izobasınç eğrilerinin gösterilişi,

($U=0,025$ m/sn, $\mu=1,00$, $V_f=0,68$, $EB=6,5$ Mpa)

Reçine kalıp girişinde ve enjeksiyon odası içindeyken, izotermal şartlar altında, sayısal hesaplamalarda reçine viskozite değeri sabit olarak alınır. Kompozit malzemelerin düşük viskozite değerlerinde üretilebilmesi daha kolaydır, fakat çok düşük viskozite değerli reçinelerle pultrüzyon işlemlerinde reçinenin kalıp girişinden sızması durumu söz konusu olabilir. Reçine viskozitesinin artması geri akışı engeller, fakat yüksek viskozite değerlerinde fiberlerin tam olarak ıslatılabilmesi kolay değildir. (Rahatekar ve Roux ,2002)

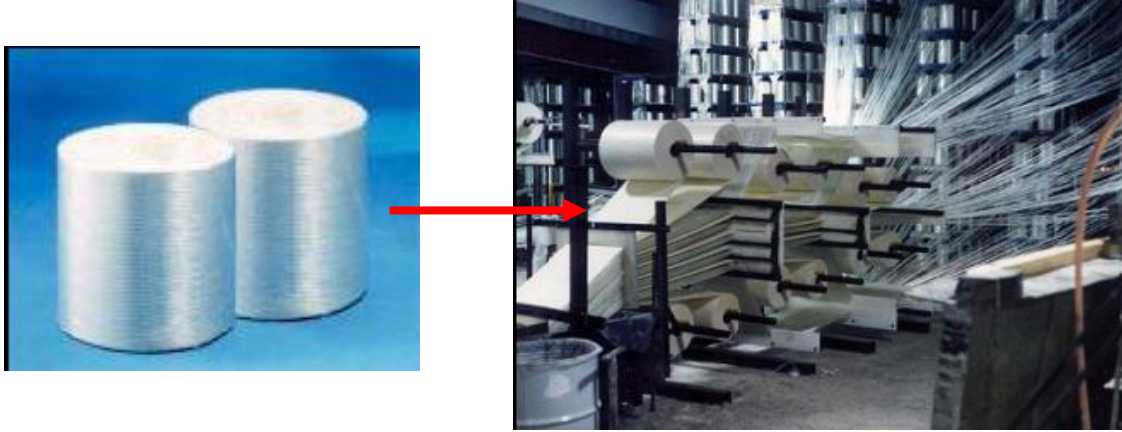
Şekil 4.8 ve 4.9'dan da anlaşılabileceği gibi aynı hacim oranları ve çekme hızlarına sahip reçine akışlarında, viskozite değeri arttıkça kalıp duvarına yapılan basınç değeri de artmaktadır, bu da enjeksiyon basıncına direk olarak etki ettiğinden bu değer de artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.9 Farklı viskozite değerlerinde kalıp duvarlarına yapılan basıncın etkisinin gösterilişi

4.6 Pultruziyonla Üretimde Kullanılan Başlıca Hammaddeler

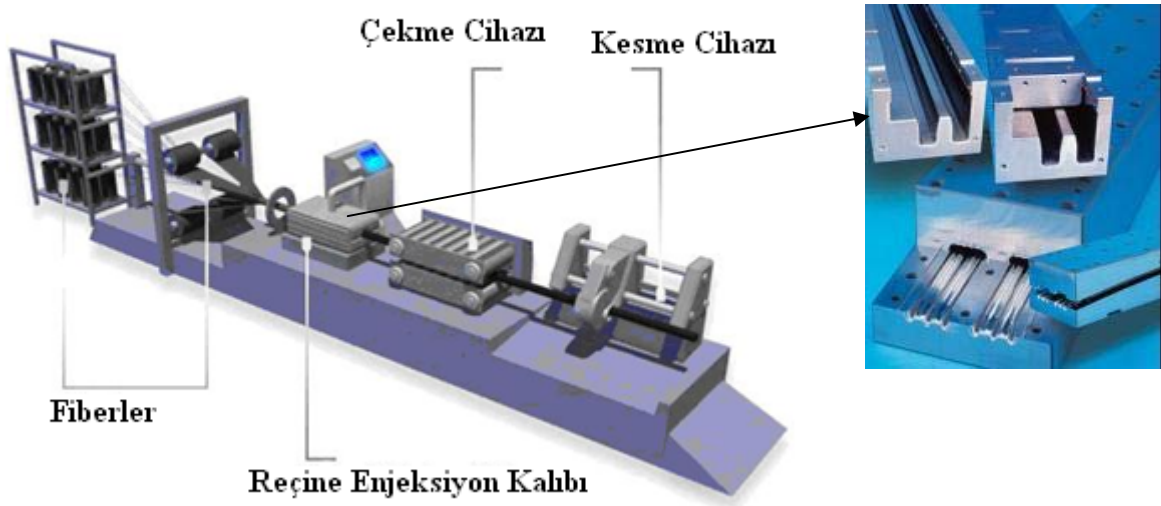
Pultruziyon yöntemi genellikle sürekli fiberleri kullanarak üretim yapan bir yöntemdir. E-camı, S-camı, karbon ve aramid takviye elemanı olarak kullanılıp, bunlar içinden en çok tercih edileni E-camıdır. Bu üretim prosesinde en çok tercih edilen matris malzemesi doymamış polyester reçinedir. Pultruziyon yöntemi yüksek performans/maliyet oranına sahip olduğu kadar da kolay bir prosestir. İleri özellikler için vinylester ve epoksi de kullanılabilir fakat bu reçinelerin prosesleri zorlaşmıştır. Ayrıca, bu reçinelerin reaktivitelerinden dolayı çekme hızları da daha düşüktür. Birçok farklı tipteki filler reçine içine eklenerek bu sayede yalıtım özellikleri, kimyasal direnç, yanmaya karşı direnç artırılıp bir yandan da maliyetinin düşürülmesi söz konusudur. Kalsiyum karbonat pultrude edilmiş ürünlerin maliyetini düşürmek için kullanılan bir eklentidir. Kalsiyum karbonat çok ucuz bir malzemedir ve SMC bileşimlerinde ana katkı maddesidir. Kalsiyum karbonat parçanın opaklığını artırır. (Atarsia ve Bokhili, 2000)



Şekil 4.3 Fiber makaralarından pultruzyon makinasına geçişi

4.7 Kullanılan Teçhizatlar

Pultruzyon prosesinde, çelik kalıplar reçine emdirilmiş fiberlerin istenen şekillere dönüştürülmesini sağlar. Kalıpların, boyları boyunca sabit bir kesit alanları vardır. Kalıplar, reçinenin tam veya bölgesel olarak kürlenmesini gerçekleştirebilmek amacıyla belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılırlar. Teçhizat maliyeti, hacim gerekliliği kadar parçanın karmaşıklığına olarak da değişen bir parametredir. Kalıpların maliyeti üretilecek parçanın boyutu ve kesit alanına bağlı olarak 4000\$-5000\$ arasında değişir. Kalıplar, montaj, demontaj, işleme ve krom kaplama açısından parçalı şekilde üretilir. (Atarsia ve Bokhili, 2000)



Şekil 4.4 Pultruzyon yönteminde kullanılan donanımların gösterilişi

4.8 Parça Yapımı

Pultruzyon yöntemi ile parça üretiminde, takviye elemanları olan sürekli fiber sarımlar reçine banyosunun içinden geçirilerek burada fiberlerin reçine emdirilmesi ve ıslatılması olayları gerçekleştirilir. Emdirme/ıslatma işlemi iki şekilde gerçekleştirilebilir. (Rahatekar, 2003)

İlk seçenek fiberlerin açık reçine banyosundan geçirilmesidir. Takviye elemanları yatay olarak veya yukarı ve aşağı hareket ettiren bir mekanizma ile reçine banyosu içinden geçirilebilirler. Eğilmenin istenmediği durumlarda fiberler yatay olarak geçirilir. Açık reçine banyosu ıslatması işlemi kolaylığı açısından daha çok tercih edilen yöntemdir. (Rahatekar, 2003)

İkinci seçenek ise reçinenin içine basınçlı olarak enjekte edildiği kovuk içinden fiberlerin geçirilmesi ile ıslatma/emdirme işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu yöntem farklı tipte kalıp kullanımına ihtiyaç duymaktadır, bu kalıplar dışarı doğru incelen yani konik biçimli kalıplardır. Bu metodun avantajlarına gelecek olursak; minimum stiren salınımı ve düşük reçine kayıpları olarak sayılabilir. Buna karşın, bu metod pahalı kalıpları gerektirmektedir. Önce takviye elemanları reçine emdirilir, bunlar sürtünmeye az duyarlıdır ve saç-metal ile kılavuzlanırlar. Genel olarak, kuru fiberlerin abrasif etkisine karşın seramik kılavuzlar kullanılmaktadır. Reçine emdirilen takviye elemanları daha sonra ısıtılmış kalıp içerisinden geçirilirler. Kalıbın girişinde çok az bir koniklik vardır daha sonrasında sabit bir kesit alanına sahiptir. Reçine kalıp içerisinden geçirilirken bir yandan da kürlenip katılaşıp. Kalıbın uzunluğu reçine reaktivitesine, parça kalınlığına ve üretim hızı gerekliliklerine bağlıdır. Reçinenin reaktivitesini yükseltirsek, kalıp uzunluğu ihtiyacını da azaltmış oluruz.

Pultruzyon yöntemi en ucuz maliyetli kompozit parça üretimine imkan sağlar çünkü bu yöntemde prepreg ve dokumaya oranla daha ucuz olan fiber ve reçine kullanılarak üretim gerçekleştirilmektedir. Pultruzyon prosesi sürekli bir üretim tekniği olduğu için istenen boyutta parça imaline de uygundur. Üretilen parçalar otomatik testerelerle veya bıçaklarla önceden belirtilmiş boylarda kesilerek üretim gerçekleştirilebilir. (Atarsia ve Bokhili, 2000)

4.9 Pultruzyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Pultruzyon yöntemi aşağıda sayılan avantajlarıyla bir otomatikleşmiş bir yöntemdir;

- Sürekli bir prosestir ve nihai ürün elde edilene kadar otomatikleşmiş bir yöntemdir.
- Yüksek-hacimli parçaların üretimine imkan veren bir üretim yöntemidir. Genellikle üretim hızları 2-10 ft/dk (60.96-304.8 cm/dak) arasında değişir.

- Ucuz fiber ve reçine sistemleriyle üretim gerçekleştirebildiği için ucuz maliyetli ürünlerin de üretimine fırsat verebilmektedir.

Pultrude parçalar ucuz maliyetlerinden dolayı büyük oranda alt yapı, binalar ve tüketici ürünleri gibi yerlerde kullanım alanı bulmaktadırlar. Buna rağmen, pultrüzyon yönteminin de bazı sınırlandırmaları vardır;

- Bütün boyu boyunca sabit kesit alanına sabit parçaların üretimi için uygun olan bu yöntemle konik veya karmaşık şekilli parçaların imali söz konusu değildir.
- Bu yöntemle iç ve dış boyutlandırmalarında yüksek-toleranslı parçalar üretilemez
- İnce duvarlı parçalar üretilemez.
- Fiber açıları ve pultrude parçaları 0 derece ile sınırlandırılmıştır. Örgüler kullanılarak farklı açılı özellikler elde edilebilmektedir.
- Kompleks yüklemeler gerektiren parçalar bu yöntemle üretilemez çünkü genellikle bu yöntemle üretilen parçaların özellikleri eksenseldir.

Çizelge 4.2 Pultrude CTP'lerin diğer malzemelerle karşılaştırma tablosu

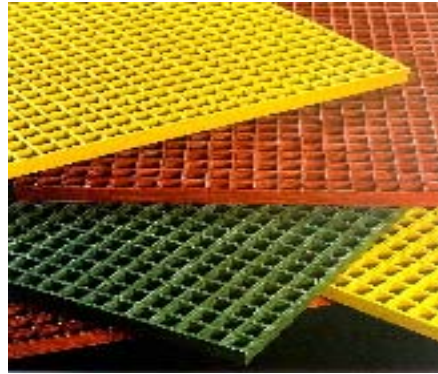
(www.armaplast.com.tr)

Fiziksel&Kimyasal Özellikler	Pultrude FRP	Rijit PVC	Yumuşak Çelik	Paslanmaz Çelik	Odun
Özgül Ağırlık	1,8	1,38	7,8	7,92	0,52
Isıl Geçirgenlik (Kcal/hr/m ² /° C)	24,4	6,4	1220	732	0,4
Lineer Genleşme Katsayısı (cm/cm° C) x 10 ⁻⁶	5.2	37	8	10	1.7
Güvenli Çalışma Sıcaklığı (° C)	130	55	600	600	160
Mekanik Özellikler	Pultrude FRP	Rijit PVC	Yumuşak Çelik	Paslanmaz Çelik	Odun
Çekme Dayancı (Mpa)	382	44	340	340	80
Eğilme Dayancı (MPa)	468,3	70	380	380	12
Eğilme Modülü	22489	2400	196000	196000	700
Izod Darbe Dayancı (Kg.m/cm)	2,15	0.09	1,5	0,53	-

Korozyon Dayanımı	Pultrude FRP	Rijit PVC	Yumuşak Çelik	Paslanmaz Çelik	Odun
Asidik	Çok İyi	İyi	Kötü	Çok iyi	Kötü
Alkali	İyi	Uygun	İyi	Çok iyi	Kötü
Solvent	Uygun	Kötü	İyi	Çok iyi	Uygun
Deniz Kıyısı Ortamları	Çok iyi	İyi	Kötü	Çok iyi	Uygun
Dış ortama maruz	Çok iyi	Kötü	Uygun	Çok iyi	Uygun
Atık su ortamı	Çok iyi	İyi	Kötü	Çok iyi	Uygun
Buhar	İyi	Kötü	Uygun	Çok iyi	Uygun

4.10 Pultruzyon Yönteminin Uygulama Alanları

Pultruzyon yöntemi sabit kesit alanlı katı ve içi boş parçaların üretiminde geniş bir üretim yelpazesine sahip bir yöntemdir. En çok uygulama aldığı yerleri sıralayacak olursak; direk, kanal, tüp, boru, ızgara sistemleri, yürüme yolları ve köprüler, merdiven vs şeklinde sıralayabiliriz. Pultrude edilmiş yapılar ayrıca; altyapı, otomotiv ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Izgara sistemleri, hafif, kalıcı, dayanıklı ve kolay kurulum yapılabilen yapılardır. Aşağıdaki resimde de görülebileceği gibi, iletken olmayan fiber cam kaplamalarla hızlı transfer imkanı sağlayan yüksek-voltajlı tırabzan sistemleri kullanılabilir.



Şekil 4.10 Pultruzyon yöntemiyle üretilmiş bazı örnekler (www.armacplast.com.tr)

Pultruzyon yönteminin diğer en çok kullanım alanı bulunduğu sektörleri verecek olursak;

- Dekoratif uygulamalar
- Korkuluk ve merdiven sistemleri
- Izgara ve deck sistemleri

- Pergolalar
- Tank ve silolar
- Boru ve bağlantılar
- Gaz temizleme kuleleri ve kanallar
- Arıtma ve eloksal üniteleri
- Kültür balıkçılığı uygulamaları, şeklinde sayılabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bilindiği gibi plastik matrisli kompozit malzemeler su siloları, tanklar vs. yanı sıra atmosfere açık ortamlarda çok yaygın bir şekilde uygulama alanı bulabilmektedir. Bu durumda atmosfere açık ortamın yaratabileceği olumsuz durumlara karşı bu plastik matrisli kompozit malzemelerin davranışları önem arz etmektedir.

Atmosfere açık ortamda başına gelebilecek olumsuzlukların deney ortamında ele alınarak malzeme nihai mekanik özelliklerine ne şekilde etki edeceğini görebileceğiz. Bu nedenle atmosfer ortamında en çok maruz kalacağı yağmur ve güneş ışığını deneysel olarak simüle edebilmek için su absorpsiyonu ve UV-A ışığı altında pultrude malzemelerde meydana gelen mekanik özellik değişimleri incelenenektir. Çekme hızlarının farklı farklı olabildiği pultrüzyon işlemlerinde mekanik özellik değişimleri de çekme, eğme ve darbe deneyleriyle tatik edilerek deneysel bölümde yer almaktadır.

5.1 Deney Numunelerinin Tedarik Edilmesi

Deneylerim esnasında kullandığım numuneleri pultrüzyonla kompozit malzeme üreten Armaplast Kompozit ve Plastik ve Pul-tech FRP kompozit firmalarından sağladım. Her iki firma da polyester matrisli ve E-camı takviyeli pultrude mamüller üreten firmalar olup numune tedarik sürecimde bana son derece yardım olmuşlardır.

5.1.1 Armaplast Kompozit ve Plastik

1986 yılında Türkiye’de kurulmuş Armaplast Kompozit ve Plastik, pultrüzyon profillerinin, depolama ve arıtma tanklarının, kültür balıkçılığı ekipmanlarının ve diğer müşteri odaklı projelerin üretimi konusunda uzman ve lider bir üreticidir. Firma İstanbul’a yakın bir şehir olan Kocaeli’nin endüstriyel bölgesi ve limanı Dilovası-Gebze’de 7000m² açık, 5000m² kapalı, toplam 12000m² bir tesiste 60’ın üzerinde bir ekiple hizmet vermektedir. Armaplast, ISO 9001:2002 sertifikası ile kalitesi onaylanmış, kurulduğu günden beri müşteri memnuniyetini ön planda tutmuş ve bunda başarılı olmuş, tanınan, güvenilir bir Türk markasıdır. Yüksek kaliteli ürünleri, avantajlı fiyatları ve ömür boyu süren satış sonrası desteği ile Armaplast olarak yurt içinde ve yurt dışında iş ilişkilerini geliştirmeyi amaçlayan büyük ve önemli bir firmadır. (www.armacplast.com.tr)

5.1.2 Pul-Tech FRP

5.1.3 Pul-Tech FRP, 2004 yılında Uşak'ta kurulmuştur. Uşak Karma Organize Sanayi Bölgesinde 26.000m² alan üzerine kurulu tesislerimizde pultrüzyon, sıcak kalıplama, el yatırması gibi üretim sistemleriyle kompozit malzeme imalatı gerçekleştirmektedir.

Ayrıca İstanbul'da pazarlama faaliyetleri yürüten bir ofisi bulunmaktadır. Tüm faaliyetleri ISO 9001-2000 kalite standartlarına uygun olarak yürütülmektedir. (<http://www.pultechfrp.com>)

5.2 Numune Özellikleri

Tüm deneylerim boyunca kullandığım pultrude ürünlerin hepsindeki cam elyaf takviye malzemesi ve polyester reçine matris malzemesi aynı olup detaylı özellikleri bölüm 5.2.1 ve bölüm 5.2.2'de verilmektedir.

5.2.1 Takviye Malzemesi Özellikleri

Bilindiği gibi kompozisyonlarına bağlı olarak değişik cam elyafı cinsleri vardır. Bunlar içinde “E” camı elyafının en başta geldiği görülmektedir. Elektrik ve mekanik özellikleri ile maliyetinin iyi bir denge oluşturması sonucu bu kalsiyum alüminosilikat bileşiminin, kullanılan toplam cam elyafı takviye malzemeleri içinde %90 pazar payına da sahip olduğu görülmektedir. Deneylerimizde de kullanılan cam elyafın tipi E-camı olarak seçilmiştir. Şimdi kullanılan E-camının özelliklerini tablolar ile verecek olursak;

Çizelge 5.1 Kullanılan E-camının yüzde ağırlıkça içeriği (www.camelyaf.com)

Kompozisyon	Ağırlıkça Yüzde
Silika (SiO ₂)	53-57
Alümina (Al ₂ O ₃)	12-15
Kalsiyum Oksit (CaO) + Magnezyum Oksit (MgO)	22-6
Boron Oksit (B ₂ O ₃)	5-8
F ₂	0-0.06
Na ₂ O+K ₂ O	<1
Fe ₂ O ₃	=0.5

Çizelge 5.2 Kullanılan E-camının fiziksel özellikleri (www.camelyaf.com)

Özellik	Değer
İşlenmemiş Haldeki Lifin Çekme Dayancı	3400 Mpa
Elastiklik Modülü	72.4 GPa
Yapışkanlık	Min. 50 cN/Tex
Poisson Oranı	0.2

Çizelge 5.3 Kullanılan E-camının ısı özellikleri (www.camelyaf.com)

Özellik	Değer
Yumuşama Nok. (Littleton)	840 °C
Isıl iletkenlik Sabitesi	1.0 W/m. °K
Isıl Genleşme Lineer sabitesi	$5.3 \cdot 10^{-6}$ m/m/ °C
Spesifik Isı	0.764 @ 20 °C J/g. °K 0.958 @ 200 °C

Çizelge 5.4 Kullanılan E-camının elektriksel özellikleri (www.camelyaf.com)

Özellik	Değer
1 MHz teki Dielektrik Özelliği	6.4
Hacim Özdirenci	$10^{14} - 10^{15}$ Ohm.cm
Yüzey Özdirenci	$10^{13} - 10^{14}$ Ohm.cm
Poisson Oranı	0.2
Elektriksel Rijitlik	8-12 V/mm

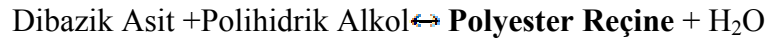
Çizelge 5.5 Kullanılan E-camı ham liflerinin termal dayançları
(www.camelyaf.com)

Sıcaklık °C	Kalıntı Gerilim (%)
-200	100
300	82
400	65
500	46
600	14
700	-

5.2.2 Matris Malzemesi Özellikleri

Tüm pultrude deney numunelerimizin matris malzemesi izoflatik NPG bazlı polyester reçine olarak seçilmiştir. Polyester reçine, takviyeli plastikler içinde en yaygın olarak kullanılan termoset reçinedir. El yatırması gibi basit kalıplama tekniklerine kadar her türlü kalıplama tekniğine hitap eden polyester reçineler, pultrüzyonla plastik matrisli kompozit üretiminde de yaygın olarak matris malzemesi olarak yer almaktadır.

Polyester reçineler, çok geniş bir kimyasal aileyi kapsar ve genel olarak dibazik asitlerle polihidrik alkollerin kondensasyon reaksiyonu sonucunda elde edilirler. Polyester reçine oluşum reaksiyonunu şu şekilde verebiliriz;



Çizelge 5.6 Sıvı haldeki polyester reçinenin özellikleri (www.camelyaf.com)

Özellikler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Görünüm		Berrak
Viskozite	Cps	1000 +/- 150
Asit Sayısı	mgKOH/g	26.0-34.0
Katı Madde Miktarı	%	Min. 65
Jelleşme Süresi (25 °C)	dak.	4 +/- 1
Egzoterm Pik	°C	190 +/- 15
Stabilite	ay	3

(*) Jelleşme süresi ve "Egzoterm Pik" tayini 50 mm çapında bir beherglassa konan 100 g reçineye 25°C'de % 0.25 oranında % 6'lık Kobalt Naftanat ve % 2 oranında % 50 aktif Metil Etil Keton Peroksit ilave edilmesinden sonra yapılır.

Çizelge 5.7 Sertleştirilmiş polyester reçinenin özellikleri (www.camelyaf.com)

Özellikler	Birim	Spesifikasyon Degerleri
Sertlik	* Barcol	Min. 45
Eğme Dayancı	Kgf/cm ²	Min. 850
Çekme Dayanımı	Kgf/cm ²	Min. 500

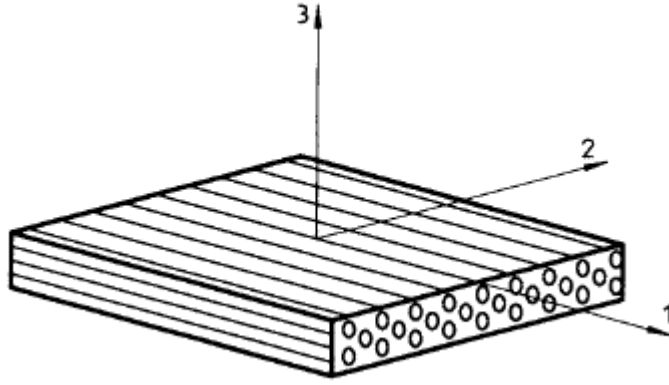
5.3 Pultrude Profillerin Çekme Özelliklerinin Tayini

5.3.1 Deneyin Amacı

Deneyimizde, farklı çekme hızlarıyla üretilmiş pultrude cam elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerin nihai çekme dayancı değerlerinin değişimini inceleyerek çekme hızlarının optimizasyonunun sağlanması amaçlanmaktadır.

5.3.2 Deney Standardı ve Teorik Bilgi

Çekme deney şartlarımız ve numunelerin hazırlanışı TS EN ISO 527-5, Türk standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1 Simetri eksenleri gösterilmiş tek yönlü takviyeli plastik kompozit

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas dizayn bilgilerini saptamak ve malzemelerin özelliklere göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulandığında, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilir.

Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki mekanik özellikler bulunabilir.

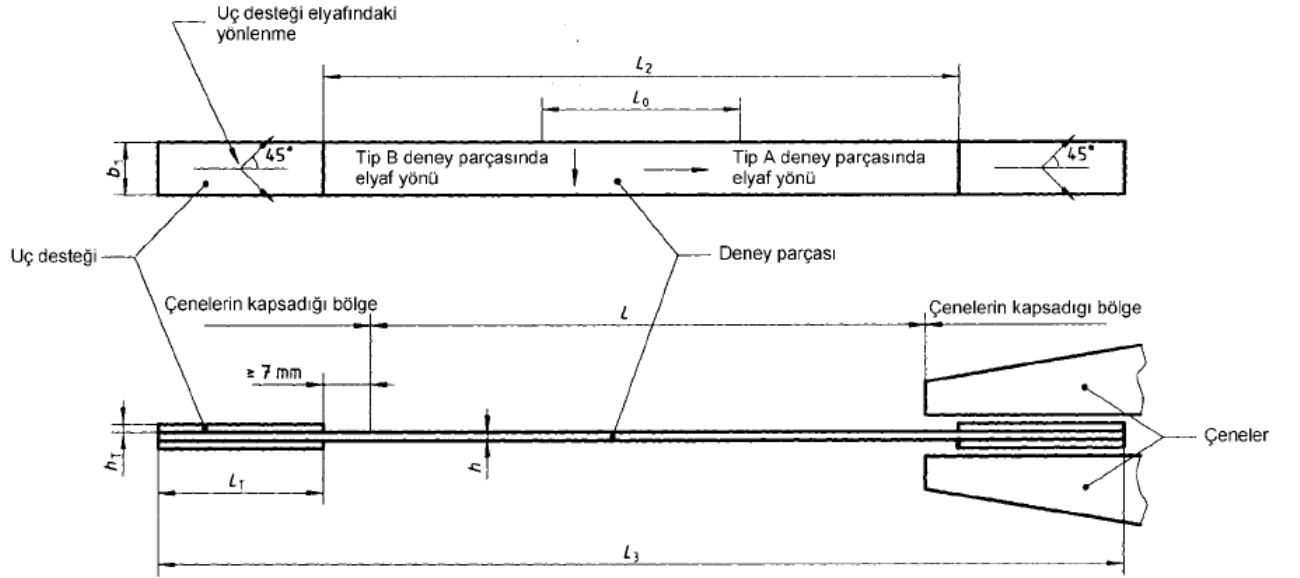
- a. Elastisite modülü
- b. Elastik sınırı
- c. Rezilyans
- d. Akma gerilmesi
- e. Çekme dayanımı
- f. Tokluk
- g. % uzama
- h. % kesit daralması

5.3.3 Deney Parçaları

Tip B deney parçasının genişliği $25 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, toplam uzunluğu 250 mm ve kalınlığı $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ olmalıdır. Her bir münferit deney parçasının kenarları $\pm 0,2 \text{ mm}$ toleransla birbirine paralel olmalıdır.

Çizelge 5.8 Çekme numunesi fiziksel boyutları

Boyut	Açıklama	Ölçü (mm)
L3	Toplam uzunluk	$250^{1)}$
L2	Uç destekleri arasındaki mesafe	150 ± 1
b1	Genişlik	$25 \pm 0,5$
h	Kalınlık	$2 \pm 0,2$
Lo	Ölçme uzunluğu	50 ± 1
L	Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi (nominal)	136
LT	Uç desteklerinin uzunluğu	$50^{1)}$
hT	Uç desteklerinin kalınlığı	$0,5 - 2$

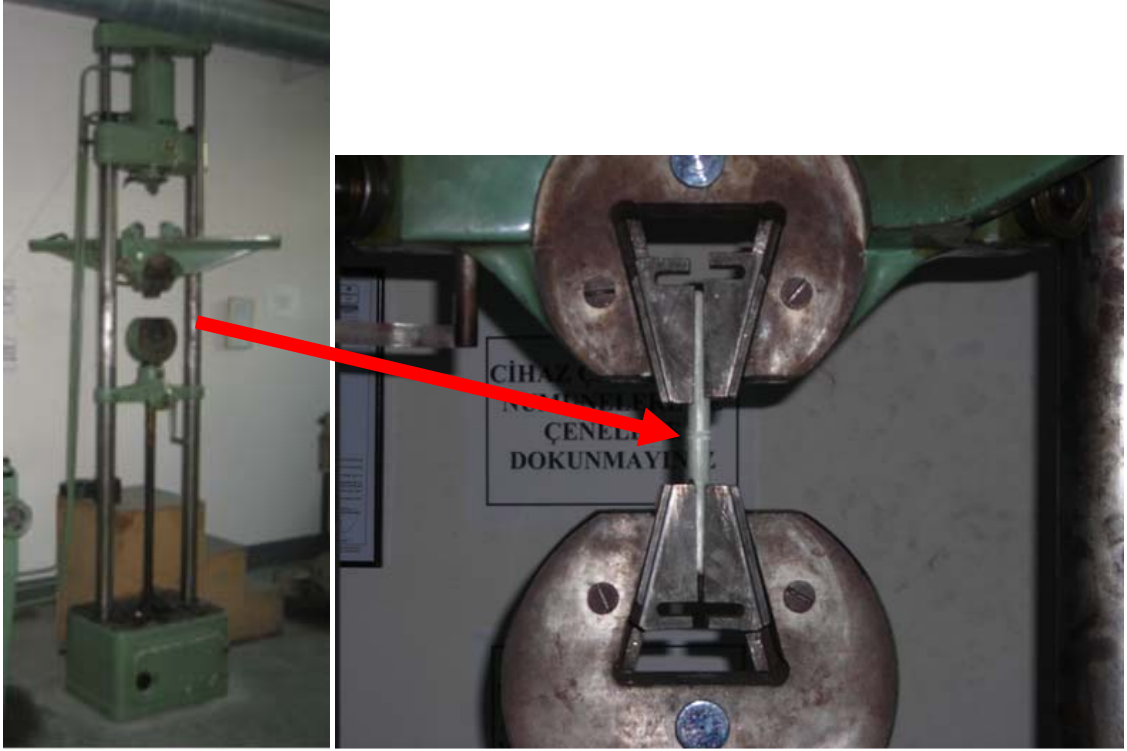


Şekil 5.2 Çekme deney numunesinin şematik gösterilişi

5.3.4 Değerler ve Hesaplamalar

Farklı çekme hızlarıyla üretilmiş pultrude profillerimiz ve bunların çekme dayanç değerleri 5.1 nolu eşitlik kullanılarak, 5.8 no'lu çizelge yer alan değerler elde edilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{b.h} \quad (5.1)$$



Şekil 5.3 Çekme deney numunelerinin çekme cihazında test edilişi

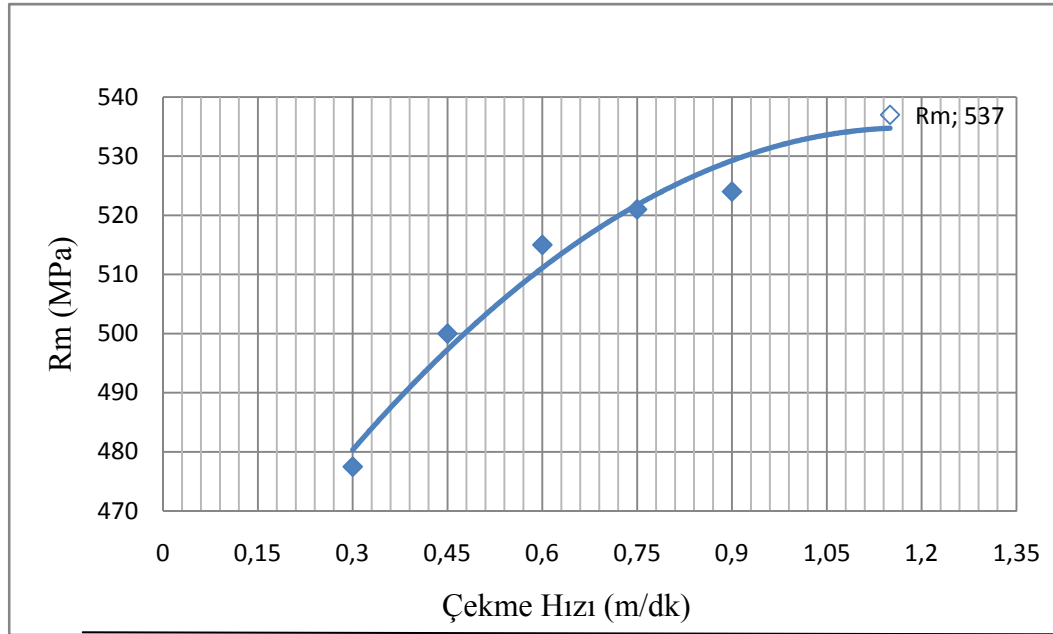


Şekil 5.4 Çekme testi sonunda deforme olmuş numunelerin gösterilişi

Çizelge 5.9 Çekme testi sonuçları

Numune /çekme hızı	Boyutlar d_0 (mm)	A_0 (mm ²)	F_{max}		R_m (Mpa)	R_{mort} (Mpa)
			(kp)	(N)		
1-A/ 0,33 m/dk	10,65	89,1	3850	37730	423,4	477,5
1-A/ 0,33 m/dk	9,32	68,2	3700	36260	531,6	
2-A /0,45 m/dk	8,31	54,2	2.720	26.656	491,0	500,0
2-A /0,45 m/dk	9,40	69,3	3.600	35.280	509,9	

3-A /0,60 m/dk	9,96	78,0	4.220	41.356	530,0	515,5
3-A /0,60 m/dk	9,72	74,2	3.800	37.240	501,0	
4-A /0,75 m/dk	9,45	54,2	2.720	26.656	491,0	521,9
4-A /0,75 m/dk	9,02	69,3	3.600	35.280	509,9	
5-A /0,90 m/dk	8,10	51,5	2.779	27.243	529,0	524,5
5-A /0,90 m/dk	8,30	54,1	2.145	28.135	520,0	
6-A /1,15 m/dk	6,90	37,4	2.060	20.192	540,0	537,5
6-A /1,15 m/dk	7,08	39,3	2.145	21.025	535,0	



Şekil 5.5 Çekme hızıyla çekme dayanıcının değişiminin gösterilişi

5.3.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

Tablo'dan da görüldüğü üzere pultrude profillerin çekme hızlarına bağlı olarak çekme dayançları 0,6 m/dk değerine kadar nispeten hızlı bir artış gösterirken 0,6 ile 0,9 m/dk değerleri arasında düşük bir artış hızı göstermiştir.

Sanayide 0,6 m/dk'dan çok da yüksek hızlara çıkılamadığından dolayı mümkün olan bu değerler civarında üretilebilen profillerden optimum çekme dayanıcı değerlerine ulaşabilmek mümkündür.

5.4 Pultrude Profillerin Eğilme Özelliklerinin Tayini

5.4.1 Deneyin Amacı

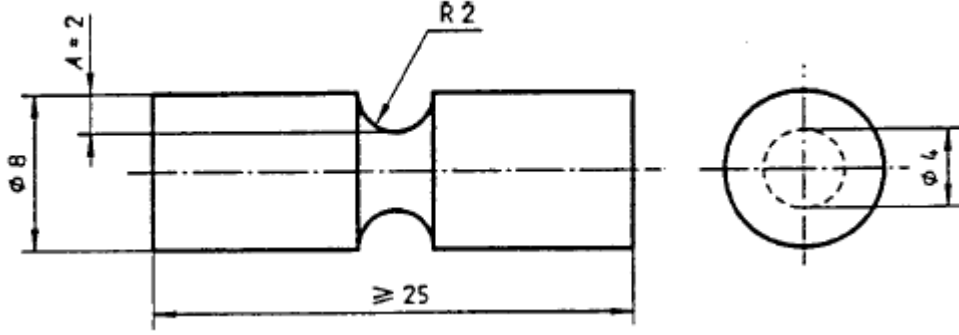
Tıpkı çekme dayanıcı deneyimizde olduğu gibi bu deneyimizde de farklı çekme hızlarına sahip olan numunelerimizi bu sefer 3 noktadan eğerek eğme dayançlarına ulaşacağız.

5.4.2 Deney Standardı ve Teorik Bilgi

3 nokta eğme deney şartlarımız ve numunelerin hazırlanışı TS 4650-2 EN ISO 3597-2, Türk standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.4.2.1 Deney parçaları

Yük uygulayıcı ve destekler çelik çubuklardan yapılmış ve deney parçasının iyi bir şekilde yerleştirilebilmesi için orta kısımlarına oluk açılmış olmalıdır. Deney parçasının çevresinin yarısıyla tam temasta olabilmeleri için, yük uygulayıcısı ve desteklerin ortasındaki oluğun çapı deney parçasının çapına eşit olmalıdır. 4 mm çapındaki bir deney parçası için uygun yük uygulayıcısı ve destek Şekil 1.de gösterilmiştir. Deney parçasının destekler arasındaki boyu, çapının 16 katı olmalıdır.



Şekil 5.6 Eğme numunesinin şematik gösterilişi

5.4.3 Değerler ve Hesaplamalar

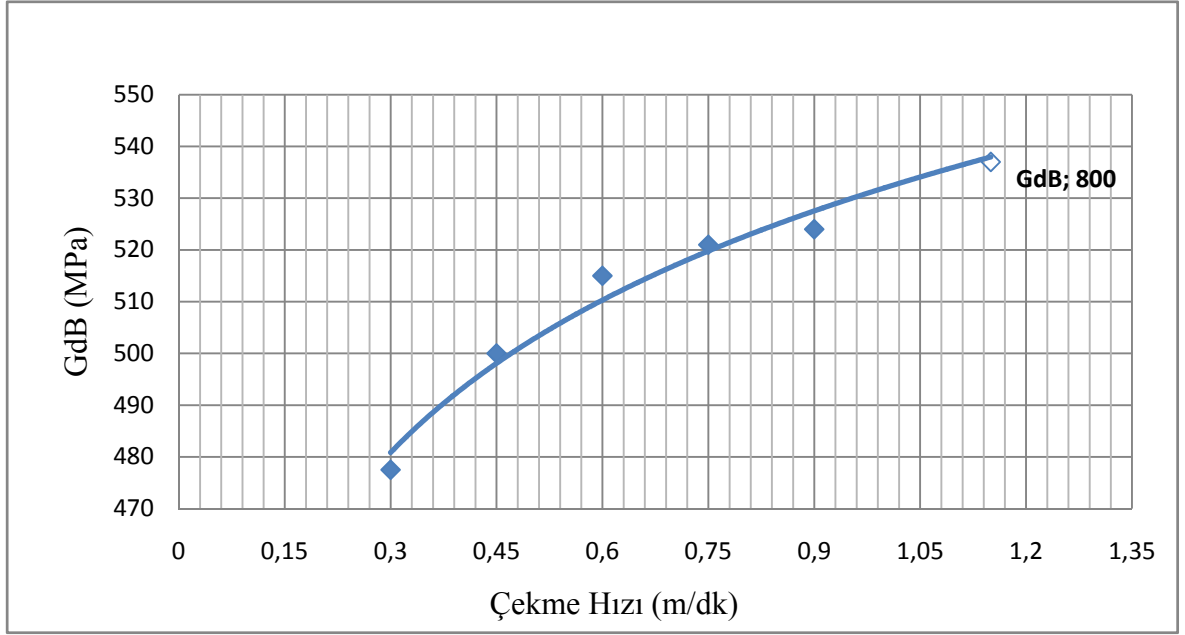
Standarta uygun olarak hazırlanan numuneler görüldüğü gibi 3 nokta eğme deneyine tabi tutularak değerler elde edilir



Şekil 5.7 Eğildikten sonraki numunenin aldığı şekil

Çizelge 5.10 Eğme testi sonuçları

Numune /çekme hızı	Boyutlar d_0 (mm)	F_{max}		G_{dB} (Mpa)
		(kp)	(N)	
1-A / 0,33 m/dk	11,70	410	4.018	553,7
2-A / 0,45 m/dk	11,75	420	4.116	635,4
3-A / 0,60 m/dk	11,75	360	3.528	680,0
4-A / 0,75 m/dk	11,77	415	4.067	720,0
5-A / 0,90 m/dk	9,90	300	2.940	771,6
6-A / 1,15 m/dk	8,75	215	2.107	800,0



Şekil 5.8 Çekme hızıyla eğme dayancının değişiminin gösterilişi

5.4.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

Çekme dayancına oranla daha lineer bir artış gösteren eğme dayançları değerleri bize yine çekme hızının artışının mekanik özelliklere etkisinin olduğunu göstermektedir. Çekme hızı 1 m/dk değerlerinin üstüne çıkmasına karşın halen artışını gösterebilmektedir.

5.5 Pultrude Profillerin Darbe Özelliklerinin Tayini

5.5.1 Deneyin Amacı

Charpy darbe deneyinde amaçlanan, pultrude malzemenin bünyesinde muhtemelen bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, pultrude malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir.

5.5.2 Deney Standardı ve Teorik Bilgi

Charpy darbe deney şartlarımız ve numunelerin hazırlanışı TS EN ISO 179-2 , Türk standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilim meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilimin etkisi ile olur. Numunenin kırılabilmesi için bu dik (normal) gerilimin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif dayanımdan fazla olması gerekir. Numune, plastik biçim değiştirmeğe fırsat bulamadan bu hal meydana gelirse, buna gevrek kırılma denir. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir.(teknolojikarastirmalar.com)

Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik biçim değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal (dik) gerilime ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilimi etki etmeğe başlar. Kayma gerilimi, kayma dayanımını (kritik kayma gerilimi) aştığı an, elastik (esnek) özellik sona erer ve plastik biçim değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik biçim değiştirme, daha sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştedir. (teknolojikarastirmalar.com)

Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi başka bir deyimle, darbe direncini verir. Bu enerji aşağıdaki formülle de gösterilebilir:

$$\text{Kırılma enerjisi} = G (h - h_1) = G.L. (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (5.2)$$

G = Sarkacın ağırlığı (kg)

L = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_1 = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

α = Düşme açısı (derece),

β = Yükseliş açısı (derece),

Darbe direnci (kg-m) veya (kg-m/cm²) cinsinden ifade edilmektedir.

Deney esnasında önce sarkaç, daha önce tespit edilen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarılır. Daha sonra numune, uygun bir şekilde yerleştirilir. Örneğin, en çok uygulanan Charpy deneyinde numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi 0,5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu

durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanabilir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunur.

5.5.3 Değerler ve Hesaplamalar

Standarta uygun olarak hazırlanan numuneler görüldüğü gibi charpy darbe deneyine tabi tutularak değerler elde edilir.



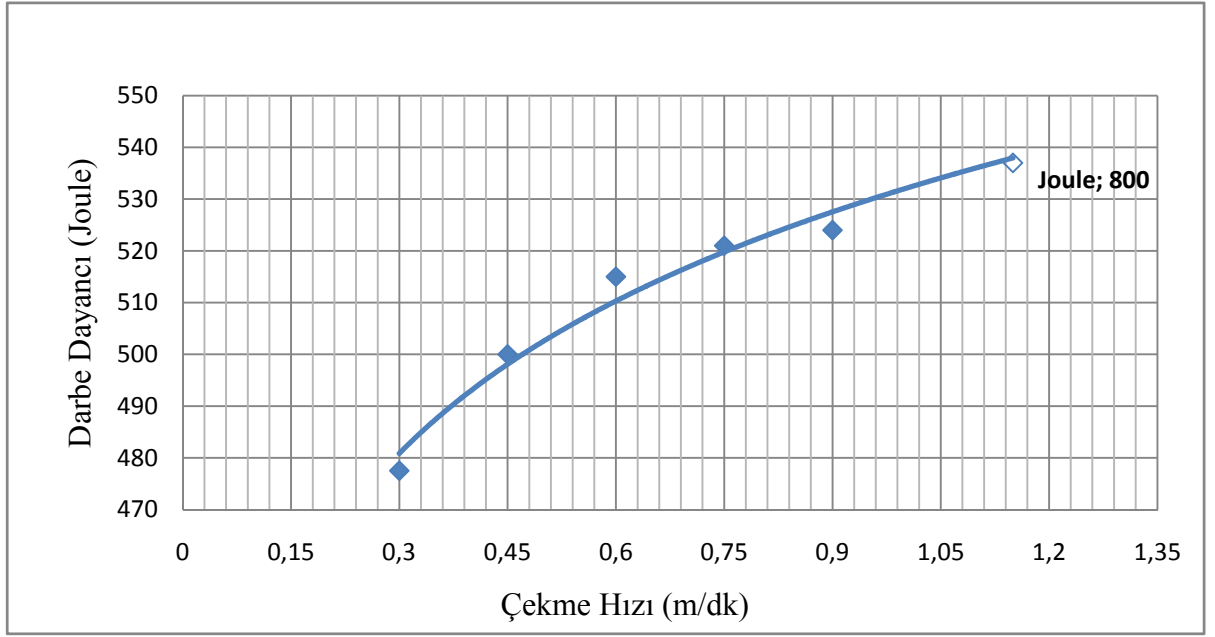
şekil 5.9 Darbe dayancı lme aleti



şekil 5.10 Darbe testinden sonraki numunenin aldığı hal

Çizelge 5.11 Darbe testi sonuçları

Numune /çekme hızı	Boyutlar d_0 (mm)	Darbe Dayancı (Joule)
1-A / 0,33 m/dk	11,70	9,9
2-A / 0,45 m/dk	11,75	15
3-A / 0,60 m/dk	11,75	26,7
4-A / 0,75 m/dk	11,77	32,8
5-A / 0,90 m/dk	9,90	34,6
6-A / 1,15 m/dk	8,75	37,9



Şekil 5.11 Çekme hızıyla darbe dayancı değişiminin gösterilişi

5.5.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

Çentik darbe deneyimizde gözle görülür bir şekilde çekme hızıyla darbe dayancının arttığını görebilmekteyiz. Burada dikkat edilmesi gereken 0,15 m/dk'lık artışlarla gidilirken 0,60 m/dk değerinden 0,90 m/dk değerine kadar yavaşlayan bir hızla artması ve daha sonrasında 0,25 m/dk'lık bir çekme hızı artışından sonra bile az bir miktar dayanç artış göstermesidir. Bu da bize üretim parametre optimizasyonunda çok yüksek hızlara çıkılmadan 0,60 m/dk değerlerinde optimuma yaklaştığımızı göstermektedir.

5.6 UV Işığına Maruz Kalan Pultrude Malzemelerin Özellik Değişiminin Tayini

5.6.1. Teorik Bilgi

5.6.1.1 Ultraviyole Işını Tanımı

Ultraviyole ışınların varlığı ilk defa 1801 yılında Ritter adındaki Alman fizikçisi tarafından tespit edilmiştir. Ritter X ışığının kimyasal maddelere etkisini incelerken mor ışığın ötesindeki karanlık bantta enerji çıkışının olduğunu fark etmiştir. Görünen ışın ile mor ötesi ışınların arasındaki sınır radyasyonun dalga boyu 4000 Angstrom (1 angstrom= 10^{-8} cm) olarak kabul edilir. Ancak bu sınır, yaşa göre değişir. Genç kimseler mor ötesi bölgesine âit olan 3130 Angstrom (A°) luk dalga boylu radyasyonları görebilirler. Ultraviyole ışın bandı kabaca üç bölgeye ayrılır: 4000-3000 A° arasındaki “yakın” bölge, 3000-2000 A° arasındaki “uzak” bölge ve 2000-40 A° arasındaki “vakum” ultraviyole bölgesi. Ultraviyole ışınların en büyük kaynağı güneştir. (<http://ansiklopedi.turkcebilgi.com>)

Güneşten yayılan enerjinin yaklaşık % 9’u ultraviyole radyasyonudur. Bunun da ancak % 14’ü 3000 A° dan küçük dalga boylu bölgeye aittir. Güneşten gelen mor ötesi ışınların yarıdan fazlası atmosferde tutulur. Atmosferde tutulan (absorbe olan) radyasyonun ekserisi küçük dalga boylu radyasyonlardır. Öyle ki, 3000 A° olan küçük dalgaboylu ışınlar, yeryüzüne hemen hemen hiç gelmez. Ultraviyole ışınlar görünen ışınlar gibi optik kurallarına uyarlar. Kuvars, florit ve damıtık sudan rahatlıkla geçtikleri halde, görünen ışınlar için geçirgen olan birçok madde tarafından tutulurlar. (<http://ansiklopedi.turkcebilgi.com>)

Örneğin herhangi bir pencere camı 3000 A° dan kısa dalga boylu ışınları geçirmez. 2000 A° dan kısa dalga boylu ışınların havanın kısa bir mesâfesinde tutulmaları ihmâl edilebilecek kadar az olduğu halde, atmosfer tabakası boyunca tutulma yeterli olmaktadır. Daha kısa dalga boylu radyasyonlar oksijen tarafından tutulur. (<http://ansiklopedi.turkcebilgi.com>)

Renklerin güneş etkisiyle açılması veya solması bu reaksiyonlara bir misaldir. Ultraviyole ışınların kezâ biyolojik etkileri de vardır. 3050 A° dan kısa dalga boylu ışınlar insan cildinde güneş yanığı meydana getirir. 3050-2900 A° arasındaki dalga boyları “Suntan” olarak bilinen pigmentasyona (boyadan meydana gelen renklilik) sebep olur. Ultraviyole ışınların diğer önemli biyolojik etkisi insan derisinde ergosterolden D vitamini meydana getirmeleridir. Güneş ışığının bu etkisi raşitizm denilen hastalığın önlenmesini veya tedâvi edilmesini sağlar. Ultraviyole radyasyonlarının önemli bir yönü de, bakterileri öldürme veya tesirsiz hale getirme özellikleridir. Bu sebepten hastanelerin bazı bölümlerinde, çocuk odalarında ve sterilize hava gereken birçok ameliyede ultraviyole lambaları kullanılır. Ultraviyole ışınlar fosforlu madde olarak bilinen bâzı maddelere geldiği zaman, bu maddeler görünen ışın neşretmeye başlarlar. Bu olay floresans olarak bilinir. Floresans lamba esas itibariyle ultraviyole ışınlarını kesen bir nevi camdan yapıldır. Ampülün iç tarafı ince bir floresan

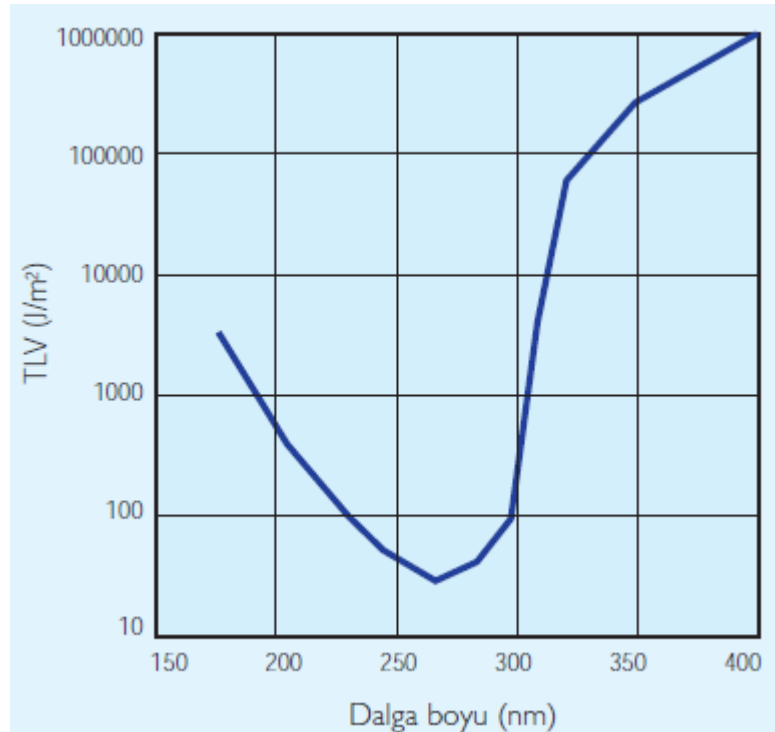
madde ile kaplanmıştır. Böylece ultraviyole ışınlar bu floresan madde tarafından tutulur ve görünen ışın olarak neşredilir. Bu işlem görünen ışın üretimi için yeterlidir. Ultraviyole ışınların şiddeti foto-elektrik hücreler veya radyometrelerle ölçülür.

5.6.1.2 Ultraviyole Radyasyonu

Ultraviyole elektromanyetik radyasyonun, görülebilir spektrumun alt sınırındaki dalga boyu ekstremiyle ve üst sınırındaki X-ray ışını radyasyon bandının arasındaki kısımdadır. Ultraviyole radyasyonun özel sahası 100 ve 400 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) arasında tanımlanmıştır ve insan gözü için görülmezdir. CIE sınıflandırması kullanarak UV spektrumu üç kuşağa tekrar bölünmüştür. (Compston ve Dexter, 2008)

- a. UV-A (Uzun Dalga) $\rightarrow$ 315 nm'den 400 nm'ye
- b. UV-B (Orta Dalga) $\rightarrow$ 280 nm'den 315 nm'ye
- c. UV-C (Kısa Dalga) $\rightarrow$ 100 nm'den 280 nm'ye

Gerçekte pek çok fotobiyojist 320 nm' nin üstü ve altında dalga boyunun ağırlıklı etkisinden bahsederler, bu yüzden alternatif bir tanım sunarlar. (Compston ve Dexter, 2008)

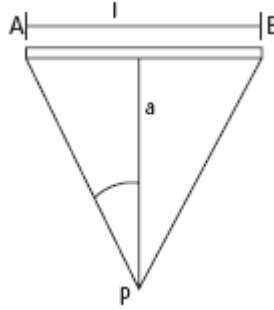


Şekil 5.12 Ultraviyole radyasyon eşik kritik sınırlı değerler. (www.philips.com)

4.6.1.3 Ultraviyole Lamba Özellikleri

Ultraviyole lambaların tümü düşük basınçlı cıva teknolojisi temellidirler. Düşük basınçlı lambaların lamba akımını arttırmak aynı uzunluktaki lambalar için daha yüksek verim sağlar, fakat bunun maliyeti UV verimliliğidir.(UV watt/dahili elektrik wattı) bu yüksek seviyedeki kendinden emme ve ısı derecesi etkilerinden dolayıdır. Cıva amalgamlarının uygulaması, saf cıvaya ziyade sonraki için doğrudur. HOK lambaları, ki bunlar orta basınçlı cıva tipidir, asıl olarak düşük basınçlı seçeneklere göre, çok daha yüksek bir UV-C çıkışıyla ama çok daha düşük verimlilikle karakterize edilirler. Lamba çeşidi seçimi spesifik uygulamaya dayanır. Çoğu durumda düşük basınçlı tipleri en uygun olanlardır. Bunun sebebi mikrop öldürücü lambaların mikro organizmaların yok edilmesinde yüksek seviyede verime sahip olmasıdır, bu sebeple yüksek wattlı lambalara sınırlı olarak ihtiyaç vardır. Su dezenfeksiyonu için, her ne kadar seçim zorunlu olarak UV-C verimliliği temeline dayanmasada gerek düşük gerek orta basınçlı kullanılır. Metal eşyalar ve yer sınırlamalarını da içeren baştaki toplam sistem maliyetleri yarardan ziyade daha önemli bir faktör olabilir.

Lamba veri değerlerine bakacak olursak; UV ışınım değerleri hesaplamasında aşağıdaki eşitlikteki E'nin P noktasındaki küçük bir yüzeyde, I uzunluğundaki ideal yatay radyasyon kaynağı AB'ye yayımı eşittir.



Şekil 5.13 UV ışınımının dağılımı

$$E = \frac{\phi}{2 \cdot \pi \cdot a^2} (2a + \sin \alpha) \quad (5.3)$$

Burada “ ϕ ”, watt cinsinden toplam radyasyon değerini vermektedir.

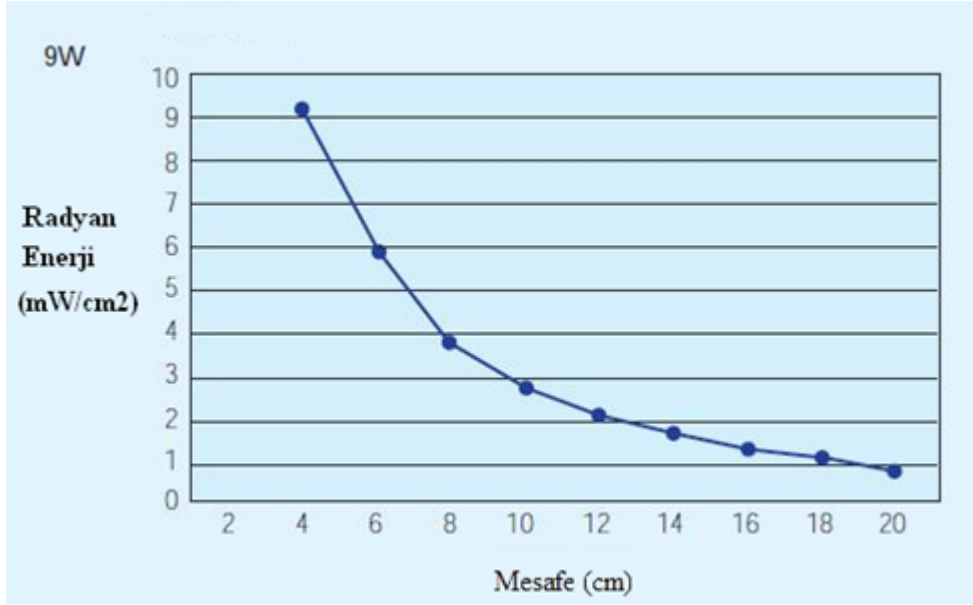
Lambaya şua ışınımına büyük bir mesafe için

$$E = \frac{\phi}{\pi \cdot a^2} \quad (5.4)$$

Daha kısa mesafelerde yayım;

$$E = \frac{\phi}{2 \pi \cdot a \cdot l} \quad (5.5)$$

şeklinde formülize edilebilir.



Şekil 5.14 UV yayınının lambalara olan mesafe ile varyantının gösterimi.

(www.philips.com)

5.6.2 Deney Standardı ve Düzeneği

Deney düzeneğimiz ve numune hazırlanışı TS EN ISO 4892-3 Türk Standartlarına uygun şekilde seçilip uygulanmıştır.



Şekil 5.15 UV test düzeneği (www.philips.com)

5.6.2.1 Laboratuvar UV Işık Kaynakları

Floresan UV lambaları; spektrumunun ultraviyole bölgesi içinde 400 nm üstünde emisyon yayınımlı yapan ve en az %80 toplam ışık çıkışı sağlayan kaynaklar olarak tanımlanabilirler. ISO 4892 standartına göre 3 tip floresan UV lamba bulunmaktadır, bunlar;

- **Tip 1A(UVA-340) floresan UV lambası:** Bu lambalar 300 nm'nin üstünde radyan emisyon değerlerine sahipken %2'den daha az toplam ışık çıkışı değerlidirler. En yüksek emisyon değerleri 343 nm olabilen UVA-340 lambalar ile genellikle gün ışığının 300 nm'den 340 nm'ye kadar bir simülasyonu yapılabilir.
- **Tip 1B (UVA-351) floresan UV lambası:** Bu lambalar 300 nm'nin üstünde radyan emisyon değerlerine sahipken %2'den daha az toplam ışık çıkışı değerlidirler. En yüksek emisyon değerleri 353 nm olabilen UVA-351 lambalar ile genellikle gün ışığının güneş gözlükleri ardından göze gelebilecek UV miktarını veren lambalar olarak tanımlanabilirler.
- **Tip 2B (UVB-313) floresan UV lambası:** Bu lambalar 300 nm'nin üstünde radyan emisyon değerlerine sahipken %10'dan fazla toplam ışık çıkışı değerli olabilen UVB-313 313 nm pik emisyon değerlerine sahiptir.



Şekil 5.16 UV-A lambası. (www.philips.com)

5.6.2.2 Deney Ortamı

5.6.2.2.1 Işınım Değeri

Aksi hali tanımlanana kadar UV ışınım değerleri Tablo'da verildiği şekilde kontrol edilmelidir. Işınım enerjisi ve dalgaboyu geçirim bandı da gösterilmelidir.

5.6.2.2.2 Sıcaklık

Floresans UV lambaları; solar ışınlam, zenon-ark ve karbon-ark kaynaklarına göre daha az görünür ve infrared ışınlam yaymaktadırlar. Solar ışınlamdan farklı olarak, floresans UV aparatlarında numune yüzeyinin ısıtılması panel boyunca ısınmış havadan kaynaklanmaktadır. Böylece, siyah-yüzeyli termometre, siyah standart termometre, numune yüzeyi ve numune odasındaki havanın sıcaklıkları arasındaki fark genellikle 2°C'den az olmaktadır.

5.6.2.2.3 Bağlı Nem Miktarı

UV ışığına maruz bırakılma ortamları bağlı nemliliğe bağlı olarak oluşturulmalıdır. Tablo'da ışığa maruz bırakılma ortamında bağlı nem değerinin ne şekilde olduğu da açıkça belirtilmiştir.

Çizelge 5.12 UV ile yaşlandırma çevrimi

Çevrim	UV Işığın Maruz Bırakma	Lamba Tipi	Işınlam Enerjisi	Sıcaklık	Bağlı Nem Miktarı (%)
1	8 s kuru	UVA-340	0,76 W.m ⁻² .nm ⁻¹	60°C $\pm$ 3°C	Kontrolsüz
	4 s Yoğunlaştırma		340 nm'de Işıkl Yok	50°C $\pm$ 3°C	
2	8 s kuru	UVA-340	0,76 W.m ⁻² .nm ⁻¹	50°C $\pm$ 3°C	Kontrolsüz
	0,25 s su sprey			Kontrolsüz	Kontrolsüz
	3,75 s		340 nm'de Işıkl Yok	50°C $\pm$ 3°C	Kontrolsüz
	Yoğunlaştırma				
3	5 s kuru	1A lamba kombinasyonu	Sürekli olarak 45 W.m ⁻²	50°C $\pm$ 3°C	<15
	1 s su sprey		(290 nm - 400 nm)	25°C $\pm$ 3°C	Kontrolsüz
4	5 s kuru	1A lamba kombinasyonu	Sürekli olarak 45 W.m ⁻²	70°C $\pm$ 3°C	<15
	1 s su sprey		(290 nm - 400 nm)	25°C $\pm$ 3°C	Kontrolsüz

5.6.3 Deneyin Amacı

Deneyimizin amacı UV-A ışığı altında yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan pultrude çubuk numunelerimizin güneş ışığının bir simülasyonu olan ortamdan etkilenecek, özellikle fiberlerindeki dayanç düşüşlerini çekme dayanıcı cinsinden ölçmektir.

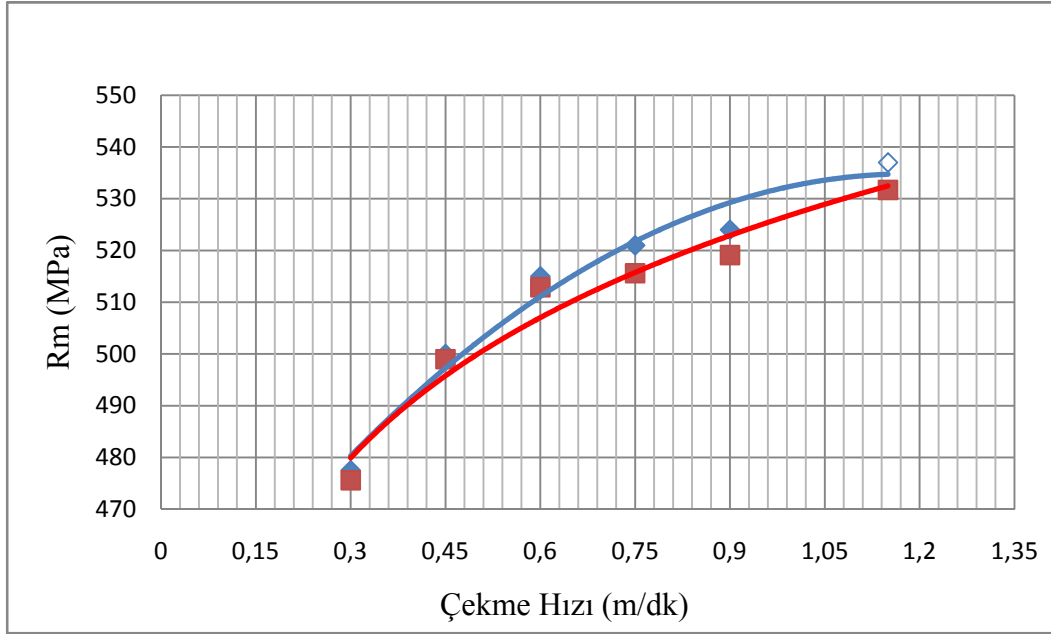
Daha önceki deneysel bölümlerimizde farklı çekme hızlarındaki pultrude çubukların çekme özelliklerini incelemiştik. Burada da bahsedildiği üzere ultraviyole ışığı altında kaldıktan sonra öngörülen mekanik dayanç düşüşünü çekme dayanıcı ölçümüyle görerek bu değeri bir önceki çekme dayanıcı değerleriyle karşılaştıracğız.

5.6.4 Deneyin Yapılışı ve Elde Edilen Değerler

Öncelikle farklı çekme hızıyla üretilmiş numuneler ve çekme test düzeneği, TS EN ISO 527-5 çubuk çekme özellikleri standartına uygun şekilde hazırlanmıştır. Tıpkı pultrude çubukların çekme özelliklerinin tayinin yapıldığı deney bölümümüzdeki gibi, ultraviyole ışığına yukarıda bahsedilen standartta uygun şekilde toplamda 36 saat maruz bırakılan numuneler, devamında çekilerek aşağıdaki çekme dayanıcı değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.13 UV ışığına maruz bırakılan numunelerin çekme dayançlarının değişimi

Numune /çekme hızı	Boyutlar d ₀ (mm)	A ₀ (mm ²)	R _m (Mpa)	R _{mort} (Mpa)
1-A/ 0,33 m/dk	10,65	89,1	421,2	475,6
1-A/ 0,33 m/dk	9,32	68,2	530,0	
2-A /0,45 m/dk	8,31	54,2	487,2	499,0
2-A /0,45 m/dk	9,40	69,3	510,9	
3-A /0,60 m/dk	9,96	78,0	529,8	512,9
3-A /0,60 m/dk	9,72	74,2	496,0	
4-A /0,75 m/dk	9,45	54,2	491,1	515,6
4-A /0,75 m/dk	9,02	69,3	540,1	
5-A /0,90 m/dk	8,10	51,5	526,8	519,1
5-A /0,90 m/dk	8,30	54,1	511,4	
6-A /1,15 m/dk	6,90	37,4	531,2	531,7
6-A /1,15 m/dk	7,08	39,3	532,2	



Şekil 5.17 UV yaşlandırmasından sonra çekme hızıyla çekme dayanıcının değişiminin gösterilişi

5.6.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

UV ışınları bir çok plastik malzeme gibi pultrude profilimizin matris malzemesi olan polyester reçinenin de zincir yapısını bozar ve pultrüzyonla üretilmiş olan malzememizin de mekanik özelliklerini düşürecektir. Şekil 11'den de görüldüğü üzere ultraviyole ışığı altında yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerde gözle görülür bir şekilde çekme dayanç değerleri düşmüştür. Genelde, gün ışığı altında solar ışıklara maruz kalan pultrude ürünlerde mekaniksel dayançların deneyimizde de ortaya çıktığı üzere düştüğünden kullanım süreleri eğer çalışma yerleri kritik ise dikkat arzedilecek bir durum oluşturmaktadır.

5.7 Pultrude Malzemelerin Su Absorbsiyonu Özellikleri Tayini

5.7.1 Deneyin Amacı

Deneyimizin amacı ;cam elyaf takviyeli polimer matrisli pultrude kompozit malzemelerin su içerisinde veya atmosfere açık olan yerlerde meteorolojik etkenlere karşı sergileyeceği özelliklerin ne şekilde olduğunu belirleyebilmek adına laboratuvar ortamında su absorblama özelliklerinin belirlenmesidir.

5.7.2 Teorik Bilgi

Malzemenin su absorblama özelliği , malzemenin içerdiği boşluk oranıyla doğru orantılı olarak artan bir özelliktir. Ayrıca su absorbe eden malzemenin mekanik özelliklerinde de olumsuz yönde bir değişim gerçekleşmektedir.

Kompozit rezinlerin su emilimi rezin matriks (monomerler, yapısı ve polimerizasyonu), doldurucular (materyal, partikül büyüklüğü, hacimce miktarı, matriks içerisinde dağılımı) ve matriks ile doldurucu ara yüzeyinin özelliklerine bağlıdır. Bunlarla birlikte suda bekletme süresi, sıcaklık, suyun konsantrasyonu ve kompozit rezinin yüzeyi de su emilimini etkilemektedir. Kompozit rezin sulu ortamda bekletildiğinde 0.158 nm çapında su molekülleri rezin matriks molekülleri arasındaki boşluklardan daha küçük oldukları için polimer içerisine doğru ilerlerler. Kısa ve uzun dönem su emiliminin polimer üzerindeki etkisi klinik açıdan göz ardı edilmemesi gereken bir konudur. Su emilimi literatürlerde iki yaklaşımla ifade edilmiştir. “Serbest hacim teorisi” sıvıların materyal içerisindeki mikroboşlukların veya diğer morfolojik defektlerin içerilerine diffüze olarak su dengesinin sağlanması, “Interaction teorisi” ise su moleküllerinin kompozit rezinlerdeki polimer zincirlerinin polar gruplarına hidrojen bağı ile bağlanması olarak açıklanmıştır. Daha sonraları iki teorisinin de geçerli olduğu ve bu olayların aynı zamanda gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bununla birlikte polimerler, mikroyapısal ve moleküler oluşumlarına göre su emilimlerinde farklılıklar göstermektedir. Örneğin, molekül yapısının polaritesi, su ile hidrojen bağı oluşturacak hidroksil gruplarının varlığı, matriksi oluşturan çapraz bağlar, boşluklarda kalan su ve rezinin çözünürlüğü su emilimini etkiler.

Numunelerimizin bekleteceğimiz distile su, kaynama kazanında, paslanmaz çelik ısıtıcılarla buhar haline getirilen suyun, soğutma suyunun dolaştığı serpantinde yoğunlaştırılmasıyla elde edilen su olarak tarif edilebilir. Distilasyon, ısıtma ve soğutma yoluyla iki ya da daha fazla maddenin sıvı ya da buhar karışımlarının saflaştırılması amacıyla küçük bileşenlere ayrılması işlemi olarak tanımlanır. Damıtma, kaynayan bir karışımın buharının, daha düşük bir kaynama noktasına sahip bileşenlerinde zenginleşeceği gerçeğine dayanır. Bu yüzden buhar soğuduğunda ve yoğuştuğunda, karışımın bu yeni hali daha çok uçucu bileşenler içerecektir.

Yukarıda bahsi geçen iyon değiştirme işlemi, (deiyonize, demineralize, deiyonizasyon, demineralizasyon) bir iyonun diğer bir iyonla yer değiştirmesidir. Bu işlem için reçineler kullanılır. Reçineler katyon değiştirici reçine ve anyon değiştirici reçine veya bunların kombinasyonu olabilir. Katyon değiştirme veya baz değiştirme, pozitif bir iyonun diğer pozitif bir iyonla yer değiştirmesi olup doğal sularda katyonlar Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , H^{+} , Fe^{+2} ve Mn^{+2} gibi anyon değiştirme veya asit değiştirme yani negatif bir iyonun diğer negatif bir iyonla yer değiştirmesi olup doğal sularda anyonlar genel olarak Cl , SO_4 , NO_3 gibi maddelerdir. (Wilson ve Buckley, 1994)

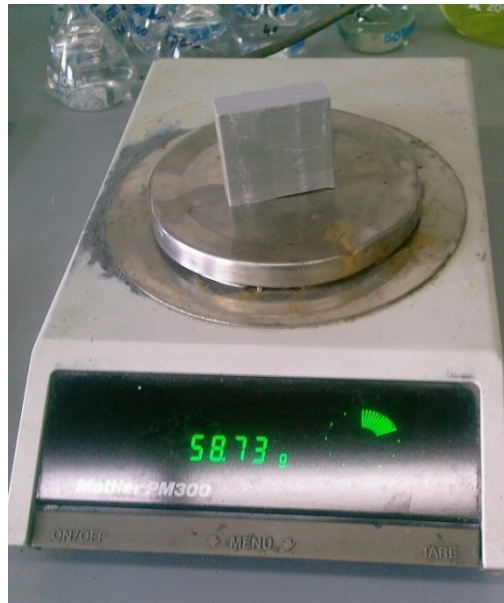
5.7.3 Deneyin Yapılışı

ASTM D-570 su emiş oranı stardardına uygun olarak; alttaki fotoğrafta da görüleceği üzere dikdörtgen kesitli %61 hacim oranına sahip plaka pultrude malzemedan kesilmiş olan numuneler farklı sürelerde distile su içerisinde bırakılarak absorbladıkları su miktarları ilk ve son ağırlık farklılıklarına bağlı olarak tespit edilerek, zamana bağlı olarak kütlece su absorbsiyon değerlerine ulaşılabilir.



Şekil 5.18 Su absorbsiyonu deney numunesi

Deney başında ilk ağırlıkları hassas dijital kantar vasıtasıyla ölçülerek herbiri teker teker kayıt altına alındıktan sonra deneye geçildi.



Şekil 5.19 Su absorbsiyonu numunesinin tartılması

300 ml distile su içersine bırakılan numuneler fotoğraftan da görülebileceği gibi ağızları streçlenerek su buharlaşmasını önleyecek şekilde cam beherlerin içerisinde bekletilmeye başlanmıştır.



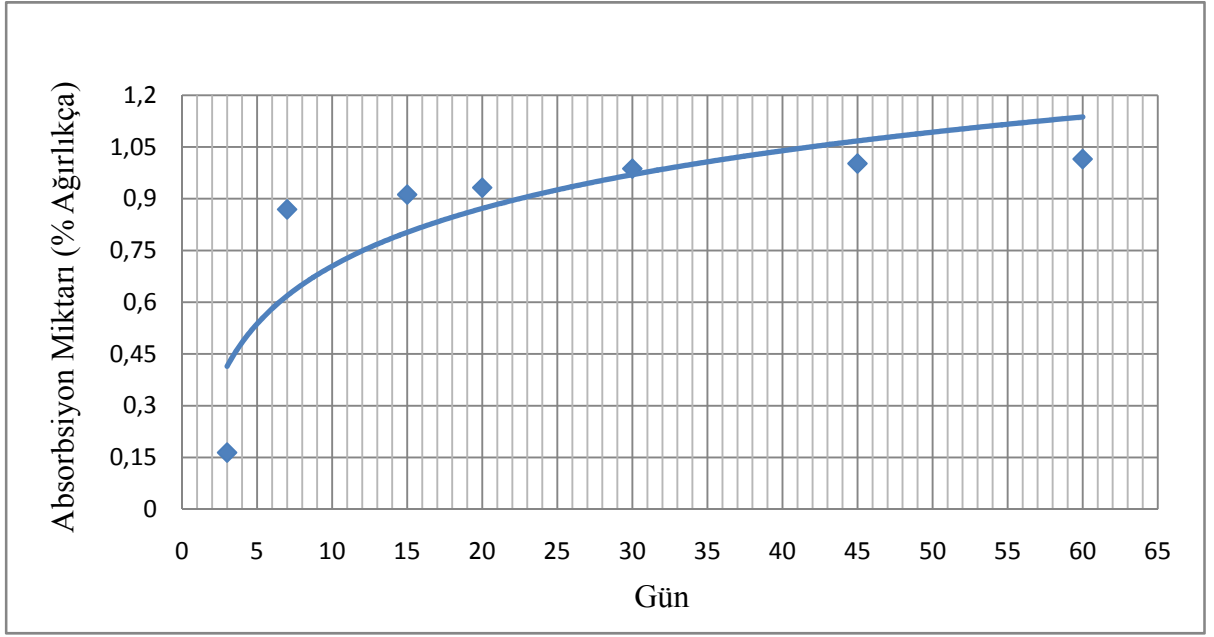
Şekil 5.20 Su absorpsiyonu numunelerinin distile su içinde bırakılması

5.7.4 Hesaplamalar ve Grafik

Cam beherler içinde 3 gün ile 60 günlük süreçler arasında bekletilen numuneler sırasıyla 3,7, 15,20,30,45 ve 60 gün sonunda sırayla beherlerden çıkartılarak yüzeyleri kurutulduktan sonra ağırlıkları kaydedildilmiştir. Deney başında kaydedilen ilk ağırlıkları da kullanılarak absorbe ettikleri su miktarları yüzdesel olarak hesaplanarak çizelgeye yansıtılmıştır;

Çizelge 5.14 Su absorpsiyon deneyi sonuçları

Numune No	Gün	Saat	% Absorpsiyon Mik.	%Ab. Mik./Gün
1	3	72	0,164	0,0547
2	7	168	0,869	0,1241
3	15	360	0,912	0,0608
4	20	480	0,932	0,0466
5	30	720	0,987	0,0329
6	45	1080	1,002	0,0223
7	60	1440	1,015	0,0169



Şekil 5.21 Absorbsiyon miktarının günlük olarak değişiminin gösterilişi

5.7.5 Deney Sonuçları ve Yorumlar

Deney sonuçlarını grafikten de görebileceğimiz gibi, pultrude cam elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerde su absorpsiyonu zamanla vuku bulan bir hadisedir. Ayrıca burada dikkat edilecek diğer husus su absorpsiyon miktarının bir süre sonra yavaşlaması ve %absorpsiyon miktarı/gün değerinin hesaplamalardan da görülebileceği gibi azalan bir eğilimde olmasıdır.

Buradan hareketle suya maruz kalan ortamlarda (atmosfere açık, sulu ortam içi vs.) pultrude profillerin kullanımında su absorpsiyon miktarı göz önüne alınarak ileride bir problem yaşanmaması için malzeme tasarımının buna uygun olarak yapılması sonucuna ulaşılabilmektedir.

6. ABAQUS İLE 3 NOKTA EĞME DENEYİNİN MODELLENMESİ

6.1 ABAQUS 6.6-1 Programının Tanıtımı

Modelleme esnasında kullanmış olduğumuz Abaqus/CAE yazılımı unsur tabanlı parametrik, güçlü bir sonlu elemanlar modelleme, son işlem ve uygulamaya dönük özelleştirilebilme sağlayan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. (<http://www.a-ztech.com.tr/abqcae.html>)

Abaqus/CAE ile Abaqus çözümlmeleri için gerekli olan sonlu elemanlar modellerini unsur tabanlı parametrik olarak kolay ve hızlı bir şekilde hazırlanabilir, çözüme verilebilir, çözüm izlenebilir ve sonuçlar hızlı bir şekilde değerlendirilebilir. Abaqus/CAE, modelleme, çözüm, çözüm yönetimi ve sonuçların değerlendirilmesi süreçlerini tek bir kullanıcı ara yüzü altında toplayan bir yazılımdır. Sezgisel bir kullanım kabiliyetine sahip olduğundan yeni başlayan kullanıcılar için kullanımı kolaydır. Günümüz çağdaş CAD yazılımlarının kullandığı modelleme motorlarını kullanmaktadır. Bu yüzden herhangi bir CAD yazılımına aşinalığı olan kullanıcılar, Abaqus/CAE 'i çok kısa sürede öğrenip etkin bir şekilde kullanabilir hale gelmektedir. Unsur tabanlı parametrik modelleme yeteneğine sahip bir sonlu elemanlar Ön&Son (Pre&Post) programıdır. Modellemenin tüm aşamaları soy ağacına kaydedildiğinden kullanıcı herhangi bir aşamada, ister modelleme sırasında ister çözüm yaptıktan sonra soy ağacından model değiştirgeçlerini değiştirerek modellerini otomatik olarak yeniden üretebilir. Bu sayede kullanıcılar model değişikliklerini kolay hızlı bir şekilde yapabilmektedirler.

6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Avantajları

Sonlu elemanlar yöntemini diğer yöntemlere üstün kılan başlıca özellikler şunlardır;

- Sonlu elemanlar, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cisim temsil edebilir.
- Çok bağıntılı bölgeler (bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler kolayca incelenebilir.
- Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineeriteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.
- Seramik malzemeler gibi çok sert malzemelere başlangıç çatlağı açılması çok zor olmaktadır. Ayrıca böylesine zor koşullarda açılan çatlaklar istenen boyutlarda da oluşturulamamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, başlangıç çatlakları, bilgisayar ortamında, arzu edilen boyutta rahatlıkla oluşturulabilir.

6.3 Sonlu Elemanlarla Model Oluşturma Aşamaları

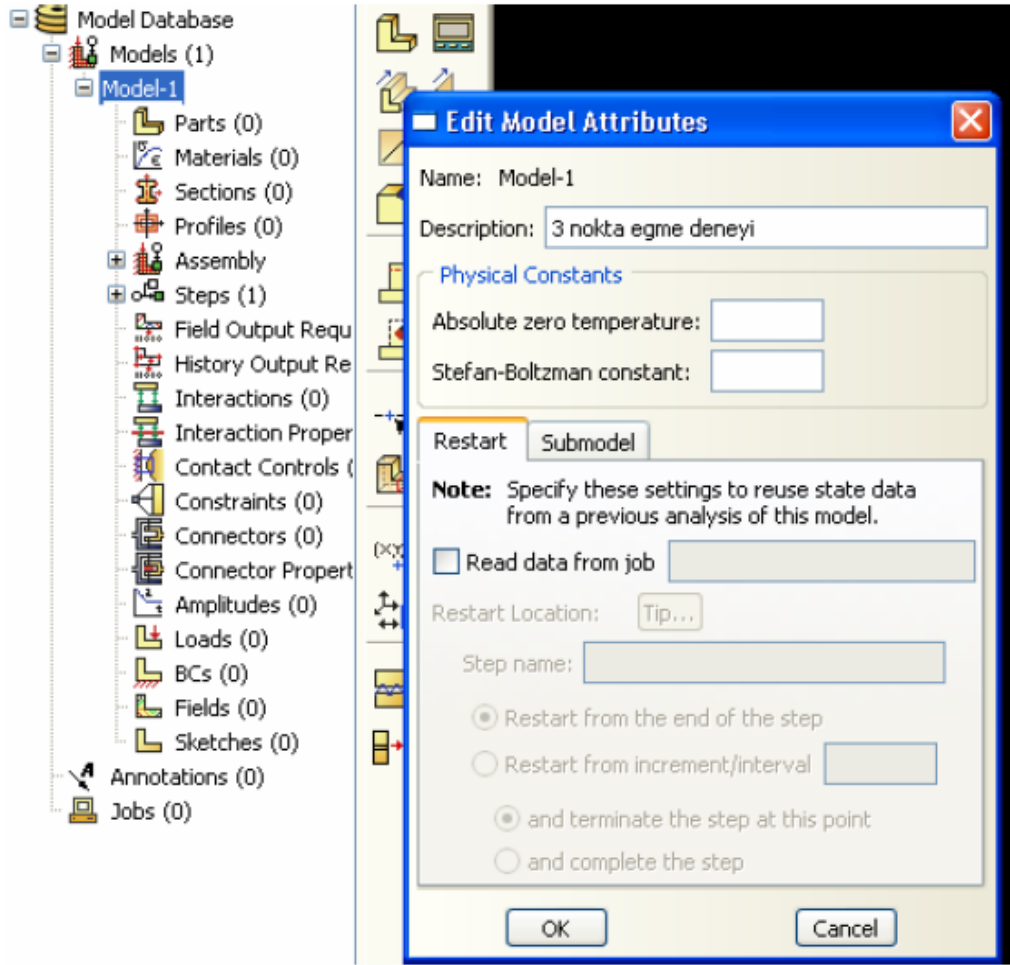
Sıradan bir sonlu elemanlar programı ön işleme (preprocessor), işleme (processor) ve son işleme (postprocessor) kısımlarından oluşmaktadır. İlk kısım kullanıcı tarafından oluşturulur ve diğer iki kısım program tarafından tamamlanır. Her kısım şu aşamalardan oluşmaktadır;

- Ön işleme (preprocessor) kısmında kullanıcı tarafından oluşturulan yapı
 - a. Analiz tipinin belirlenmesi (statik, dinamik, termal vs.)
 - b. Boyutların tanımlanması (2 boyutlu veya 3 boyutlu gibi)
 - c. Elemanların tanımlanması
 - d. Malzeme özelliklerinin tanımlanması (elastisite modülü vs.)
 - e. Sınır şartlarının belirlenmesi
 - f. Yükleme tipinin belirlenmesi (yüzey yükü, tekil yük, moment vs.)
- İşleme (processor) kısmında problem tarafından oluşturulan yapı
 - a. Eleman şekil fonksiyonlarının oluşturulması
 - b. Eleman denklemlerinin hesaplanması
 - c. Dönüşüm matrislerinin hesaplanması
 - d. Eleman denklemlerinin birleştirilmesi
 - e. Sınır şartlarının girilmesi
 - f. Çözüm prosedürünün yapılması
- Son işleme (postprocessor) de kullanıcı tarafından elde edilebilen sonuçlar
 - a. İstenen değerler için kontur çizdirilmesi ve çıktı alınması
 - b. Deformasyon biçiminin çizdirilmesi ve çıktı alınması
 - c. Deplasman, dönme vs. için vektör görünümünün elde edilmesi

(Tekeli ve Tetik, 2007)

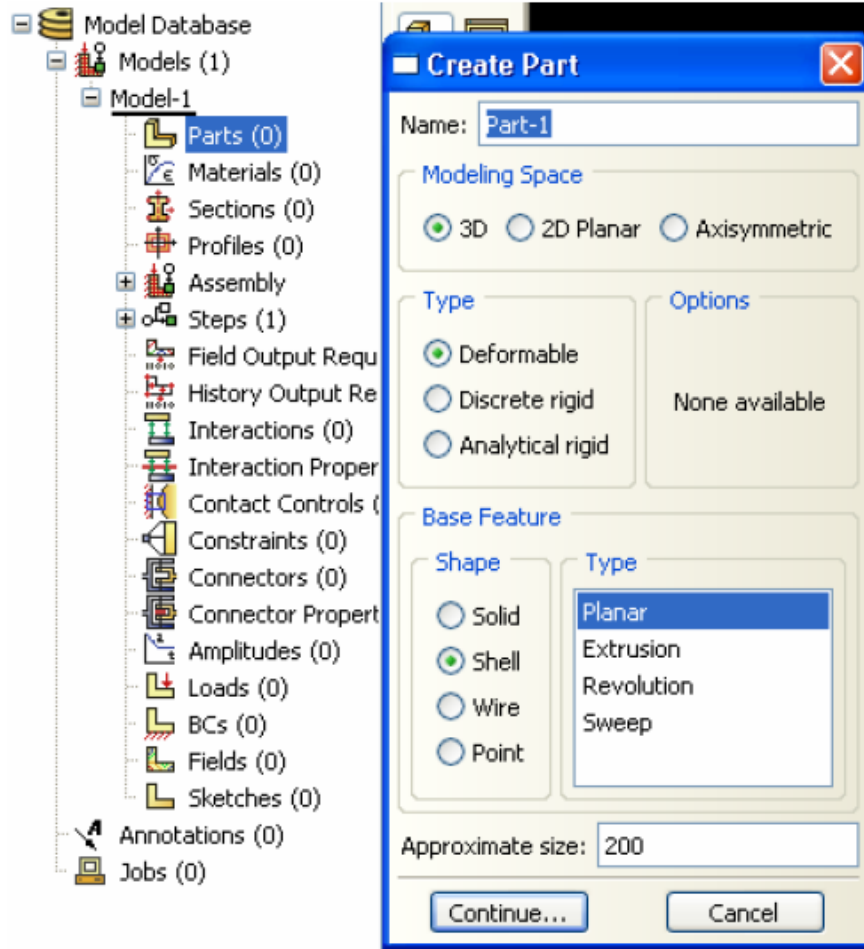
6.4 Modellemenin Uygulanışı

Model database'den Model-1'den description bölümüne yapacağımız analizin ismini yazarak işlemimize başlarız.



Şekil 6.1 Analiz açıklamasının girilişi

Model Database→Model-1→Parts'dan parça hakkında boyut,şekil tip ve çizim alanıyla alakalı bilgiler girildikten sonra parçamızın kompozit olması dolayısıyla shell elemanı seçilir.



Şekil 6.2 Parça detaylarının girilişi

Model Database→Model-1→Materials→Material-1’den parçamızın poisson oranı, kayma modülü ve elastisite değerleri aşağıdaki şekilde girilmiştir.

Çizelge 6.1 Cam polysterinin özellikleri

Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Kayma Modülü
$E_x=37000$ Mpa	$\mu_x=0.24$	$G_x=6300$ Mpa
$E_y=13000$ Mpa	$\mu_y=0.20$	$G_y=7300$ Mpa
$E_z=13000$ Mpa	$\mu_z=0.20$	$G_z=7300$ Mpa

Edit Material

Name: Material-1

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Other

Elastic

Type: Engineering Constants

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

Data

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	37000	13000	13000	0.24	0.20	0.20	6300	7300	7300

OK Cancel

Şekil 6.3 Pultrude malzeme özelliklerinin girilişi

Model Database→**Model-1**→**Sections** komutundan parçamızın kompozit ve kabuk(shell) yapıda olduğu seçilir.

Create Section

Name: Section-1

Category

☐ Solid

☒ Shell

☐ Beam

☐ Other

Type

Homogeneous

Composite

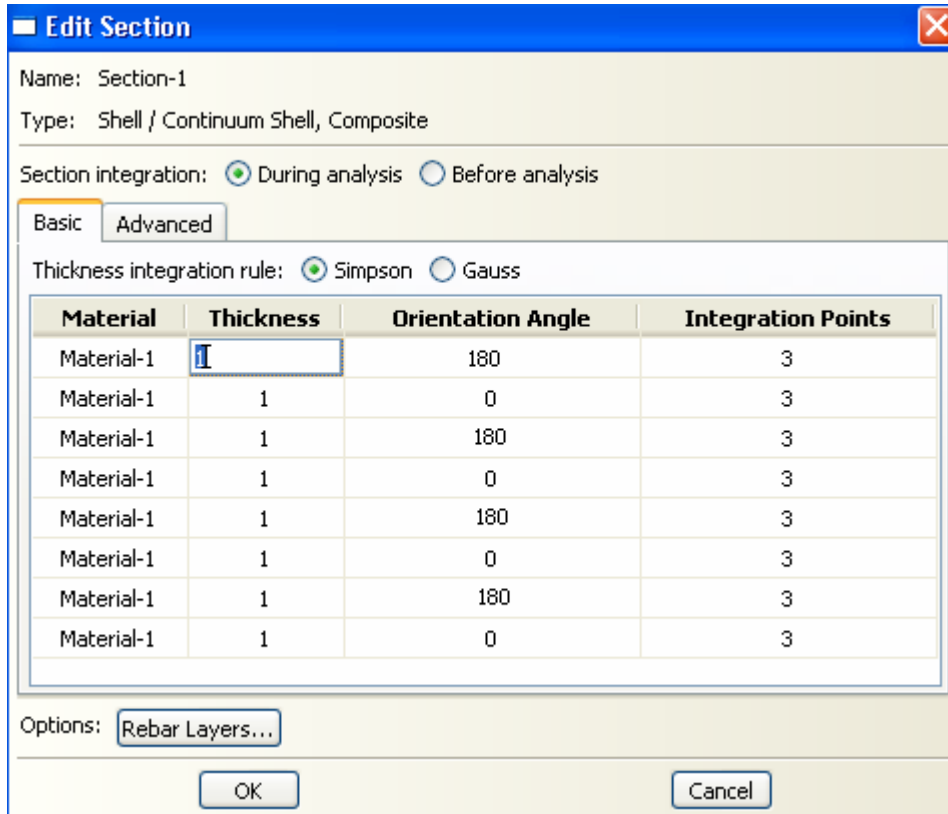
Membrane

Surface

Continue... Cancel

Şekil 6.4 Parçanın tipinin seçimi

Model Database→**Model-1**→**Sections**→ **Section-1**'den kompozit malzemenin tabakalarının kalınlığı, fiberlerin açıları girilir.



Edit Section

Name: Section-1

Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Basic ☒ Advanced

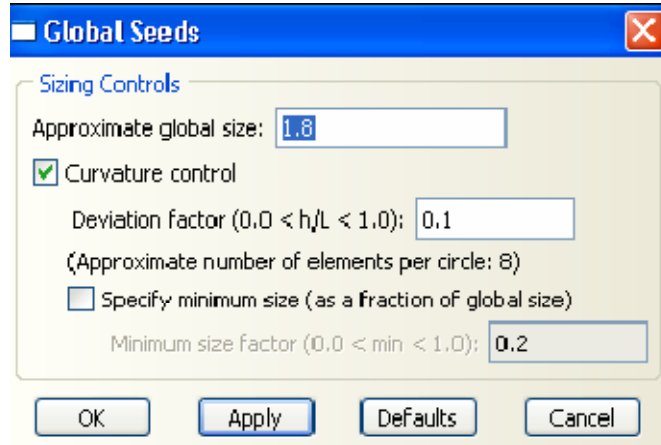
Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points
Material-1	1	180	3
Material-1	1	0	3
Material-1	1	180	3
Material-1	1	0	3
Material-1	1	180	3
Material-1	1	0	3
Material-1	1	180	3
Material-1	1	0	3

Options:

Şekil 6.5 Malzemenin tabaka kalınlığı ve fiberlerin açılarının girilişi

Daha sonra sonlu elemanlara ayıracağımız parça **Utility menu**→**Seed**→**Part**'dan seçilerek en küçük sonlu eleman parçasının boyutu girilir.



Global Seeds

Sizing Controls

Approximate global size: 1.8

☒ Curvature control

Deviation factor ($0.0 < h/L < 1.0$): 0.1

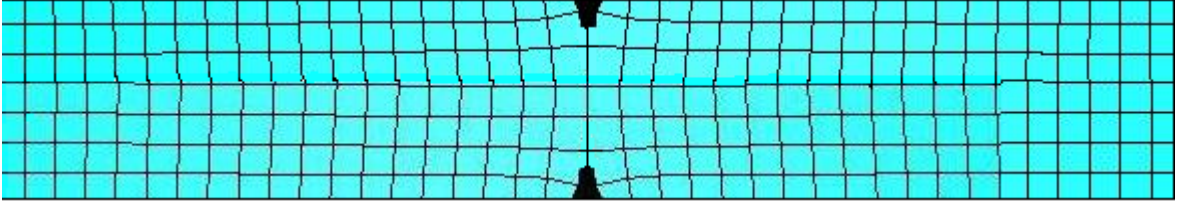
(Approximate number of elements per circle: 8)

☐ Specify minimum size (as a fraction of global size)

Minimum size factor ($0.0 < min < 1.0$): 0.2

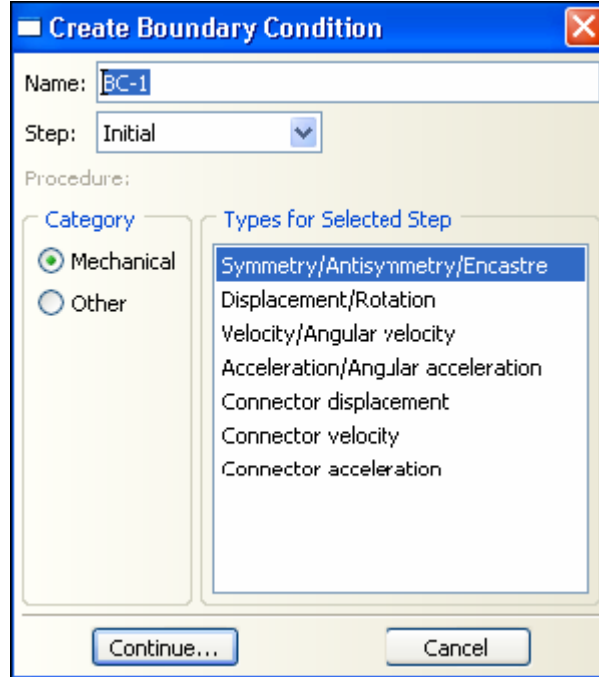
Şekil 6.6 En küçük sonlu eleman parçasının boyutunun girilişi

Utility menu→**Mesh**→**Part**'dan parçamız aşağıda da görüldüğü gibi sonlu elemanlara ayrılır.

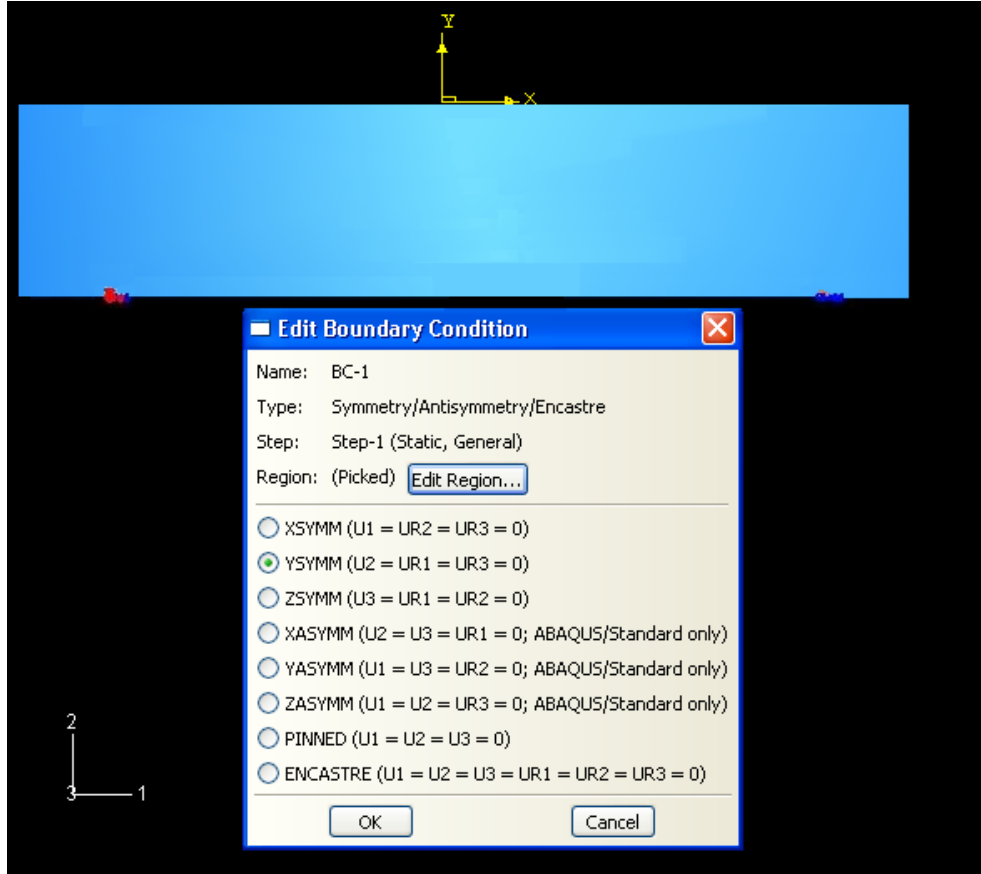


Şekil 6.7 Parçanın sonlu elemanlara ayrılmış hali

Models→**Model-1**→**BCs**'den parçanın başlangıç koşulları uygulanır. Her iki taraftan standart ölçüler dahilinde dik ekseninde yerdeğiştirmesi sıfırlanarak mesnetlenir.

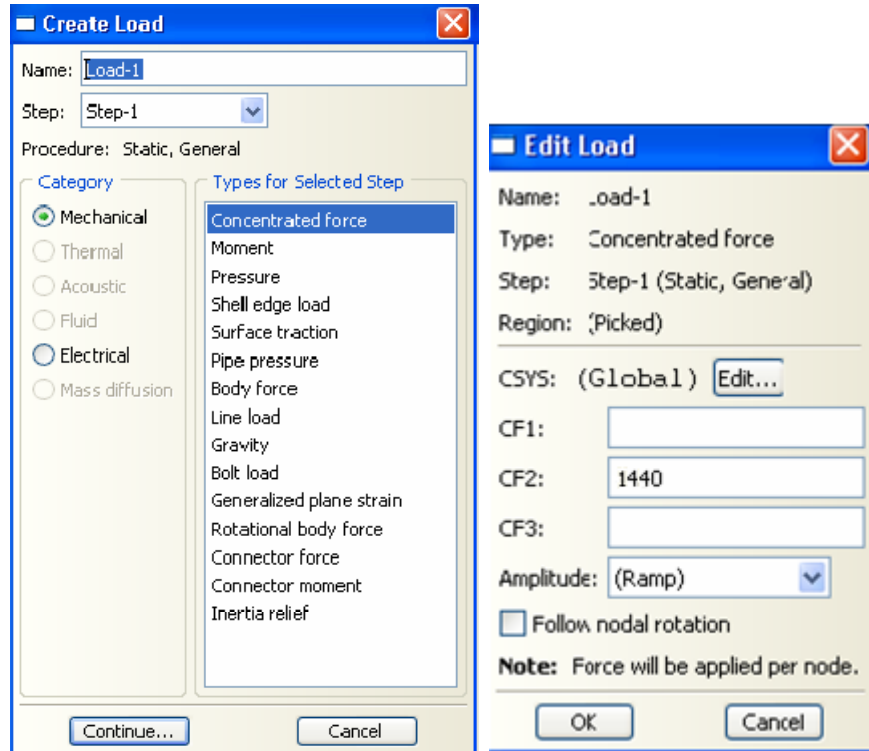


Şekil 6.8 Parçanın dik ekseninde yerdeğiştirmesinin sıfırlanarak mesnetlenmesinin gösterilişi



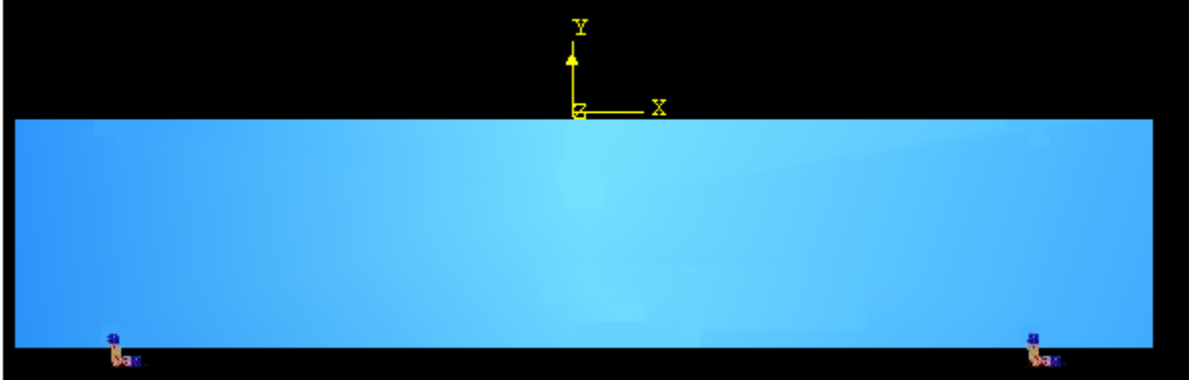
Şekil 6.9 Parçanın mesnetlenmiş hali

Models<Model-1<Loads'dan parçaya gelecek kuvvetin cinsi belirtilir daha sonra kuvvet uygulama noktası seçilerek kuvvetin hangi yönde ne kadar şiddetde olacağı yazılır.



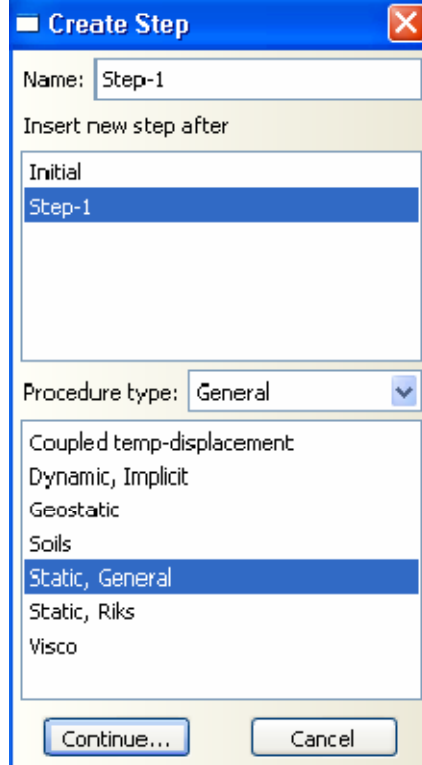
Şekil 6.10 Parçaya uygulanacak kuvvetin seçimi

Parçanın bu aşamalardan sonraki model halini destek noktalarını belirtilmiş halde bu şekilde gösterebiliriz.



Şekil 6.11 Parçanın destek noktaları belirtilmiş model hali

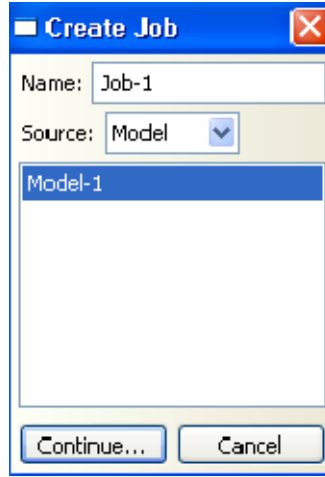
Model Database→Model-1→Steps'den kuvvetin uygulama biçimine ait kriterler belirlenir.



Şekil 6.12 Kuvvetin uygulama biçiminin seçimi

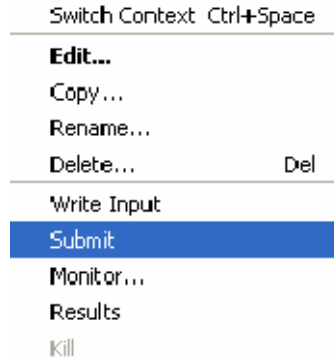
Böylece parçamızın modellenmesi bitmiştir. Artık analiz kısmına gelebiliriz.

Model Database→Model-1→Job'dan analizi yapılacak parçanın program tarafından sonuç bölümüne gönderilmesinden önceki ayağın tamamlanması sağlanır



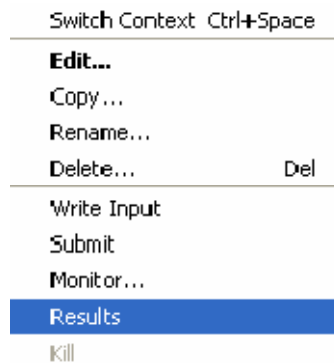
Şekil 6.13 Analizi yapılacak parçanın sonuç bölümüne gönderilmesi

“**Job**” butonu sağ tıklanır ve “**submit**” denirse parçanın analizi gerçekleşir



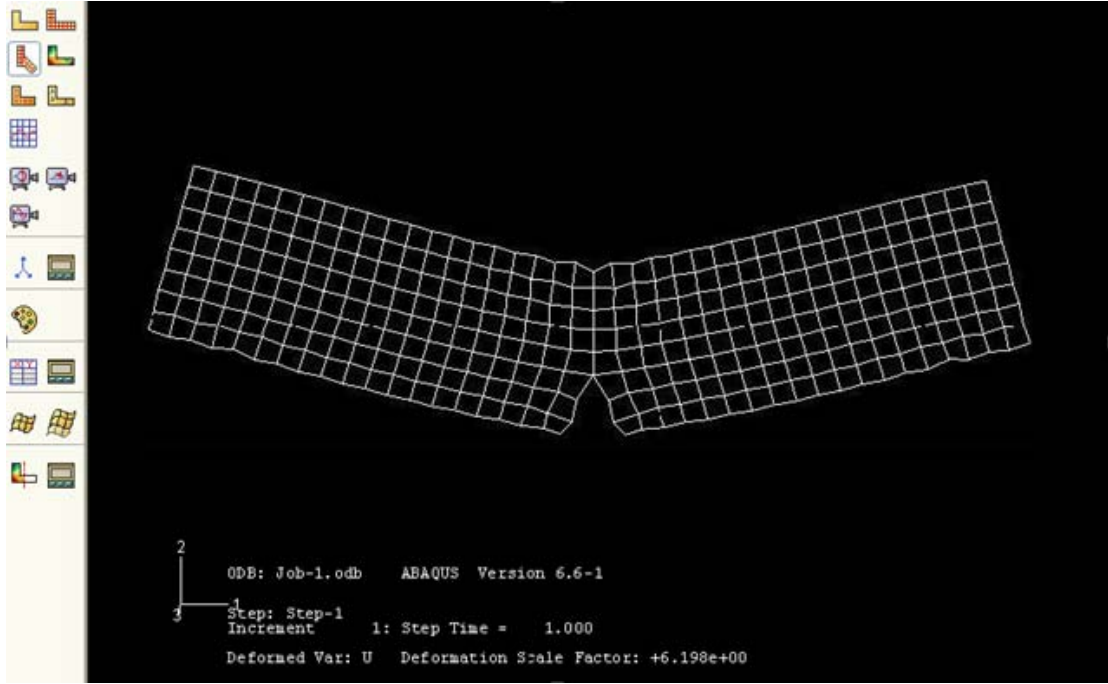
Şekil 6.14 Parçanın “submit” komutuyla analizinin yapılması

Aynı şekilde “**job**” butonu sağ tıklanıp “**results**” denilince de sonuçlar ekrana gelir.



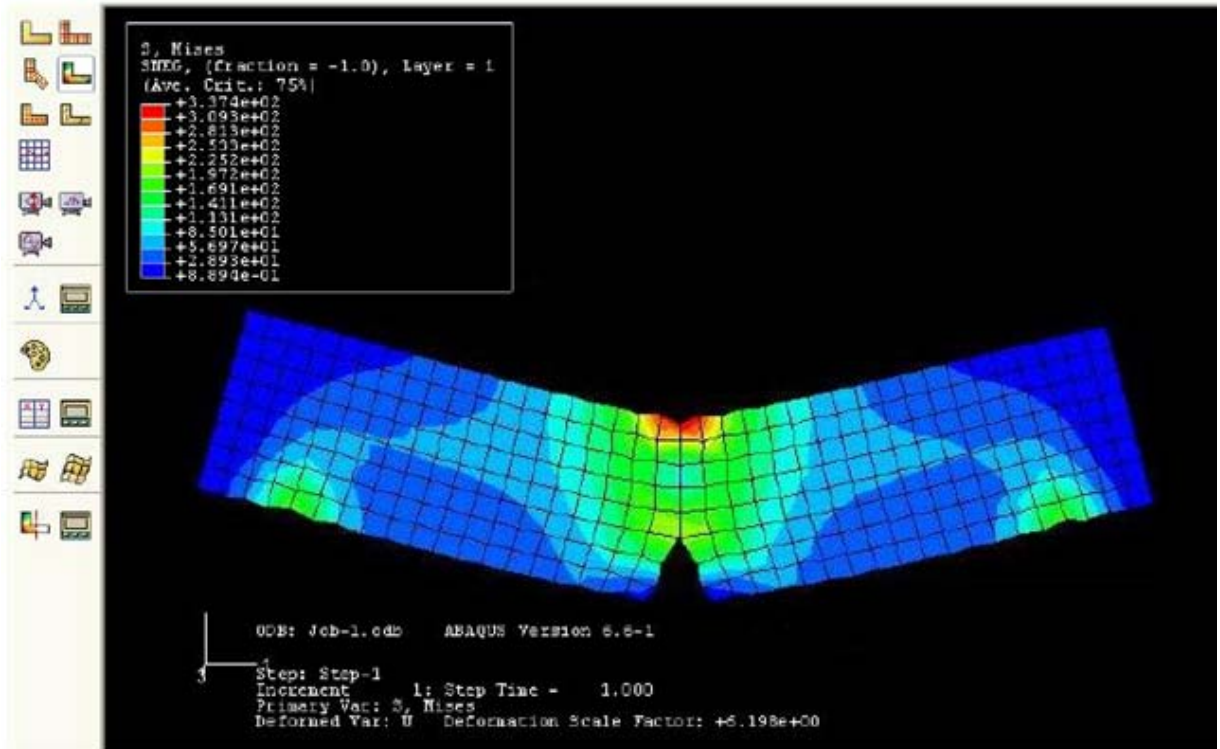
Şekil 6.15 “Results” komutuyla sonuçların ekrana gelmesi

Results komutunun hemen ardından çıkan butonlardan parçanın son geometrisinin şekli ve programın yaptığı analizlere ulaşabiliriz. **plot<undeformed shape** butonuyla parçanın deforme olmuş hali görüntülenebilir



Şekil 6.16 Parçanın deforme olmuş halinin görüntüsü

Plot Contours komutu ile parçada oluşan gerilmeler görüntülenebilir. Parçadaki maksimum gerilme kuvvetin uygulandığı noktada meydana gelmiştir. Bunun sonucunda çatlak ağzında gerilme fazlaşmış ve çatlağın açılmasına sebep olmuştur. Gerilme kuvvetinin minimum olduğu bölge parçanın yan taraflarıdır.



Şekil 6.17 Parçada oluşan gerilmelerin gösterilişi

6.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

Abaqus yazılımı sayesinde deney ortamında gerçekleştirmiş olduğumuz eğilme dayancı deneyini simüle etmiş olduk. Burada dikkat edilmesi gereken durum, pratikte elde ettiğimiz eğme kuvvetinin aynısını programa uyguladığımız zaman hemen hemen aynı şekilde bir eğilme halinin almasıdır. Bu da bize teorik değerlerle ile yapılacak olan bir denemenin, pratikte gerçekleştirmiş olduğumuz deney ile aynı durumu teşkil ettiğinin teyidini vermektedir.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Pultruzyon yöntemi görüldüğü üzere çok yüksek fiber hacim oranlarında üretim sağlayan ve sürekli üretimi mümkün olan önemli bir plastik matrisli kompozit üretim yöntemidir. Tez çalışmamız esnasında çekme hızlarının farklılaşmasının ne gibi etkenler oluşturacağını göstermeye çalıştık. Yükselen çekme hızları optimum bir değere kadar mekanik özelliklere olumlu etki yapmış fakat daha da artması artık mekanik özelliklerin o ivmeyle yükselmesini sağlamamıştır. Bu durumu kürlenmenin yeterli olmasına fırsat verilmediğinden dolayı pultrude malzemelerin, fiber matris arayüzeylerindeki yeterli bağlanma olmayışına ve matris malzemesi olan polyester reçinenin kürlenmemesinden kaynaklanan mekanik özellik düşüşlerine bağlamak mümkündür. Bu bakımdan pultruzyon yöntemiyle plastik matrisli kompozit malzeme üretimi yapan firmalar çekme hızı optimizasyonunda, çekme hızıyla mekanik değerlerin değişimini veren grafiklerinden yardım alabilirler.

Çekme hızının yanısıra, üretilen pultrude profillerin çalışma ortamlarında özellikle de atmosfere açık ortamlarda, güneş ışığı ve yağmur, kar vs. gibi nemli ortam yaratabilecek koşullarda bulunmaları bu malzemelerin bu ortamlara karşın ne tür davranışlarda bulunduğu araştırılması gerektiğini doğurmuştur. Bu doğrultuda tez esnasında, her ne kadar pultrude malzemeler UV ışıklarına dayanıklı olarak lanse ediliyor olsa da deney sonuçlarımız göstermektedir ki, dikkate değer bir oranda mekanik azalma göstermektedir. Bu da malzeme tasarımcılarına güneş ışığına maruz kalan pultrude malzemelerdeki bu mekanik azalmanın oluşabileceği ve bu doğrultuda tasarım yapılması gerektiği bilgisini veriyor. Diğer bir yandan da sulu ortamlarda çalışan pultrude malzemeler, sulu ortamda bulunma süresine bağlı olarak bünyesine suyu alarak su absorbe etmektedir, bu da atmosfere açık ortamda çalışan malzemeler için dikkat edilmesi gereken diğer bir husus olarak göze çarpmaktadır.

DeneySEL bölümlerimizden sonra, pultruzyonla üretilmiş olan bir malzemenin 3 nokta eğme deneyini, ABAQUS bilgisayar programıyla simüle ettik. Burada amaç pratikte edindiğimiz değerleri bilgisayar yazılımı üzerinden de girerek malzemenin deforme halini görebilmektir. Bu bölümümüzde pratikte elde ettiğimiz eğme kuvvetini programda girerek hem malzemenin eğilmesini hem de bu eğilme esnasında kritik olan bölgeler ve yük dağılımının ne şekilde olduğunu yazılımın bir özelliği olan renk değiştirme sayesinde rahatlıkla gözlemleyebildik.

KAYNAKLAR

- Bartus, S.D. ve Vaidya, U.K. (2006), “Design and Development of a Long Fiber Thermoplastic Bus Seat”, *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, 19:131-154.
- Giordano, M. ve Nicolais, L.(1997), “Resin Flow in a Pultrusion Process”, *Journal Of Polymer Composites*, 18(6):651-686.
- Chen, C. ve Wang, W. (1998), “The Development Of Glass Fiber Reinforced Polystyrene For Pultrusion. II. Effect Of Processing Parameters For Optimizing The Process”, *Journal Of Polymer Composites*, 19:423-430.
- Çetinbaş, N. (2006), “ Yüksek Performanslı Kompozitler”, 1. Polimerik Kompozitler Sempozyum ve Sergisi, 17-19 Kasım 2006, İzmir, Türkiye.
- Ünal, A., Gülten, Z. (1998), “Pultrusion Yöntemi İle Kompozit Malzeme Üretimi”, *Araştırma Makalesi, YTÜDER*, 01.12.1998, İstanbul.
- Liang, G. ve Garga, A., (2005), “ Cure Characterization of Pultruded Soy-based Composites”, *Araştırma Makalesi, University of Missouri-Rolla, USA*, 10:1509-1520.
- Mazumdar, S.K.(2002), *Composites Manufacturing*, CRC Press, Boca Raton FL, 2002.
- Mariatti, M., Nasır M. ve H. Ismail (2002), “Effect of Prepreg Geometry on The Prepreg and Plain Weave Composite Properties”, *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 21(8):711-722.
- Atarsia, A. ve Bokhili, R. (2000), “Effect of Pulling Speed on the Sizes of the Liquid, Gel and Solid Zone During Thermoset Pultrusion”, *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 19(18):1493-1503.
- Jones, R.M. (1998), *Mechanics Of Composite Materials*, Second Edition, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Taylor & Francis, Inc., Virginia.
- Rahatekar, S.S. ve Roux, J.A. (2003), “Numerical Simulation of Pressure Variation and Resin Flow Injection Pultrusion”, *Journal Of Composite Materials*, 37(12):1067-1082.
- Li, S., Xu, L., Ding, Z. ve James, L. (2003), “Experimental and Therotical Analysis Of Pulling Force in Pultrusion and Resin Injection Pultrusion (RIP)”, *Journal Of Composite Materials*, 37(2):1971.
- Fink, E. ve Bank, L. (2006), “Pultruded Glass Fiber-reinforced Plastic and Paperboard Composite Tubes”, *Araştırma Makalesi, University of Wisconsin-Madison, Engineering Drive*, 25(6):601-616.
- Kerbiriou, V. ve Friedrich, K. (1999), “Pultrusion Of Thermoplastic Composites- Process Optimization and Mathematical Modelling”, *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, 12(2):96-120.
- Bechtold, G., Wiedmer, S. ve Friedrich, K. (2002), “Pultrusion Of Thermoplastic Composites- New Development and Modelling Studies”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 15(5):443-465.

Compston, P., Dexter, D. (2008), "The Effect Of Ultraviolet(UV) light postcuring on resin hardness and interlaminar shear strength of a glass fiber/vinylester composite", *Araştırma Makalesi*, Springer Science and Business Media, LLC 2008, 43:5017-5019.

Correia, J.R., Cabral-Fonseca, S., Branco, F.A., Ferreria, J.G., Eusobio, M.I. and Rodrigues, M.P. (2006), "Durability of Pultruded Glass-Fibre Reinforced Polyester Profiles For Structural Applications", *Araştırma Makalesi*, *Mechanics Of Composite Materials*, 42(4):325-338.

Yahya, A.H.R., Yahaya, A.H., Tahir, A.R.M. ve Horsby, P.R. (2004), "Tensile, Impact and Fiber Length Properties Of Injection-molded Short and Long Glass Fiber reinforced Polyamide 6,6 Composites", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 23(9):969-986.

Rahatekar, S.S. ve Roux, J.A. (2005), "Injection Pultrusion Simulation for Polyester/Glass Mat/ Rovings/Mat Composites", *Araştırma Makalesi*, Mechanical Engineering Department University of Mississippi University, 24(1):53-68.

Lackey, E. ve Vaughan, J.G. (1994), "An Analysis of Factors Affecting Pull Force for the Pultrusion of Graphite/Epoxy Composites", *Journal Of Reinforced Plastics*, 13:188-198.

Raper, K.S., Roux, J.A. McCarty, T.A. ve Vaughan J.G. (2000), " Die Inlet Contour Impact On The Resin In a Pultrusion Die", *Journal Of Composite Materials*, 34(3):199-217.

Gorthala, R., Roux, J.A. ve Vaughan, J.G. (1994), "A Model to Predict Resin Pressure/Back Flow in the Tapered Inlet of a Pultrusion Die", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 13:484-497.

Smith, C. ve Taylor, J. (1994), "An Introduction to Taguchi Techniques Applied to Pultrusion Resins and Processing", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 13:871-879.

Wilson, M.L. ve Buckley, J.D. (1994), "The Potential for Low Cost Thermoplastic Pultrusion", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 13: 927-941.

Malkapuram, R., Kumar, V. ve Negi, Y.S. (2008), "Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 0:1-21.

Voorakaranam, S., Babu, J. ve Kardos, J.L. (1999), " Modeling and Control Of an Injection Pultrusion Process", *Journal Of Composite Materials*, 33(13):1173-1204.

Sarıbıyık, M. (2007), "Hafif Yapı Tasarımında Pultrüzyon Metodu İle Üretilen Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Kullanılması", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(1).

Hackett, R.M. ve Zhu, S. (1992), "Two-Dimensional Finite Element Model of the Pultrusion Process", *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 11:1322-1351.

Srinivasagupta, D., Kardos, J.L. ve Joseph, B. (2003), "Rigorous Dynamic Model-based Economic Design of the Injected Pultrusion Process with Controllability Considerations", *Journal Of Composite Materials*, 37(20):1851-1880.

Davalos, J.F., Qiao, P., Wang, J., Salim, H.A. ve Schlussel, J.Y.(2002), "Shear Moduli of Structural Composites from Torsion Tests", *Journal Of Composite Materials*, 36(10):1151-1173.

Fayad, G.N., Dagher, H.J., Lopez-Anido, R., Thompson, L. ve Hess, P.E. (2008), “Probabilistic Finite Element Analysis of ASTM D3039 Tension Test For Marine Grade Polymer Matrix Composites”, *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, 27(6):583-597.

Lam, Y.C., Li, J. ve Joshi, S.C. (2003), “Simultaneous Optimization of Die-Heat i ng and Pull-Speed in Pultrusion of Thermosetting Composites”, *Journal Of Polymer Composites*, 24(1):199-209.

Yen, C.C., Chen, C. ve Lue, J. (2006), “In-Situ Pultrusion of Urea-Formaldehyde Matrix Composites. II: Effect of Processing Variables on Mechanical Properties”, *Journal Of Polymer Composites*, 2:9-11.

Chen, C. ve Wang, W. (1998), “The Development of Glass Fiber Reinforced Polystyrene For Pultrusion. II: Effect of Processing Parameters for Optimizing the Process”, *Journal Of Polymer Composites*, 19(4):423-429.

Tekeli, S. ve Tetik, O. (2007), “ Örgülü Kompozit Malzemelerin (Glass Epoxy) Ansys ve Abaqus İle Gerilme Analizleri ve Deneysel Kırılma Tokluğunun Hesaplanması”, Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2007.

Saha, G.C. (2005), *Experimental, Numerical and Analytical Studies Of Smart Composite Materials and Their Applications*, Gobinda Chandra Saha, 2005.

Ford, T. (1997), “Aerospace Composites”, *Aircraft Engineering and Aerospace technology*, 69(4):334-342

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://kobi.mynet.com/pdf/kompozit.pdf>
- [2] www.armacplast.com.tr/2006/dl/ypk.pps
- [3] <http://www.arageportal.com>
- [4] www.mkn.itu.edu.tr/~arana/IML212-N8.pdf
- [5] <http://www.a-ztech.com.tr/abqcae.html>
- [6] <http://ansiklopedi.turkcebilgi.com>
- [7] www.composites-europe.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 06.01.1984

Doğum yeri Çanakkale

Lise 1995-2002 Çanakkale Milli Piyango Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2006 Yıldız Üniversitesi Kimya-Metalurji Fak.
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malz. Müh Anabilim Dalı, Malzeme Programı

Çalıştığı kurumlar

2003-2003 Kaptan Demir Çelik A.Ş.

2006-2007 Elga Elektrod San. Ve Tic. A.Ş.

2007-Devam Ediyor Şahinler Metal San. Ve Tic. A.Ş.