

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

**ÇOK İŞLEVİLİ KOMPOZİT MALZEMELER
KULLANILARAK YAPISAL ENERJİ DEPOLAMA
BATARYALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oğuzhan Bartuğ KURUKAYA**

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALATI
**Tez Danışmanı : Dr. Öğretim Üyesi Aysun EĞRİSÖĞÜT
TİRYAKİ**

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK İŞLEVİLİ KOMPOZİT MALZEMELER
KULLANILARAK YAPISAL ENERJİ DEPOLAMA
BATARYALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan Bartuğ KURUKAYA

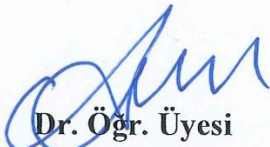
Enstitü Anabilim Dalı

: MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı

: MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 24.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.



Dr. Öğr. Üyesi
Aysun Eğrisöğüt Tiryaki
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi
Seçil Ekşi
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Ekrem Altuncu
Üye

BEYAN

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

Oğuzhan Bartuğ KURUKAYA

24.06.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aysun EĞRİSÖĞÜT TİRYAKİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen ve çalışanı olduğum Profen İletişim Teknolojileri Ar-Ge Merkezine, testlerde beni yalnız bırakmayan Oğuz Kaan HANCIOĞLU ve Ahmet OKUDAN'a, malzeme tedariki konusunda yardımcı olan Polibak şirketine, Tetraktis Kompozite ve çalışmalarımda bana destek olan başta annem Hülya KURUKAYA olmak üzere aileme, yakın arkadaşım Mert COŞKUN ve eşim Zora Bella KURUKAYA CSOKNYAI'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2018-50-01-006) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAVRAMLAR VE TEORİ	5
2.1. Enerji Depolama Yöntemleri	5
2.1.1. Manyetik enerji depolama yöntemi	6
2.1.2. Termal enerji depolama yöntemleri.....	6
2.1.3. Yakıt hücreleri	7
2.1.4. Piller	9
2.1.4.1. Birincil piller.....	10
2.1.4.2. İkincil piller.....	10
2.2. Kompozit Malzemeler	11
2.2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	13
2.2.2. Matrisler	14
2.2.2.1. Metal matrisler.....	14
2.2.2.2. Makro moleküller ve inorganik matrisler	17
2.2.2.3. Polimer esaslı matrisler.....	18

2.2.2.4. Bitumen matrisler	18
2.2.2.5. Mineral matrisler	19
2.2.2.6. Seramik matrisli kompozitler	19
2.2.2.7. Karbon matrisli kompozitler.....	20
2.2.2.8. Cam matrisli kompozitler	21
2.2.2.9. İnorganik bağlayıcı esaslı kompozitler.....	21
2.2.3. Takviyeler	22
2.2.3.1. Fiber takviyeler	22
2.2.3.1.1. Doğal fiber takviyeler.....	23
2.2.3.1.2. Cam fiber takviyeler.....	24
2.2.3.1.3. Karbon fiber takviyeler.....	28
2.2.3.1.4. Polimer fiber takviyeler.....	
2.2.3.1.5. Seramik fiber takviyeler.....	34
2.2.3.1.6. Metal fiber takviyeler.....	36
2.2.3.1.7. Whiskers fiber takviyeler.....	37
2.2.3.2. Dolgu takviyeler	38
2.2.3.3. Partikül takviyeler.....	39
2.3. Teori	40
2.3.1. Çok işlevli malzemeler ve akıllı malzemeler	40
2.3.2. Kapasite	43
2.3.3. Karbon fiber kumaşlar ve örgü tipleri	43
2.3.4. Kompozit malzemelerde çok ölçekli malzeme tasarımı.....	48
2.3.5. Kompozit malzemelerin makro mekanik özelliklerinin hesaplanması	50
2.3.6. Kompozit malzemelerde mikro ve mezo ölçekte mekanik özelliklerin hesaplanması.....	58

BÖLÜM 3.

DENYSEL YÖNTEMLER	70
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	70
3.2. Deney Tasarımı	73

3.2.1. Taguchi deney tasarımı.....	73
3.2.2. Deney düzeneği ve imalat	75
3.2.3. Deneyin gerçekleştirilmesi	76
BÖLÜM 4.	
NUMUNEYE DAYALI HESAPLAMALAR.....	83
BÖLÜM 5.	
ÖLÇÜM	88
5.1. Elektriksel Ölçümler	88
5.2. Mekaniksel Ölçümler.....	90
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR	91
6.1. Mekaniksel Sonuçlar.....	91
6.2. Elektriksel Deney Sonuçları	92
6.3. Taguchi Deneysel Yöntemi – Optimizasyon Sonuçları	93
BÖLÜM 7.	
TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	101
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\bar{E}_{mf}$	: Yapısal kapasitörün özgül rijitliği
$\bar{\Gamma}_{mf}$	: Yapısal kapasitörün enerji yoğunluğu
C_{ij}	: Rijitlik matris elemanı
S_{ij}	: Uyum matris elemanı
M^*	: Yapısal kapasitörün toplam kütlesi
Q_{ij}	: Esneklik katsayılarıyla bağıntılı olan indirgenmiş rijitlik katsayıları
m_e	: Kapasitif elemanın kütlesi
m_e^*	: Yapısal kapasitörde kapasitif elemanın kütlesi
m_{mf}^*	: Yapısal kapasitörün kütlesi
m_s	: Yapısal (structural) kütle
m_s^*	: Yapısal kapasitörde yapısal (structural) kütle
$\bar{\Gamma}$	: Kapasitörün kütle ile normalize edilmiş enerji yoğunluğu
ε_0	: Vakum Ortamının Geçirgenliği
ε_r	: Malzemenin Bağıl Yalıtkanlık Sabiti
η_e	: Kapasitif verim
η_f	: Yapısal verim
η_{mf}	: Çok fonksiyonluluğun verimi
$[A]$	: Şekil değiştirme matrisi
$[B]$	: Bağlantı matrisi
$[D]$	: Eğilme rijitlik matrisi
A	: Paralel plakaların birbirini gören yüzey alanları
BN	: Boron Nitrid

d	: Kapasitörlerde iki plaka arasındaki mesafe
$\bar{E}$	: Elastiklik modülünün yoğunluk ile normalize edilmiş hali
EMI	: Elektromanyetik Girişim
G	: Kayma modülü
PAN	: Poliakrilonitril
PAR	: Poliakrilat
PBI	: Polibenzimidazol
PEM	: Proton Exchange Membrane (Proton Değişim Membranı)
PPD	: Seramik Öncesi PolimerTürevi
PPTA	: P-fenilen tereftalamid
PVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
VLS	: Buhar-Sıvı-Katı
C_{kap}	: Kapasite
E	: Elastiklik modülü
M	: Toplam Sistemin Kütlesi
S	: Kapasitörün Bozulma Voltajı
γ	: Yöne bağlı kayma deformasyonu
ε	: Yöne bağlı deformasyon
σ	: Yöne bağlı gerilme
τ	: Yöne bağlı kayma gerilmesi
ν	: Poisson oranı
[S]	: Uyum matrisi
[C]	: Rijitlik matrisi
N_x, N_y	: Birim uzunluk başına normal kuvvet
N_{xy}	: Birim uzunluk başına kayma kuvveti
M_x, M_y	: Birim uzunluk başına eğilme momenti
M_{xy}	: Birim uzunluk başına burulma momenti
K_x, K_y, K_{xy}	: Katman-düzlem eğriliği
TBH	: Temsili Birim Hücre

K^{TBH}	: Temsili birim hücrenin 4. dereceden sertlik tensörü
K^{FY}	: Atkı ipliğinin 4. dereceden sertlik tensörü
K^{WY}	: Çözü ipliğinin 4. dereceden sertlik tensörü
K^M	: Matrisin 4. dereceden sertlik tensörü
V_y	: İpliğin bir TBH içindeki hacimsel oranı
V_f	: Bir TBH içindeki fiberin hacimsel oranı
V_f^Y	: Bir iplik içindeki fiberin hacimsel oranı
K_{ijkl}^M	: İzotropik bir matrisin sertlik tensörü
δ_{ij}	: Kronecker delta
E^m	: Matrisin elastiklik modüşü
ν^m	: Matrisin poisson oranı
T^{YP}	: Ortalama gerilme yoğunluğu
T^μ	: Gerilme yoğunluğunun konumu
A	: Alan
L	: İpliğin eğrisel uzunluğu
V	: İpliğin hacmi
α	: n eğrisinin teğet çizgisine dik gelecek bölme çizgisinin normale olan açısı
n, m, l	: Triad vektörleri
μ	: Mikro yüzey bölme numarası
L^μ	: mikro-yüzey triadının μ 'ye karşılık gelen iplik parçasının uzunluğu
w^μ	: μ numaralı mikro-yüzeyin ağırlıklandırılması
K_{ijkl}^μ	: Seçilen mikro-yüzey seviyesinin sertlik tensörü
K_{ijkl}^{YP}	: İplik plakasının sertlik tensörü
ϵ_N	: Normal mikro-yüzey gerinimi
ϵ_M	: Enine normal mikro-yüzey gerinimi
$\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$	: Triadlardaki enine kayma gerilmesi
$A_1, A_1, \dots A_9$	: Tek yönlü kompozit ipliğin elastik sabitleri

$K_{ijkl}^{N\mu}$: eksenel ve enine doğrultulardaki normal sertliği

$K_{ijkl}^{P\mu}$: Mikro-yüzeyin poisson oranı etki tensörü

$K_{ijkl}^{S\mu}$: Kayma rijitliği

E_1^Y : İpliğin eksenel elastiklik modülü

E_1^Y : Fiberin eksenel elastiklik modülü

$G_{1'2'}^Y, G_{1'3'}^Y$: İpliğin düzlem içi kayma modülü

$G_{2'3'}^Y$: İpliğin düzlem dışı kayma modülü

$v_{1'2'}^Y, v_{1'3'}^Y, v_{2'3'}^Y$: İpliğin poisson oranları



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Enerji ve Güç Yoğunlukları (Kumar S) .	3
Şekil 2.1. Isıl enerji depolamanın blok diyagramı (Kocaman B.).....	7
Şekil 2.2. Bir PEM yakıt hücresinin çalışma prensibi	8
Şekil 2.3. Ballard firmasının ürettiği Nexa yakıt hücresi.....	8
Şekil 2.4. Horizon firmasının ürettiği H-1000 XP yakıt hücresi	9
Şekil 2.5. Çeşitli boyut ve tiplerdeki birincil piller	10
Şekil 2.6. Farklı Malzemelerin Kompozit Oluşturması Sonucu Mekanik Özellikler	12
Şekil 2.7. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları (Amar ve ark. 2005)	13
Şekil 2.8. Burnu Karbon/Karbon Kompozit Malzemeden Yapılmış Uzay Mekiği (NASA)	21
Şekil 2.9. Kerpiç Malzemeleri	23
Şekil 2.10. Biyokompozitlerin Sınıflandırılması (Amar ve ark. 2005).....	23
Şekil 2.11. Kenevir Fiberin Otomotiv Sektöründe Kullanımı	24
Şekil 2.12. Dolgu Takviyeler	39
Şekil 2.13. Akıllı Malzeme-Çevre Etkileşimi	40
Şekil 2.14. Paralel plakalar ve ölçüler,.....	43
Şekil 2.15. Plain Örgü	44
Şekil 2.16. Twill Örgü.....	45
Şekil 2.17. Satin Örgü	45
Şekil 2.18. Basket Örgü	46
Şekil 2.19. Leno Örgü	46
Şekil 2.20. Mock Leno Örgü.....	47
Şekil 2.21. Kırpık Karbon Elyaf	48
Şekil 2.22. İplik (Yarn)	49
Şekil 2.23. Çok Ölçekli Malzeme Tasarım Şeması	49
Şekil 2.24. Malzemenin Kartezyen Koordinat Sistemi	51

Şekil 2.25: 1-2-3 Kartezyen Koordinat Sistemi	52
Şekil 2.26. Laminat tabaka koordinatlama sistemi	57
Şekil 2.27. Plain Örgü Tipi ve Temsili Birim Hücresi.....	59
Şekil 2.28. 2x2 Twill Örgü Tipi ve Temsili Birim Hücresi	59
Şekil 2.29. Plain Örgü Tipinin Mikro-yüzey Triad Ağırlıklandırılması	61
Şekil 2.30. Twill (2x2) Örgü Tipinin Mikro-yüzey Triad Ağırlıklandırılması	61
Şekil 2.31. Triadlar ve diğer koordinat sistemlerinin gösterimi	62
Şekil 3.1. Yalıtkanlık Dayanım Testi (6 kV'a kadar)	71
Şekil 3.2. Yalıtkanlık Dayanım Testi (250 kV'a kadar)	71
Şekil 3.3. Yalıtkanlık Dayanım Testinin Şematik Gösterimi.....	72
Şekil 3.4. L6 Ortogonal Dizisi $3^2 \times 2^1$ (Sorana ve Lorentz).....	74
Şekil 3.5. Vakum Paketleme Yöntemi ile Karbon Fiber Kapasitör Üretimi.....	75
Şekil 3.6. Test Numunesi 7 ve 8'in ölçüleri	76
Şekil 3.7. Test Numunesi 1,2,3,4,5 ve 6'nın Ölçüleri	77
Şekil 3.8. Test Numunesi 8'in Ölçüleri	77
Şekil 3.9. Deney Kalıp Yerleşimi	78
Şekil 3.10. Kalıp Tasarımı	79
Şekil 3.11. Reçine Emdirilmiş Karbon Fiber	80
Şekil 3.12. Numuneler Üzerine Yerleştirilen Katmanlar	81
Şekil 3.13. Vakum Altında Kurlenme.....	82
Şekil 4.1. Digimat Giriş Bölümü.....	83
Şekil 4.2. TexGen4SC Uzak Bilgisayar Arayüzü	84
Şekil 4.3. eLamX2 Program Ara yüzü	85
Şekil 4.4. 200 g/m ² 2x2 Twill Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi.....	86
Şekil 4.5. 200 g/m ² Plain Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi	86
Şekil 4.6. 420 g/m ² Twill Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi	86
Şekil 5.1. 555 Entegresinin Basit Şeması.....	88
Şekil 5.2. Devre Şeması	88
Şekil 5.3. Elektriksel Test Düzenegi	89
Şekil 5.4. Sincotec Power Swingly Test Cihazı	90
Şekil 6.1. En büyük spesifik elastiklik modülü için A parametresinin S/G oranları	95
Şekil 6.2. En büyük spesifik elastiklik modülü için B parametresinin S/G oranları	95

Şekil 6.3. En büyük spesifik elastiklik modülü için C parametresinin S/G oranları	95
Şekil 6.4. En büyük spesifik çekme dayanımı için A parametresinin S/G oranları .	97
Şekil 6.5. En büyük spesifik çekme dayanımı için B parametresinin S/G oranları .	97
Şekil 6.6. En büyük spesifik çekme dayanımı için C parametresinin S/G oranları .	97
Şekil 6.7. En büyük enerji yoğunluğu için A parametresinin S/G oranları	99
Şekil 6.8. En büyük enerji yoğunluğu için B parametresinin S/G oranları.....	99
Şekil 6.9. En büyük enerji yoğunluğu için C parametresinin S/G oranları.....	100
Şekil 7.1. Kapasite Lineerliği.....	101
Şekil 7.2. Plastik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Elastiklik Modülüne Göre Karşılaştırılması	103
Şekil 7.3. Plastik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Çekme Dayanımına Göre Karşılaştırılması	103
Şekil 7.4. Alüminyum Elektrolitik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Elastiklik Modülüne Göre Karşılaştırılması.....	104
Şekil 7.5. Alüminyum Elektrolitik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Çekme Dayanımına Göre Karşılaştırılması.....	105

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Mühendislik Malzemelerinin Evrimi (Autar, 2006)	12
Tablo 2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması	14
Tablo 2.3. Örgü Tiplerinin Özellikleri (5 üzerinden).....	47
Tablo 3.1. Kullanılan yalıtkan malzemelerin dielektrik dayanımı.....	72
Tablo 3.2. Taguchi Metodu İçin Parametre ve Seviyeler.....	73
Tablo 3.3. Deney Numuneleri	74
Tablo 4.1. Karbon Fiberin Mekanik Özellikleri.....	85
Tablo 4.2. Epoksinin Mekaniksel Özellikleri	85
Tablo 4.3. İnce Filmlerin Mekaniksel Özellikleri	85
Tablo 4.4. Hesaplanan Tek Tabaka Lamina Özellikleri	87
Tablo 4.5. Numunelerin Hesaplanan Elastiklik Modülleri	87
Tablo 6.1. Hesaplanan ve Test Sonuçları Karşılaştırılması	91
Tablo 6.2. Spesifik Elastiklik Modülü (GPa/ g/cm ³)	91
Tablo 6.3. Spesifik Çekme Dayanımı (MPa/g/cm ³)	92
Tablo 6.4. Elektriksel Deney Sonuçları [nF]	92
Tablo 6.5. Lineerite test sonuçları.....	93
Tablo 6.6. Üretilen Numunelerin Enerji Yoğunlukları (j/g)	93
Tablo 6.7. Sinyal/Gürültü Oranının Karakteristik Tipine Göre Hesaplanması.....	94
Tablo 6.8. Spesifik Elastiklik Modülüne Göre En Büyük En İyi (Numune 9)	94
Tablo 6.9. En büyük spesifik elastiklik modülü için S/G oranları	94
Tablo 6.10. Spesifik Çekme Dayanımına Göre En Büyük En İyi (Numune 10)....	96
Tablo 6.11. En büyük spesifik çekme dayanımı için S/G oranları.....	96
Tablo 6.12. Enerji Yoğunluğuna Göre En Büyük En İyi (Numune 11)	98
Tablo 6.13. En büyük enerji yoğunluğu için S/G oranları	98
Tablo 6.14. En Büyük En İyi Kombinasyon Değerleri.....	100
Tablo 7.1. Numunelerin Genel Özellikleri.....	102

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber, kompozit, yapısal enerji depolama, yapısal batarya, yapısal kapasitör

Günümüzde fosil yakıtlardan kaynaklanan pek çok doğa sorunları bulunmaktadır. İnsanoğlu bunun önüne geçebilmek adına her ne kadar geç kaldıysa da zamanla alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir ya da yönelecektir. Bunun neticesinde kullandığımız pek çok fosil yakıtla çalışan ulaşım aracı (otomobil, otobüs, motosiklet, uçak vb.) zaman içinde yerini elektrikli araçlara bırakacaktır. Fakat bilindiği üzere elektrikli vasıtaların da kendine has sorunları bulunmaktadır. Bunlardan en büyüğü ise enerji depolama ve daha az enerji harcamak adına hafiflik sorunlarıdır.

Bu çalışmada, enerji depolama ve hafiflik sorunlarına çözüm getirmek adına farklı bir bakış açısı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana fikri, karbonfiber plakaların içine kapasitör vazifesi görecektir şekilde elektrik enerjisi depolamaktır. Basit olarak paralel plakalar arasında yalıtım malzemesi bulunan kapasitör mantığı kullanılmıştır. Metre kare başına düşen ağırlıkları farklı karbon fiber kumaşlar, yalıtkanlıkları ve elektrik geçirgenlikleri farklı ince film malzemeler ile kombinasyonlar oluşturulmuştur. Ortaya çıkan kompozit malzemelerin elektrik depolama özellikleri, çok fonksiyonlulukları, elastiklik modülleri, çekme dayanımları test edilmiştir.

Yapılan testlerin numuneleri hazırlanırken Taguchi metodu ile bir deney planlaması yapılmıştır. Çok fonksiyonlulukları hesaplanan malzemelerin enerji yoğunlukları ve mukavemet değerleri ile ilgili bir karşılaştırma hazırlanmıştır.

DEVELOPING STRUCTURAL ENERGY STORAGE BATTERIES USING MULTI FUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

Keywords: Carbon fiber, composite, structural energy storage, structural battery, structural capacitor

Today, there are many natural problems arising from fossil fuels. In order to prevent this, human beings will turn to or tend to alternate sources of energy in time. As a result of this, many fossil fuel transportation vehicles (cars, buses, motorcycles, planes etc.) will be replaced by electric vehicles. However, as is known, electric vehicles also have their own problems. The biggest of these problems is high energy storage and lightness problems in order to spend less energy.

In this study, a different perspective has been realized to solve energy storage and lightness problems. The main idea of the study is to store electrical energy as a capacitor into carbon fiber plates. Basically, the capacitor logic with insulating material is used in between the parallel plates. Combinations of different carbon fiber fabrics, insulators and electrical transmittances with different thin film materials have been formed. Electrical storage properties, multifunctionality, elasticity modules, tensile strengths of the resulting composite materials have been tested.

In order to produce the samples of the tests, an experiment planning was made with the Taguchi method. A comparison of the energy densities and strength values of the materials with multifunctional properties has been prepared.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji sayesinde enerjinin formu değiştirilerek farklı formlarda enerji depolanabilmektedir. Enerji depolama yöntemlerinde batarya yapıları, fosil yakıtlar ve bunlar gibi sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler ağır olup, ağırlığın mekanik özelliklere bir etkisi olmayan yapılardır. Chung ve Wang (1999) tarafından sunulan bir fikir ile karbon fiberin yarı iletken yapısının detektörler, diyotlar ve bunlar gibi yapısal elektroniklerde kullanılması ileri sürüldü. Bununla birlikte polimer matris ile güçlendirilmiş karbon fiber kompozit arasına, dielektrik malzeme konularak paralel plakalı kompozit yapılmasını önerdiler. Bu şekilde birden fazla işlevi yerine getirebilecek bir malzemenin ortaya çıkabileceği fikrini ortaya attılar.

Devam eden çalışmalarda Luo ve Chug (2001) yapısal bir kapasitörün üretilebileceğini kanıtladılar. Luo ve Chug (2001) yaptıkları çalışmalarda farklı kalınlıklarda kâğıt ve yönsüz önceden reçine emdirilmiş karbon fiber (prepreg) kullanarak yapısal kapasitör elde etmeyi başardılar. Bir başka çalışmada da Beachle ve arkadaşları önceden reçine emdirilmiş halde bulunan cam fiber ve metalize edilmiş polimer film ile bir uygulama gerçekleştirdiler. En son çalışmalarda ise O'Brien ve arkadaşları (2011) fiber boşluklarının çok işlevli kompozit malzeme üzerindeki etkisini ölçmek için bir çalışma sundu. Bu çalışmada 2,5 nF ile 0,34 J/g olmak üzere bir enerji depolama kapasitesi elde ettiğini belirtti ve çok fonksiyonluluğun ağırlığı azaltma etkisi üzerinde bir eşitlik gösterdi.

O'Brien'in yaptığı çalışmalarda belirtildiği üzere, yapısal kapasitörün spesifik elastiklik modülü beklenen karışım kuralında (Rule of Mixture) elde edilen değerden daha düşük olmaktaydı.

Tony Carlson ve arkadaşları (2013) yaptığı çalışmaların ilk bölümünde farklı kalınlıklarda kâğıt, PA, PC ve PET filmleri polimer ile güçlendirilmiş karbon fiber ile kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre çok fonksiyonlulukta PA, PC ve PET film kullanılan yapısal kapasitörlerin daha kullanışlı olduğu görülmektedir. Çalışmalarının ikinci bölümünde PA, PC ve PET film kullanarak mekaniksel özelliklerde yırtılma dayanımını baz almıştır. Üçüncü bölümde, ilk iki bölümden yaptığı çalışmalardan yola çıkarak DuPont'tan tedarik ettiği PET filmlerin farklı kalınlıkları üzerine yapışma verimliliğini arttırmak amacıyla plazma yüzey işlemleri uygulayarak ve bu işlem uygulanmadan çalışmalar gerçekleştirmiştir. Burada önemli olan ILSS (Intar Laminar Share Strength) yani laminalar arası ayrılma dayanımıdır.

Daha önce yapılan çalışmalarda PP (polipropilen) ve PVC (polivinilklorür) film kullanılmamaktadır. PP ve PVC ince filmi piyasada oldukça yaygın olarak bulunan ve ucuz olan film türleridir. Çok fonksiyonluluğa ilaveten yapılan çalışmalara fiyat dengesinde eklenmelidir.

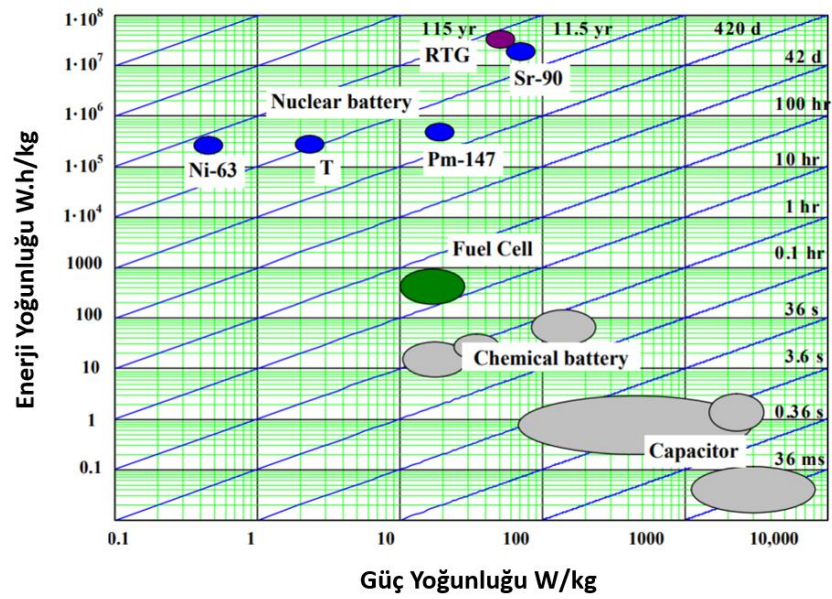
Elektrik alan birbirine paralel iki yüzey arasında değişmemektedir fakat polimer ile güçlendirilmiş karbon fiber laminaların yüzeyleri ne kadar düz görünsede, iletken yüzeyleri her zaman iç kısımda dalgalı yapıda olacaktır ve bu dalgalı yapı, paralelliği etkileyeceğinden kapasitörde performans kaybı meydana getirecektir. Bu performans kaybı, birbirine paralel olan alanların genişlemesi ile lineer olarak arta bilir ya da artmayabilir. Aynı zamanda farklı örgü tiplerinin bu dalgalılığa etkisinde olacaktır ya da aynı örgü tipi içinde farklı filament sayısına (örneğin 3k ve 12k) sahip laminaların farklı etkisi görülebilir.

Muhtemeldirki, epoksi ile filmlerin yapışma yüzeyleri düzgün olmayabilir. Buna ilaveten karbon filamentler arsasına ve örgüden kaynaklı boşluklara yerleşen epoksinin elektrik alana etkisi olacaktır.

Bu yüksek lisans tezinde yapılan çalışmada PP ve PVC film kullanılmıştır. PP-PWH film renklendirilmiştir (beyaz renkte) ve PP-LNC film renksizdir. Çeşit olarak her bir PP film türü 0,02 ve 0,04 mm kalınlıkta olarak belirlenmiştir. 0,08 mm ve 0,12 mm

kalınlığında PVC film kullanılmıştır. Bu 6 çeşit filmin 200 gr/m² twill, 200 gr/m² plain ve 420 gr/m² twill olmak üzere 2 farklı örgü ve 2 farklı özgül ağırlık tipinde karbon fiber kumaş tipiyle kombinasyonları Taguchi metoduna göre deneysel olarak çalışılmıştır.

Tony Carlson ve O'Brien'in dayandırdığı fikir her daim bir senaryo üzerine yapılmıştır. Senaryo, enerji depolayan bir yapının yerine alternatif bir yapı önererek onun mekaniksel özelliklerini kullanmak üzeredir.



Şekil 1.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Enerji ve Güç Yoğunlukları (Kumar S)

Şekil 1.1.'de gösterildiği üzere kapasitörler 0,1-0,03 Wh/kg (0,36-0,1 J/g) aralığında bir enerji yoğunluğuna sahiptirler (Kumar 2016).

Bu tezde kullanılacak olan senaryo ise 0,36 J/g enerji yoğunluğuna sahip alüminyum elektrolitik kapasitör ve 0,1 J/g enerji yoğunluğuna sahip plastik bir kapasitörün karbon fiberden yapılmış yapısal kapasitör ile değiştirilmesinin çok fonksiyonluluğu irdelenecektir.

Alüminyumun ortalama spesifik elastiklik modülü 25 GPa/g/cm^3 ve spesifik çekme dayanımı 150 MPa/g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Plastik kapasitörün ise spesifik elastiklik modülü $8,5 \text{ GPa}$ ve spesifik çekme dayanımı $111,8 \text{ MPa}$ 'dır (Ashby, 2005).



BÖLÜM 2. KAVRAMLAR VE TEORİ

2.1. Enerji Depolama Yöntemleri

Yararlı iş yapabilme yeteneğine enerji denilmektedir. Bu yararlı iş yapma yeteneği elektrik, kimyasal, ısı vb. gibi birçok türü bulunabilir. Bir cismin hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji, bir cismin bulunduğu durumdan dolayı depoladığı enerjiye de potansiyel enerji denilmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji formları birbirine dönüşebilirler. Termodinamiğin 1. kanununa göre enerji vardan yok, yoktan var edilemez ve birbiri içerisinde form değiştirebilir. Buna enerjinin korunumu adı verilmektedir. Temelde, bir enerjinin depolanması kinetik enerji formundan potansiyel enerji formuna dönüştürülerek depolanması ile gerçekleştirilir.

Enerjinin depolanması çeşitli şekillerde olabilmektedir ve sadece tek bir teknolojik yöntemden ziyade, farklı metotların ortak olarak kullanıldığı teknikler bütünüdür (Landry M. ve Gagnon, 2015). Bu depolama çeşitleri:

- Volan Depolama
- Pompalı Hidroelektrik Depolama
- Basınçlı Hava Enerji Depolama
- Süper Kapasitörler
- Süper İletken Manyetik Enerji Depolama
- Termal Enerji Depolama
- Hidrojen Enerjisi Depolama
- Piller
- Yeraltı Termal Enerji Depolama
- Eriyik Tuzlar
- Kimyasal-Hidrojen Depolama

- Katı Hal Medya Depolama
- Buz Depolama
- Sıcak ve Soğuk Su depolama (Landry M. ve Gagnon)

1.1.1. Mekanik enerji depolama yöntemleri

Bir malzeme sistemine kuvvet uygulayarak, bu kuvvetin sonucu oluşan enerjiyi depolamada iki temel sistem vardır. Bunlardan birincisi potansiyel enerjideki değişim ile ilişkili iken, ikincisi kütlenin hareketinden doğan enerji, yani kinetik enerji ile ilişkilidir. Bu iki enerji birbirlerine dönüştürülebildikleri gibi ısı enerjisine veya işe de dönüştürülebilir (Deran ve Ahmet, 2016).

2.1.1. Manyetik enerji depolama yöntemi

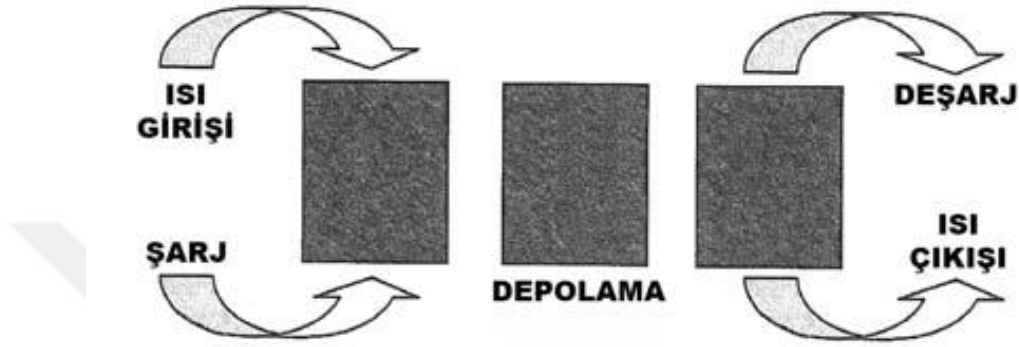
Enerji geri çevrilebilir bir şekilde elektrik alan içerisinde depolanabilir. Bunu yapan cihazlara kapasitör adı verilir. Kondansatörler de bu tip depolama yapan cihazlara örnektir. Bunu yapan genel olarak SMES (Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi) ve SKED (süper kapasitör enerji depolama sistemi) olmak üzere iki tipte cihaz vardır. Depoladıkları enerji miktarı, enerji absorpsyonu ve salınım değerleri gibi pratik kullanım özelliklerine göre çok geniş skalaya sahiptirler (Deran ve Ahmet, 2016).

2.1.2. Termal enerji depolama yöntemleri

Katı veya sıvı malzemelerin sıcaklık artışıyla birlikte yapısında depoladığı enerji ile kimyasal bir değişiklik olmadan malzemelerin faz değişimine neden olan ısı depolama sistemi olmak üzere iki farklı termal enerji depolama mekanizması – mantığı mevcuttur (Huggins, 2010).

Termal enerji depolanması sıcak veya soğğun daha sonra kullanılmak üzere saklanmasını sağlamakla birlikte enerji üretimi ve tüketimi arasındaki sıcaklık, zaman, yer, güç farkının arz-talep dengesinin sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Cabeza ve ark. 2015).

Tüm termal enerji depolama sistemlerinin temel prensipleri aynı olmakla birlikte enerjinin ihtiyaç olduğunda geri alınması üzerine sisteme bir süreliğine enerji depolanması mantığına dayanmaktadır. Şarj, depolama ve deşarj olmak üzere üç kademeden oluşan sistemde bazen aşamaların aynı anda çalışmasına bazen de aşamaların birden fazla tekrarlanması prensibine dayanabilir.

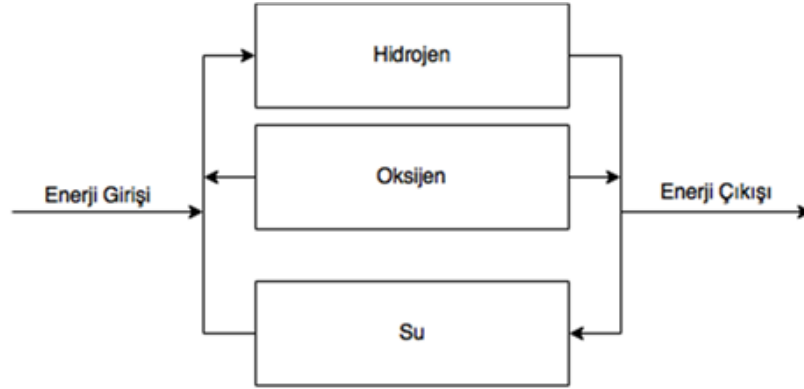


Şekil 2.1. Isıl enerji depolamanın blok diyagramı (Kocaman B.)

2.1.3. Yakıt hücreleri

Piller gibi temelde elektrokimyasal dönüşüm araçlarıdır ve kullandıkları yakıtın enerjisini elektrokimyasal dönüşüm yollarıyla elektrik enerjisine çevirebilen sistemlerdir. Yakıt hücrelerinin pillerden farkı bir elektrik yükü ya da bir enerji depolama değil, bir maddenin ya da bileşiğin depolanmasıdır. Bu depolanan madde-yakıt birtakım elektrokimyasal yollar ile başka bir bileşiğe dönüştürülerek ortaya çıkan fazla enerji sisteme verilir.

Yakıt pillerinin üç temel elemanı vardır ve bunlar anot, katot ve elektrolittir. Yapılan elektrokimyasal işlem sırasında iyonlarına ayrılan yakıtta iyonlar elektrolit vasıtasıyla katota giderken, elektronlar bir dış devre üzerinden akarlar ve bu elektronlar elektrik akımını oluştururlar. Katotta oksijen ve hidrojen iyonlarının tepkimeye girmesi sonucu atık madde olarak saf su açığa çıkar.

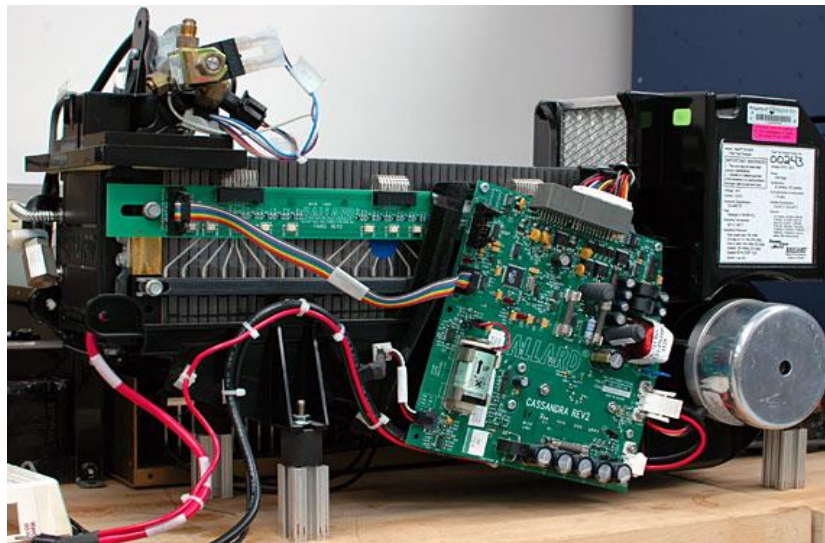


Şekil 2.2. Bir PEM yakıt hücresinin çalışma prensibi

Yakıt hücreleri spesifik enerji yoğunluğu bakımından pillerden daha yüksek değer göstermektedir. Fakat spesifik güç açısından oldukça düşük değerlere sahip olup yüksek maliyetli teçhizatlardır.

Yakıt hücrelerinin tipi elektrolit malzemesine göre değişmekle birlikte şöyledir:

- Fosforik Asit Yakıt Hücresi
- Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi
- Katı Oksit Yakıt Hücresi
- Proton Değişim Membranları
- Alkali Yakıt Hücresi



Şekil 2.3. Ballard firmasının ürettiği Nexa yakıt hücresi

Seçilen elektrolit genellikle sistemin çalışma sıcaklığını belirlemektedir ve bununla birlikte yakıt hücrelerinin sıcaklığa bağlı olarak ta ayrımı yapılabilir.

Yakıt hücreleri genelde hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı cihazlardır. Hidrojen periyodik tabloda bulunan en küçük element olduğundan dolayı depolaması oldukça zor ve zahmetlidir. Depolanma yöntemleri,

- Yüksek basınçlı tanklara gaz olarak depolama
- Yalıtımlı tanklara sıvı hidrojen depolama
- Metal hidrür tüplerde katılara proton olarak depolama
- Diğer hidrojen depolama yaklaşımlarıdır.



Şekil 2.4.Horizon firmasının ürettiği H-1000 XP yakıt hücresi

2.1.4. Piller

Piller, kimyasal enerjiyi depolayıp elektrik enerjisi halinde veren sistemlerdir. Gelişmiş ülkelerde kişi başına harcanan pil adeti yılda 10'dan fazladır.

Pillerin tarihi 1800'lü tarihlere kadar uzandığı bilinse de yeni bulgular, antik mısır uygarlığında bir tür pillerin kullanıldığını açığa çıkartmıştır. Günümüzde, taşınabilir elektrikli cihazların artması, elektrik depolama ihtiyacının buna bağlı olarak artması ve özellikle mobil araçların artması sebebiyle gelişimini hızla sürdüren pil, son yarım yüzyılda çok ilerleme kat etmiştir.

Piller şarj edilebilme özelliklerine göre ikiye ayrılır;

- Birincil (primary) piller,
- İkincil (secondary) piller.

2.1.4.1. Birincil piller

Tek kullanım özelliğine sahip olan, yani bir kere kullanıldıktan sonra bir daha kullanılamayan pillere birincil piller denilmektedir. Bu tür piller kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilemezler. Genellikle taşınabilir, küçük, az enerji isteri olan cihazlarda kullanılmaktadır. Çalışma voltajları ve şekillerine göre kendi aralarında sınıflandırılırlar.



Şekil 2.5. Çeşitli boyut ve tiplerdeki birincil piller

2.1.4.2. İkincil piller

Birden fazla şarj-deşarj edilebilen, defalarca kullanılabilen pillere İkincil Piller denmektedir. Günümüzde oldukça yaygın kullanılması üretim maliyetlerinin azalmasına sebep olmuştur. İçinde bulundurdıkları kimyasal maddeler, yapıları,

Çalışma voltaj aralıkları, kullanım alanları, kullanım şekilleri gibi parametrelere bağlı olarak değişik türlerde ikincil Piller bulunmaktadır.

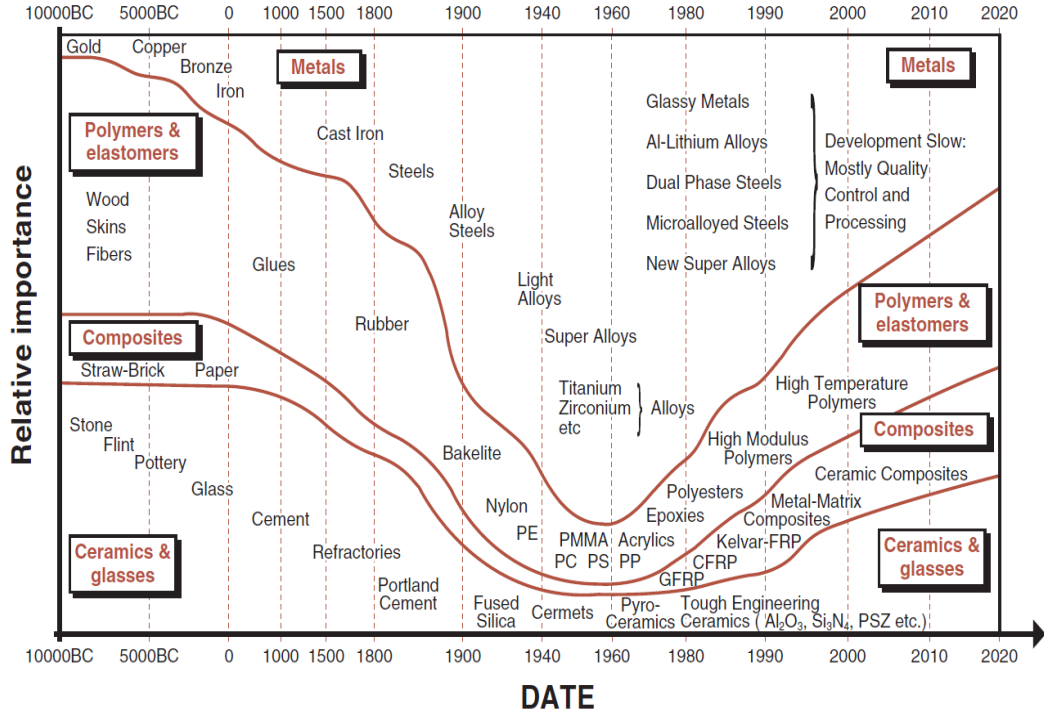
2.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit, makroskopik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbirleri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş yapı malzemesidir. Bileşenlerden birisi takviye fazı, diğeri ise matris olarak adlandırılır. Takviye fazının malzemesi fiber, parçacık veya pul formunda olabilir. Matris fazın malzemeleri genellikle sürekli dir. Kompozit sistemlere örnek olarak çelikle takviye edilmiş beton ve grafit vb. gibi fiberlerle takviye edilmiş epoksi verilebilir (Autar 2006).

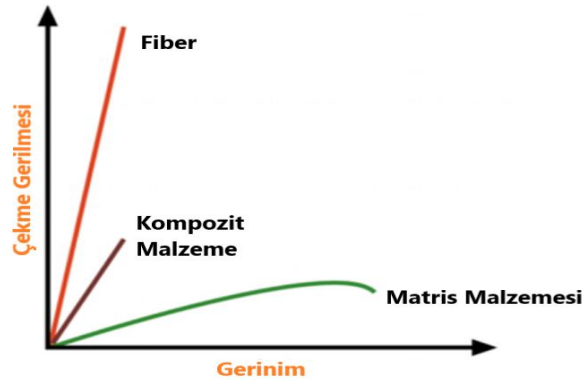
Kompozit malzemeler, oluştukları malzemelere kıyasla daha iyi performans gösteren bir malzeme sınıfıdır. Genel olarak kompozit malzemeler farklı boyutlarda ve seviyelerde, genellikle farklı bireysel malzemelerin birleşimiyle tasarım ve optimizasyon sonucu olarak en son ortaya çıkan gelişmiş malzemeye denir. Geliştirilmiş performans veya tek bir malzemenin sağlayamayacağı yeni bir işlev, kompozitlerde farklı seviyelerde kompozisyon, arayüz veya boyutsal etkiler yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu faktörler kompozit biliminin temelini oluşturur (Xiao-Su Yi, 2006).

1950 ve 1960'larda, havacılık ve savunma endüstrilerinin zorlu gereksinimleri, gelişmiş kompozit malzemelerin tasarımını tetikledi. Günümüzde, ileri teknoloji kompozitleri, endüstriyel teknolojinin ilerlemesiyle desteklenen bu alanlardaki zengin potansiyeli ile hala yapısal malzemelerin ortaya çıkarılmasını hedeflemektedir. Kompozit bilim ve teknoloji bilgisi büyüdükçe, yapı-işlev entegrasyonu, fonksiyonel ve çok işlevli kompozitler, akıllı kompozitler ve nanokompozitler ile çok sayıda yeni malzeme ve teknoloji geliştirilmektedir. Gelişmiş yapısal kompozitler ve fonksiyonel kompozitler, hesaplama, işleme, karakterizasyon ve kompozit uygulamalardaki gelişmelerle birleştirilerek yirmi birinci yüzyılda yeni bir kompozit malzeme çağında yerini almıştır (Xiao-Su Yi, 2006).

Tablo 2.1. Mühendislik Malzemelerinin Evrimi (Autar, 2006)

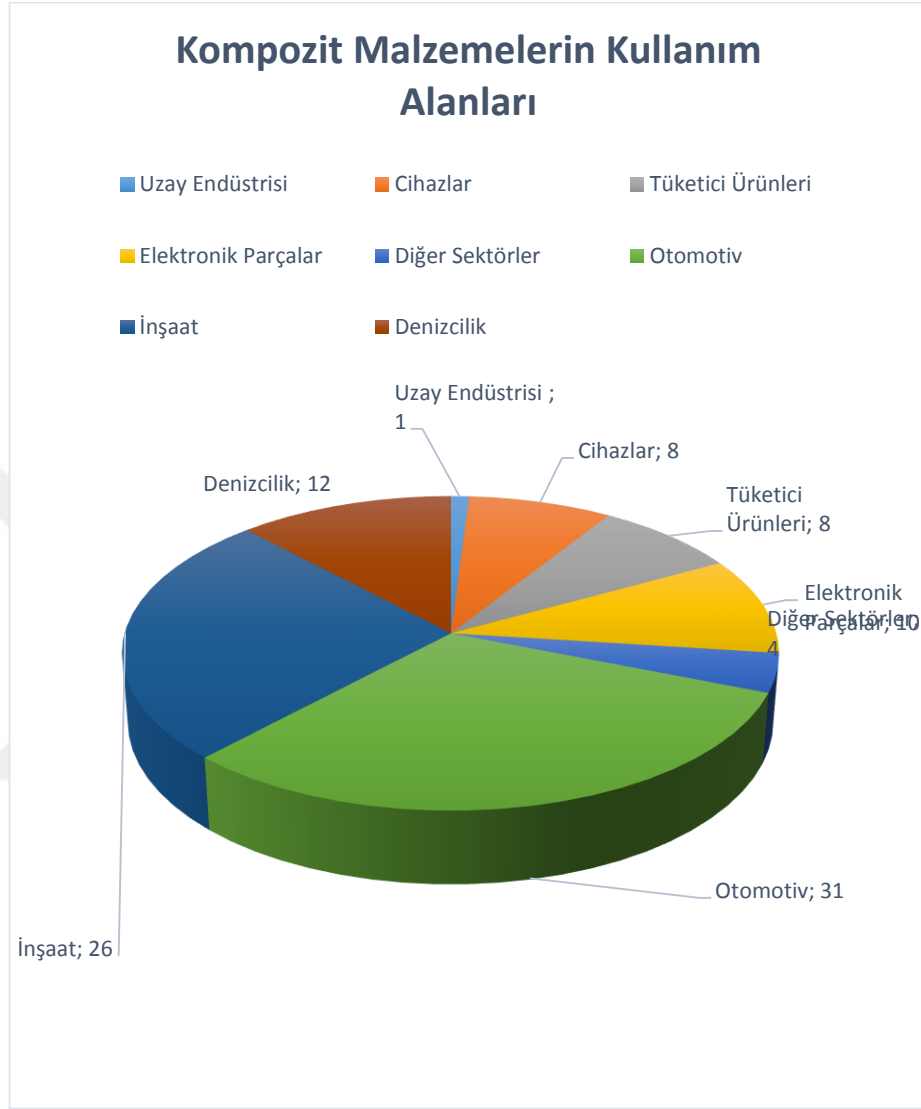


İnsanoğlu taş devrinden endüstri devrimine kadar olan süreçte gerek kerpiç evler gerek savaş aletleri gerekse tarım aletleri olmak üzere pek çok alanda kompozit malzeme kullanmıştır. Fakat zamanla değişen doğa şartları, hayat koşulları ve teknolojiye birtakım gelişmeler, kompozit teknolojisinden uzaklaşılmasına neden oldu. Daha sonra yapılan çalışmalarda görüldü ki kompozit malzemeler bileşenlerinin farklı özelliklerini almaktadır.



Şekil 2.6. Farklı Malzemelerin Kompozit Oluşturması Sonucu Mekanik Özellikler

Birçok alanda kullanılmakta olan kompozit malzemeler, aslında geçmişin ve geleceğin malzeme teknolojisini bizlere hayatımızın her alanında hissettirmektedir (Şekil 2.7.).

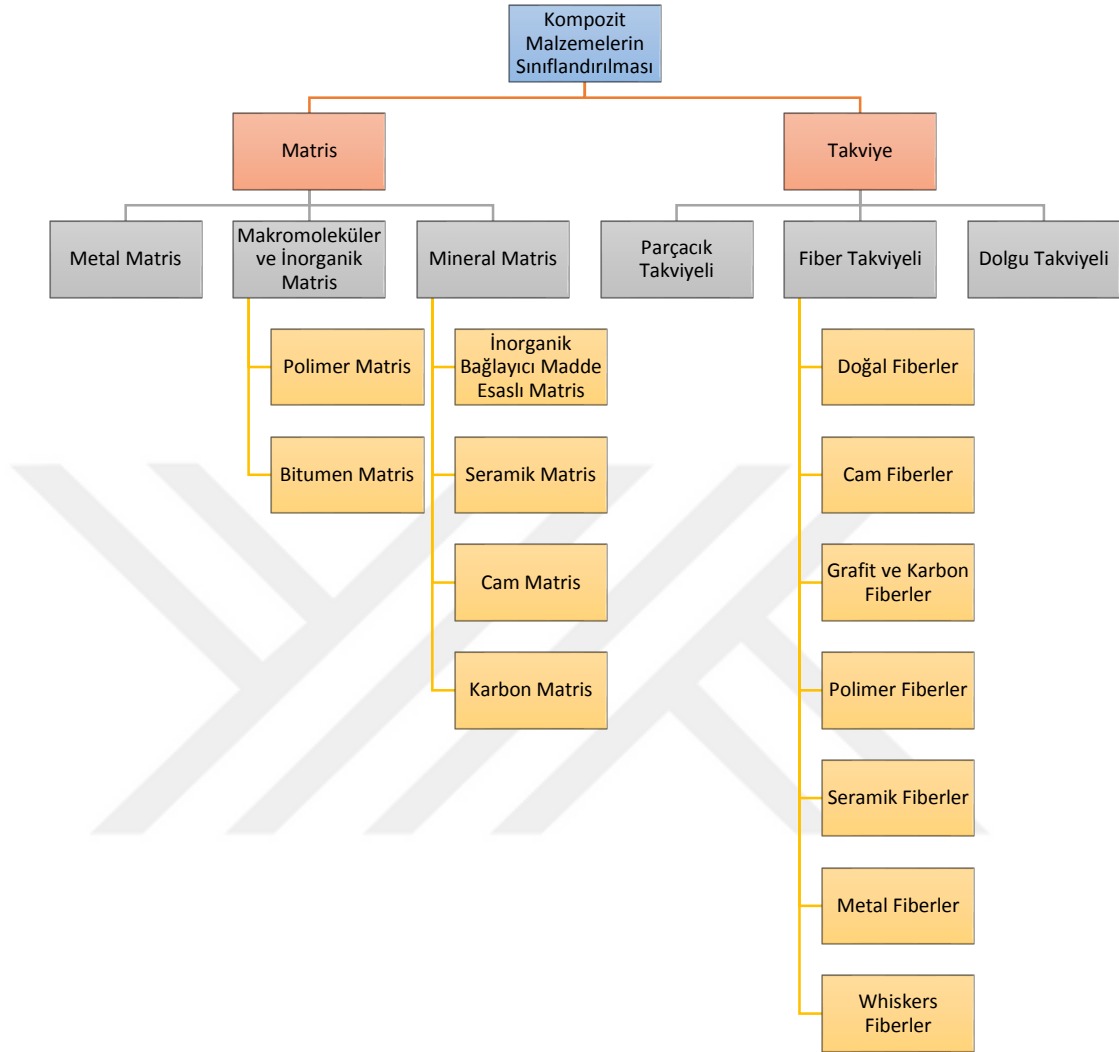


Şekil 2.7.Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları (Amar ve ark. 2005)

2.2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genellikle iki farklı duruma göre sınıflandırılırlar. Bunlardan birincisi matris malzemesi ve diğeri takviye malzemesidir.

Tablo 2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması



2.2.2. Matrisler

2.2.2.1. Metal matrisler

Kompozit malzemelerin her birinin hazırlanması, bileşenlerinin doğasına dayanmaktadır. Tüm materyallerin pozitif ve negatif özellikleri vardır, fakat kompozitleri hazırlayarak, genellikle onları değiştirmeye çalışırız. Bu malzemelerin avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesi her zaman diğer kullanılmış malzemeler bağlamında sunulmaktadır (Miroslava 2015).

Metal Matrisli Kompozitlerin avantajları:

- Yüksek mukavemet ve tokluk
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirlik
- Düşük sönümler
- Geliştirilmiş – daha yüksek radyasyon direnci
- Gaz emme ya da yayma
- Çoğunlukla yanmazlar
- Elektriksel ve Isıl iletkenlikleri yüksektir
- Birbirleri ve diğer metaller ile kaynak yoluyla birleştirilebilirler
- Yüksek sertlik ve aşınma direnci gösterirler
- Yüzey hasarlarına daha çok dirençlidirler.

Metal Matrisli Kompozitlerin dezavantajları:

- Yüzey hasarlarına daha çok dirençlidirler.
- Daha karmaşık üretim
- Nispeten az gelişmiş üretim teknolojisi
- Yüksek özgül ağırlık ve yoğunluk
- Genellikle daha yüksek fiyatlıdır
- Bakım ve yok etmek için gerekli deneyim
- Daha kötü şekillendirilebilirlik
- Bazıları için korozyon dayanımı düşüktür.

Bu kompozitlerin sağlamlığı ve serliğinden ziyade başka üretim amaçları bulunmaktadır. Bu kompozitlerin üretilmesinin temel amacı:

- Metalin kullanıldığı sıcaklık aralığının yüksek olması
- Mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak sıcaklık bağımlılığını azaltmak
- Aşınma direncini arttırmak için
- Saf metallere karşı özgül ağırlığı (yoğunluğu) azaltmak
- Termal genleşmeyi azaltmak.

Alüminyum ve alüminyum bazlı kompozitler:

Fiyat ve diğer değişkenler göz önünde bulundurulduğunda, alüminyum matrisler en çok kullanılan metal matrislerdir. Alüminyum hafiftir, korozyona uğramaz, düşük sıcaklıklarda uygun fiyata üretilir. 600 °C'ye kadar dayanabilen pek çok alüminyum matrisli kompozit mevcuttur. Elde edilen kompozitler, yoğunluk oranına karşı iyi bir mukavemete sahiptir ve bu nedenle genellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır ve aynı zamanda iyi bir termal ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Alüminyumun oksijene olan yüksek aktivitesi nedeniyle, takviye fazları esas olarak oksitleri Al_2O_3 , karboksitleri Al_4C_3 ve SiC'dir.

Titanyum ve titanyum bazlı kompozitler:

Bunlar çoğunlukla fiber kompozitler için kullanılır. Özellikleri arasında alaşımların değişkenliği, çeliğe benzer bir mukavemet, düşük korozyon ve daha yüksek fiyat bulunmaktadır. Bu tür kompozitler, alüminyumun yoğunluğunun yaklaşık iki katı kadardır, fakat titanyum kompozitlerin dayanımının yoğunluğa oranı, alüminyumdan daha yüksektir ve ayrıca daha yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Alüminyumla karşılaştırıldığında 1000-1200 ° C'ye kadar kullanılabilirler. Titanyum alaşımları artan sıcaklıklarda çok reaktiftir ve bu nedenle üretim sırasında lifler veya diğer dolgu maddeleri ile reaksiyona girmeye eğilimlidir. Reaksiyon sonucu malzeme mukavemetini azaltan kırılma bir ara yüzey bölgesi oluşur. En çok kullanılan alaşımlar $Ti_6Al_{14}V$, $Ti_3Al_{25}V$ veya saf titanyumdur.

Gümüş ve gümüş bazlı kompozitler:

Bu tür matrisli kompozitler iyi bir elektrik iletkenliğe, yüksek bir erime noktasına sahiptirler ve bu nedenle farklı rölelerin, anahtarların ve devre kesicilerin elektrik kontakları için elektronikte kullanılırlar. Bu matrisler, ısıya dayanıklı bileşiklerin, özellikle Al_2O_3 , CdO, SnO₂ ve diğerlerinin partiküllerinin dispersiyon güçlendirilmesi ile takviye edilir.

Bakır ve bakır bazlı kompozitler:

Genellikle yüksek elektrik iletkenliğini korurken ısı direnci ve termal stabiliteyi artıran Al_2O_3 , BeO , ThO_2 , SiO_2 ve TiO_2 oksitleri ile güçlendirilirler. Takviye için, karbür, nitrit ve ısıya dayanıklı bileşen parçacıkları kullanılır. Dispersiyonla güçlendirilmiş bakır esaslı malzemeler elektrik kontakları, motor parçaları ve imalat elektrotları (punta kaynak galvanizli sac), vb. için kaynak teknolojisinde kullanılır

Demir ve demir bazlı kompozitler:

Bunlar çoğunlukla oksit parçacıkları ile takviye edilir, ancak normal olarak demir alaşımları güçlendirilmez çünkü üretilen çelik alaşımların çoğu daha yüksek sıcaklıklarda gerilime yeterince dirençlidir. Demir oksitlere dayanan malzemelerde dispersiyon güçlendirilmesi, nötron cihazları alanında gevrekliğe karşı direnç bakımından oksitlerin karıştırılmasıyla yapılır.

Nikel ve nikel bazlı kompozitler:

Dispersiyon güçlendirmesi, ThO_2 , HfO_2 , ZrO_2 oksitleri tarafından yapılır. Dispersiyonla güçlendirilmiş nikel alaşımları daha yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır. 650-1650 ° C sıcaklık aralığında çalışmak için refrakter bir malzemedir. Özellikle havacılık ve uzay teknolojisinde kullanılırlar.

2.2.2.2. Makro moleküller ve inorganik matrisler

Makromoleküller, monomer olarak adlandırılan basit molekülleri, çeşitli zincirlerle- lineer veya halkalı olarak- birleştirerek üretilir. Bu makromoleküller, diğer organik bileşiklerden, 10,000 nispi moleküler ağırlık ve 100 derecelik bir polimerizasyon derecesine göre değişkenlik gösterir.

Organik makromoleküller, bazı elementlerin zincir oluşturma yeteneklerinden kaynaklanır (Si, C). Bu elementlerin atomları, lineer bir zincirde kolayca birleştirilebilir ve bir ağ veya uzaysal yapı ile bir makromolekül oluşturur.

2.2.2.3. Polimer esaslı matrisler

Polimerik matrisler, üretimde en yaygın olan tiptir. Metaller ile karşılaştırıldığında, düşük ağırlığa, yüksek mukavemete, korozyon direncine sahiptirler ve yüzey işlemine gerek duymadıkları gibi titreşimleri sönmeler. Düşük termal ve elektrik iletkenliğine sahiptirler. Mekanik özellikler, termoplastik, termoset, elastomer vb. gibi polimerin türüne göre değişir. Kompozit üretimi için üç tip polimer kullanılır. Termoplastikler çoğunlukla kimyasal olarak dirençli ve termosetlerden daha serttir, elastomerler için ise baskın özellik uzamadır.

Düşük yoğunlukları nedeniyle, uçak tasarımı ve imalatında yaygın olarak kullanılanlardır. Polimerlerin düşük termal stabilitesi bir dezavantajdır. Önemli parçalarda kullanılacak kompozitlerde genelde termoset matris kullanılmaktadır.

2.2.2.4. Bitumen matrisler

Bitumen, kendi kendini onarabilen (self-healing) bir malzeme olarak tanımlanabilir. Bitumen matrisli asfaltlar, araç yüklerine veya yüksek sıcaklığa maruz kaldığında oluşan mikro çatlakları kapatarak sertliği ve mukavemeti geri kazandırma potansiyeline sahiptir (Qui ve ark. 2012a). Genellikle asfalt sistemlerinde kullanılır. Bitumen matrisli bir asfalt sisteminde hasar tamir mekanizması, mikro çatlakın iki yüzünün birleşmesini sağlamaktadır ve çatlakın ilerlemesini engellemektedir (Qui ve ark. 2012b).

2.2.2.5. Mineral matrisler

İnorganik bağlayıcı madde, seramik, karbon ve cam esaslı matrislerdir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı yapılar oluşturabilirler. Başlıca otomotiv sektörü olmak üzere pek çok ileri teknoloji ürünlerinde kullanılabilirler.

Ayrıca günlük hayatta bazı firmalar spor kıyafetlerinde kullanmaktadırlar. Mineral katkılı spor giysileri, insan vücudunun yaydığı kızılötesi dalgaları geri yansıtarak, kan dolaşımının hızlanmasını sağlamaktadırlar (Qui ve ar. 2012b).

2.2.2.6. Seramik matrisli kompozitler

Genellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerdir. Sert ve kırılgan malzemeler olan seramik malzemeler, çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenle liflerle takviye edilirler. Buna karşılık çok yüksek elastiklik modülü ve çok yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler.

3 tip seramik kompozit malzeme vardır:

- Sürekli fiberli kompozitler
- Süreksiz fiberli kompozitler
- Partiküllü kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 ve B_4C kullanılmaktadır.

Başlıca uygulama alanları olarak türbin motor parçaları, sıcak gaz filtreleri, roket motorları için türbin diskleri, ısı değiştirici tüpler, zırhlar vb. gibi alanlar görülmektedir (Ayşegül 2014).

2.2.2.7. Karbon matrisli kompozitler

Geniş anlamda, karbon bazlı malzemelerin mutlak çoğunluğu kompozitlerdir. Malzemelerin sınıflandırma özellikleri, başlangıç bileşenlerinin bileşimi, işlem metodu, makro yapı özellikleri, ısıtılma işlemi ve takviye metodudur. Bununla birlikte, karbon bazlı malzemelerin sınıflandırılmasında farklı görüşler mevcuttur.

Genel olarak karbon bazlı malzemeler grafitler, pirolitik grafitler, vitröz karbon, karbonla doldurulmuş plastikler ve karbon-karbon kompozitleri olarak sınıflandırılabilirler (Trefilov 2015).

Karbon, iki kristal formda (elmas ve grafit) ve birtakım amorf modifikasyonlarda doğada bulunur. Üçüncü karbon formunun varlığı, karbin olarak belirlenmiştir (Trefilov 2015).

Bir karbon matrisi nispeten düşük sıcaklıklarda geliştirilirse, grafit benzeri bölgeler ve amorf bölgelerin bir karışımına sahip olan düzensiz bir yapı oluşturmaya eğilimlidir. Bir polimerin, zift veya katranın bozulması (dehidrojenasyon, kömürleşme) ile üretilirse, başlangıçta düşük sıcaklıklarda oldukça şekilsiz ve düzensizdir. Yapı, kademeli olarak daha fazla grafiksel, yani kristalografik olarak daha iyi bir şekilde, sadece yüksek sıcaklıklara, tipik olarak 1200 C'den fazla ve 2400 C'ye kadar ısıtılarak daha iyi hale getirilir (Morrel 2004).

Karbon matrisli kompozit yapılar daha çok karbon / karbon olarak kullanılmaktadır. Karbon bir matrisin içinde karbon fiberler kullanılmaktadır. Bu yapılar 3315 Celcius'a kadar sıcaklıklarda kullanılabilirler.

Karbon matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sıcaklıklarda düşük sürtünme, düşük yoğunluk iyi çekme ve basma dayanımı, yüksek yorulma dayanımı, yüksek termal iletkenlik ve yüksek sürtünme katsayısı gibi avantajları vardır. Bununla birlikte, yüksek maliyet, düşük kesme mukavemeti, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona yatkınlık gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Uzay mekiği burun konisi ve uçak frenleri gibi sistemlerde kullanılmaktadırlar (Akın A).



Şekil 2.8. Burnu Karbon/Karbon Kompozit Malzemeden Yapılmış Uzay Mekiği (NASA)

2.2.2.8. Cam matrisli kompozitler

Cam matris kompozitleri için bir alt tabaka olarak, çoğu durumda, ya yüzeyi işlem görmüş, tabakalı ya da cam bileşiminin ortaya çıktığı modifiye edilmiş düz cam kullanılmaktadır.

2.2.2.9. İnorganik bağlayıcı esaslı kompozitler

Bağlayıcılar, genellikle uygun bileşimin doğal hammaddelerinin ısıtılması ile üretilen inorganik maddelerdir. Bağlayıcılar, kendiliğinden sertleşme kabiliyetine sahip olan, böylece granüler sistemleri katı bir bütün halinde birleştiren maddelerdir (maddeler karışımı). Bir bütün olarak, bağlayıcılar ayrıca bir dolgu maddesini de barındırabilir. Doğru işlev, bağlayıcıların aşağıdaki özellikleriyle sağlanır:

- Hareketin başlangıcında, bağlayıcılar (bağlayıcılar + dolgu maddeleri), yüzey üzerinde ve granül sistemin gözeneklerinde dağıtılabilmeleri için sıvı olmalıdır.
- Sıvı halde bulunan bağlayıcı, yapışkanlı eklem oluşturmak için bağlı malzemenin yüzeyini ıslatmalıdır.

- Uygun bir süre sonra, bağlayıcı akışkanlığını (plastisiteyi) kaybetmelidir, kendiliğinden katılaşmalıdır. Katılaşma şu şekilde gerçekleşir:
- Fiziksel Proses
- Kimyasal Proses (fiziksel süreçlere eşlik eden reaksiyonlar)
- Yapıştırıcı eklemleri, bağlayıcı maddenin kurutulmasından sonra bile sabit kalmalıdır (Micheal 2015).

Genellikle inşaat sektöründe kullanılırlar. İnorganik madde bağlayıcılı odun kompozitlerinin uzun bir tarihi geçmişi vardır. İnorganik madde bağlayıcılı odun kompozitleri, ağırlığının %60-70'i arasında odun yongaları ya da liflerini ve bu orana bağlı olarak %30-90 arasında inorganik bağlayıcı içeren şekillendirilmiş ürünler veya levha ürünlerdir. İnorganik madde bağlayıcılı odun kompozitlerinin özellikleri odunsu materyal ve inorganik bağlayıcı maddenin yapısı ve miktarından önemli ölçüde etkilenir. İnorganik bağlayıcılar 3 ana kategoriye ayrılır;

- Alçı
- Magnezyum çimentosu
- Portland çimentosu

2.2.3. Takviyeler

Takviye elemanları genellikle katılaşmış bir matrisin içinde farklı eksenlerde dizilmiş ya da yapı içerisine homojen olarak dağılmış bir şekilde bulunurlar. Matris, sistemi birlikte tutarken takviye elemanı da sistemi mekaniksel olarak güçlendirir.

2.2.3.1. Fiber takviyeler

Genellikle bir matrisin içerisinde bulunan uzun ince yapılı ikincil bir malzeme olarak bulunurlar. Yönelimleri, mukavemet yönlerini belirler. Farklı malzemelerden üretilirler ve istenilen fiyat / performans dengesine göre optimize edilebilirler. Bu fiber tipleri, doğal fiberler, cam fiberler, grafit ve karbon fiberler, polimer fiberler, seramik fiberler, metal fiberler, whiskers fiberlerdir.

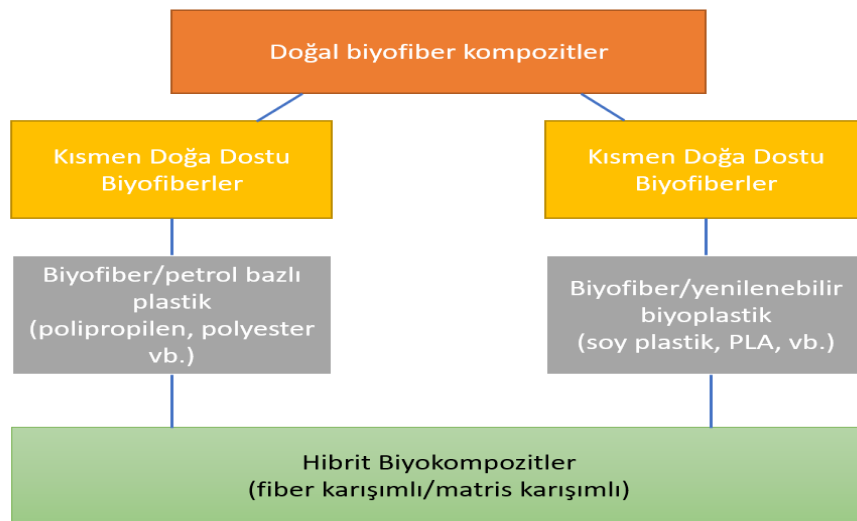
2.2.3.1.1. Doğal fiber takviyeler

İnsanoğlu, doğayı keşfetmeye başladığından itibaren, doğada bulunan malzemeleri kullanarak ve onlara şekil vererek pek çok yeni malzeme türü ve alet elde etmiştir. Bunların başta gelenleri kerpiç yapılardır. Toprak türevi malzemelerin içerisine saman yapılar gömerek onları lif, toprağı da matris olarak kullanmışlardır.



Şekil 2.9. Kerpiç Malzemeleri

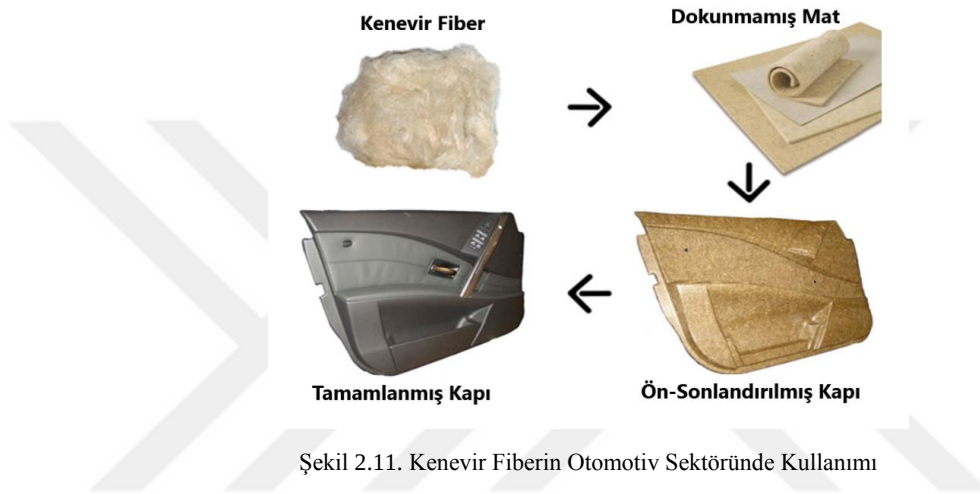
Aynı şekilde zamanının şartlarında kendilerini korumak, avlanmak ve saldırmak için kompozit malzemelerden geleneksel silahlar da üretmişlerdir. Bunlardan en iyi bilineni Kompozit Türk Yayıdır.



Şekil 2.10. Biyokompozitlerin Sınıflandırılması (Amar ve ark. 2005)

Kompozit (mürekkep) Türk yaylarının yapımında efsane ve destanlarda belirtildiğine göre, dört çeşit organik madde kullanılmıştır: ağaç, boynuz, sinir ve tutkal (Hasan 2001).

Bitkisel kaynaklı lif (doğal / biyofiber) ve ürün / biyodimer plastikten (biyopolimer / biyoplastik) türetilen biyokompozitler muhtemelen daha çevrecidir ve bu tür biyokompozitler bazen “yeşil kompozitler” olarak adlandırılır (Amar ve ark. 2005).



Şekil 2.11. Kenevir Fiberin Otomotiv Sektöründe Kullanımı

Geçtiğimiz senelerde artan kimyasal kullanımı ve buna bağlı olarak artan hastalıklar, insanları pek çok alanda doğal yapılara kullanmaya itti. Dahası, doğal fiberlerin binek araçlarda kullanımı gündem konusu haline geldi. Bir kez daha insanoğlu, doğadan, doğasından uzaklaşmanın zararlarını yaşayarak öğrenmiş oldu ve tekrar doğaya dönüşünü başlatmış oldu.

2.2.3.1.2. Cam fiber takviyeler

Cam fiber, kompozit sektöründe en çok kullanılan takviye elemanlarından bir tanesidir. Tek yönlü, açılı, yönsüz vb. gibi birçok çeşidi bulunmaktadır. Genellikle polyester ya da epoksi matrisler ile kullanılır. Silika, kolemanit, alüminyumoksit, soda gibi maddelerden üretilmektedir. Eritilmiş camın özel tasarlanmış ve tabanında küçük delikler bulunan özel bir fırından basınç altında geçirilmesiyle üretilmektedir. Üretildikten sonra korozyona ve yıpranmaya karşı dayanımının artması için kaplama

yapılır. Su borusu, çeşitli araçların kaportaları, deniz araçları, uçak parçaları, rüzgâr türbini kanatları ve daha pek çok mekanik parçanın üretiminde kullanılmaktadır.

- E-Cam Fiber

Piyasada en fazla kullanılan cam fiber türüdür. Fiyat / performans dengesi bakımından cam elyaf piyasasının %90'ını oluşturmaktadır.

Ayrıca, alkali olmayan cam elyaf olarak da adlandırılan E-cam elyaflar, elektronik yalıtım bantları için kullanılan ilk fiber türleriydi. Bunlar, mükemmel korozyon direnci ve yüksek iletkenlik direnci sağlayan, toplam alkali içeriği %0,8'den az olan bir tür Ca-Al – B-Si cam elyafıdır. Tercih edilen bir yalıtım malzemesi olarak, elektromanyetik teller, emdirme malzemeleri, mika ürünleri, lamine ürünler ve polimer matris kompozit ürünler olarak işlenmiştir. Bu ürünlerin yalıtım derecesi B, F ve H ile C arasında değişir; bu da elektrik ve elektronik alanlardaki yaygın kullanımlarını sağlar. Yüksek mukavemetli, yüksek elastiklik modülü, düşük yoğunluklu ve iyi korozyon direncine sahip cam elyaf takviyeli ideal polimer olarak kabul edilirler. Hem yapısal hem de işlevsel olarak kullanılabilirler. Örneğin, E-cam elyaf takviyeli kauçuk ürünler veya filtre ürünleri, işlem sıcaklıklarının 150–300 ° C'ye ulaştığı çimento, enerji, metalurji ve karbon siyahı sanayilerinde kullanılabilir. Bununla birlikte, E-cam elyafların önemli bir dezavantajı, asit veya alkali ortamlarına karşı sınırlı kimyasal korozyon direncidir, dolayısıyla bu durum E-Camların çimento matrisinde uygulanmasını sınırlandırır (Xiao-Su Yi, 2006).

- A-Cam Fiber

A-Cam Fiber anlamsal olarak ele alındığında, Alkali Cam Fiber anlamı içermektedir. Genellikle alkali cam fiberler alkali oranlarına göre sınıflandırılır. Alkali cam elyaf, alkali metal oksit içeriği %12'den fazladır; Orta alkali cam elyaf, alkali metal oksit %6-%12 aralığındadır; düşük alkali cam elyaf, alkali metal oksit %2 ile %6 arasındadır; Mikro-alkali cam elyaf, alkali metal oksit içeriği %2'den azdır. A-cam birçok alkali içerir, bu nedenle yüksek iletkenliği nedeniyle en yüksek dielektrik

katsayısı ve dielektrik kaybına sahiptir. Genellikle özel amaçlı olarak üretilirler ve elektriksel amaçlarla kullanılırlar (Wang 2011).

- S-Cam Fiber

S-cam elyafları, E-cam elyaflarından yaklaşık %35 daha yüksek bir çekme mukavemeti olan yüksek mukavemetli cam elyafları olarak adlandırılır. Ana bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO 'dur.

Sıradan bir S-cam elyaf, yani S-994, 4.3-4.9 GPa'lık bir gerilme mukavemeti, 85 GPa'lık bir Elastiklik modülü, 2,49 g / cm^3 'lük bir yoğunluk ve 970 ° C'lik bir yumuşama noktasına sahiptir. Çin'de üretilen tipik S-cam elyaflar, yüksek mukavemetli tip I ve tip II olmak üzere sırasıyla 4.1 GPa'lık bir gerilme mukavemeti ve 85 GPa'lık bir elastiklik modülüne sahiptir. Farklı amaçlara dayanarak, lif çapları 7 ila 12 μm arasında değişmektedir.

S-cam elyaflar çeşitli bükülmez fitiller, büküm iplikleri, bezler ve diğer ürünlere dönüştürülebilir. Birleştirme maddesi KH-550 uygulandığında, bunlar doğrudan epoksi, fenolik reçineler ve naylon ile emprenye edilebilir ve yüksek mukavemet gerektiren polimer matris kompozitlerinin takviyeleri olarak işlev görürler.

Bu tür takviyeli kompozitler, roket motoru kabukları ve fırlatıcı kabukları, düzlem spiral lamina ve iniş takımı, radomlar, topçu kapakları ve sigortalar, derin su mayınları, kurşun geçirmez yelekler ve mühimmat kutuları gibi silah bileşenleri olarak üretilir. Silah performansının iyileştirmede de önemli rol oynamışlardır. Sivil alanlarda, oksijen tüpleri, sağlık silindirleri, cankurtaran botları, soğutmalı kaplar ve spiral laminalar gibi yüksek basınçlı kaplarda kullanılmıştır.

- E-CR-Cam Fiber

E-CR cam (E-Cam Korozyon Dirençli), özellikle yüksek kimyasal / termal dirençli cam elyaflardır. Bundan ötürü, asitler ve bazlar ile temasa sahip olan laminatlar için

üretilmiştir. Kimya endüstrisi için tesisatlar, konteynerler ve boru hatlarında kullanılmaktadır. İyi korozyon direncinin yanında yüksek spesifik mekanik değerler ve yüksek dielektrik davranışı göstermektedir. UP, EP ve VE reçineleri gibi tercih edilen matris sistemleriyle uyumlu olarak kullanılabilir.

- D-Cam Fiber

Cam elyafların elektriksel özellikleri hacimsel öz direnci, yüzey iletkenliği, dielektrik kaybı ve dielektrik sabiti ile karakterize edilir. D- (veya dielektrik) cam olarak adlandırılan cam elyaflar, borosilikat E-camdan daha düşük bir dielektrik sabitine, borosilikat E-cam takviyeli tel levhalardan daha hızlı tepki süresine sahiptir ve daha yüksek mukavemete sahip yüksek yoğunluklu kompozit baskılı kablo (veya devre) levhaları için bir takviye olarak kullanılmak üzere bilgisayar endüstrisi için geliştirilmiştir.

- AR-Cam Fiber

AR-cam fiberler, yani alkali dayanıklı cam elyaflar, yaklaşık olarak %16 oranında ZrO_2 içerir. Bunlar, sıradan cam elyaflarından daha iyi bir anti-alkali özellikli çimento matris kompozitleri için takviye olarak kullanılırlar.

Güçlendirilmemiş çimento ile karşılaştırıldığında, AR-cam elyaf takviyeli çimento 2-3 kat daha yüksek bir çekme mukavemetine, 3-4 kat daha yüksek eğilme direncine ve 15-20 kat daha yüksek tokluğa sahiptir. Takviyeli kompozit olarak, büyük paneller, çatı plakaları, oluklu fayanslar, balkon plakaları, her türlü boru ve kalıcı şablonlar üretmek için kullanılabilir.

- M-Cam Fiber

Yüksek modüllü cam elyafı olarak da bilinen M-cam elyafları, genellikle, yaygın cam elyaflardan daha yüksek bir modüle sahiptir. Özgül modülü (Spesifik Elastiklik Modülü, elastikiyet modülünün yoğunluğa bölünmesi) çelikten çok daha yüksektir

çünkü yoğunluğu yaklaşık üçte iki daha düşüktür. Cam elyaf modülünün geliştirilmesi, daha iyi performansla sonuçlanan yapısal kompozitlerde kullanımlarına olanak tanır.

$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ cam elyafları için BeO , Y_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 ve CeO_2 gibi oksitler genellikle elastiklik modüllerini arttırmak için birleştirilir. Bununla birlikte, yüksek oranda toksik BeO ve pahalı Y_2O_3 , özellikle modülleri arttırmakta etkili olsalar bile endüstriyel olarak kullanılmamıştır.

M-cam elyafları yüksek bir modüle ve ayrıca yüksek bir çekme mukavemetine sahiptir. Ek olarak, yalıtım özellikleri iyidir ve uzay endüstrisinde yapısal malzemeler olarak yaygın kullanılan yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretimi için epoksi, fenolik reçineler ve naylonu güçlendirmek için kullanılabilir. Aynı zamanda, EHV üretimi gibi sivil ürünlerde de önemli bir kullanım alanı bulmuşlardır.

2.2.3.1.3. Karbon fiber takviyeler

Cam elyafın düşük modüllü olduğu ve ısı direncinin yeterli olmadığı düşünüldüğünde, havacılık endüstrisinde yapı uygulamasının gerekliliklerini karşılamak zor olmaktadır. Bu nedenlerle 1960'larda yüksek mukavemetli, yüksek modüllü ve düşük yoğunluklu karbon fiber, bor elyafı ve diğer fiber malzemeler geliştirilmiştir. Karbon fiber, koruma atmosferinde (N_2 veya Ar) rayon fiber, poliakrilonitril elyaf veya zift fiber gibi organik elyafların karbonizasyon ısıl işleminden üretilir ve karbon içeriği %90-99'dur. Karbon fiberlerin icadı 1880'de geriye doğru izlenebilir. Edison, pamuklu tel, keten ve diğer lifleri, lamba için tel olarak karbon filamenti üretmek için kullandı, ancak büyük kırılma, kolayca oksidasyon ve çok düşük parlaklık nedeniyle, son olarak tungsten tel kullandı. 1950'li yıllarda, karbon elyafın gelişimi yeni mühendislik malzemeleri olarak başı çekmeye başladı. 1959 yılında Union Carbide Corporation, hammadde olarak rayon kullanarak karbon elyafının endüstriyel üretimini geliştirdi ve ticari markasını Thornel olarak adlandırıldı. 1962'de Japonya'nın Osaka eyaletindeki endüstri araştırma enstitüsünde çalışan Shindo Akio, PAN tabanlı karbon fiber geliştirmek için hammadde olarak poliakrilonitril (PAN olarak kısaltılmış) elyafı kullandı. 1964 yılında, Watt ve Kraliyet Enstitüsü'nün (RAE) diğer üyeleri, yüksek lif

ve yüksek modüllü karbon elyafı oksitlendirilerek ve karbonizasyon işleminde tabi tutarak PAN fiber üzerine basınç altında ürettir. 1963'te Japonya'dan Otani Sequoia Lang, hammadde olarak asfalt kullanarak karbon elyafını başarılı bir şekilde geliştirdi. O zamandan beri, karbon fiber, yüksek mukavemet ve yüksek modülle üretilmektedir. 40 yıllık aralıksız çabalardan sonra, karbon elyaf teknolojisi, diğer yeni malzemelerin çok ötesinde mekanik özellikler, endüstriyel üretim, çeşitlilik ve uygulamalarda olgunlaştı. Tüm dünyada karbon elyafın yıllık üretimi, 1969'da 100 ton, 1985'te 4700 tona, 2000'de yaklaşık 20.000 tona yükseldi. Şu anda, Japonya, karbon elyafı üretiminin en büyük ülkesidir (özellikle üretim teknolojisi ve üretimindeki PAN öncüleri) ve Amerika Birleşik Devletleri karbon elyafın en büyük kullanıcısıdır. 1970'lerde de Çin, karbon elyafı üretmeye başladı fakat bu Çin'de daha yavaş bir gelişme hızı ve daha az çeşitlilikle ilerledi (Wang 2011).

- Polyacrylonitrile (PAN)-Tabanlı Karbon Fiberler

PAN tabanlı karbon fiberler, dünyanın toplam üretiminin %80'ini oluşturan ana karbon fiber türleridir. Bu elyafların yüzde yetmişi, Toray, Toho ve Mitsubishi gibi Japon şirketleri tarafından üretilmektedir ve geri kalanı ABD'li Hexcel, BP Amoco ve ayrıca Çin'li Formosa Plastics tarafından üretilmektedir (Xiao-Su Yi, 2006).

PAN tabanlı karbon fiberler şu özelliklerle karakterize edilir (Xiao-Su Yi, 2006):

- İyi dokuma kapasitesi;
- Düşük yoğunluk, 1,7–2,1 g / cm³;
- Yüksek modül, 200-700 GPa;
- Yüksek mukavemet, 2–7 GPa;
- Yorgunluğa karşı dayanıklılık;
- Kendini yağlayan ve aşınmaya dayanıklılık;
- Enerji emici ve darbelere dayanıklı;
- Düşük termal genleşme katsayısı, $0-1.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- Isı birikimi olmayan iyi termal iletkenlik;
- İyi elektriksel iletkenlik, 15–5 $\mu\Omega/\text{m}$;

- İyi röntgen penetrasyonu ve iyi biyolojik uyumluluk.
- Zift Esaslı Karbon Fiberler

Hammaddeler olarak; Bitümlü kömür ve petrol bitüm kullanılmıştır. Genellikle asfalt yapımında kullanılırlar. Asfalt ya da polioksietilen asfaltın reolojik özellikleri, bu malzemenin karbonizasyon ve grafitizasyon ile karakterize edilmesiyle belirlenir.

Asfalt izotropik veya anizotropik (örneğin mezopitch veya LCD) olabilir. İzotropik sistemden türetilen karbon lifleri genellikle zayıf performansa sahiptir; örneğin, gerilme mukavemetleri yaklaşık 950 MPa, elastiklik modülü 40-45 GPa ve çekme gerilmesi %2,0-2.2'dir. Bu lifler, ortak sınıf ürünler olarak adlandırılır ve esas olarak yüksek performans gerektirmeyen kompozitlerde kullanılır. Alternatif olarak, yüksek performanslı karbon fiberler, özellikle ultra yüksek modüllü karbon fiberler, Mezopitch'ten üretilir (Chang, 1996; Shi ve ark. 1995).

Ziftin orijinal karbon içeriği PAN'inkinden daha yüksek olduğundan, karbon verimi karbonasyondan sonra daha yüksektir. Yüksek bir elastisite modülüne ek olarak, zift bazlı karbon fiberler de iyi bir termal iletkenliğe, elektrik iletkenliğine ve negatif bir termal genleşme katsayısına sahiptir. Bununla birlikte, işlem özellikleri ve sıkıştırma mukavemeti PAN bazlı karbon fiberlerinki kadar iyi değildir.

Yüksek performanslı zift esaslı karbon fiberler, havacılık ve uzay uyduları vb. gibi benzersiz uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

Granoc XN serisi, fiber çapı yaklaşık 10 μ m olan bir düşük modüllü, düşük mukavemetli karbon fiber, 55-155 GPa elastisite modülü ve 1.10–2.40 GPa gerilme mukavemetine sahiptir. Bununla birlikte, yoğunlukları 1,65–2,80 g / cm³'te düşüktür ve gerilmesi nispeten %1,5–2,0 kadar yüksektir. Bunlar çoğunlukla inşaat mühendisliği ve altyapı için sızdırmazlık malzemeleri, beton, tünel duvarları ve direklerin onarımı için güçlendirici levhalar şeklinde kullanılır.

Granoc CN serisi, genellikle eğlence amaçlı spor malzemeleri ve genel endüstriyel uygulamalar için kullanılan bir tür karbon elyafıdır. T300 tipi PAN tabanlı karbon fiberlerle karşılaştırıldığında, elastiklik modülleri daha yüksektir. Elektronik cihazlarda, hassas optik cihazlarda, akustik ve ses ekipmanlarında, robot kollarında ve çeşitli makaralarda kullanılabilirler.

Granoc YSH serisi karbon fiberler, uydu antenleri, uydu yapı bileşenleri, güneş panelleri, joystickler, soketler, füze bileşenleri ve roket bileşenleri üretiminde kullanılmaktadır.

- Rayon Tabanlı Karbon Elyaf

α -Selüloz; odun, pamuk tohumu kaşmir ve küşpe gibi selüloz hammaddelerinin özünden edilebilir. Soda veya karbon disülfür ile saflaştırıldıklarında, seyreltik NaOH içinde çözündürülür, ıslak bükülmüş ve sonradan işlenmiş, viskoz elyaflar elde edilir. Karbon fiberler, 300 ° C'nin altındaki havada oksidasyondan ve 800 ° C'nin üzerindeki inert atmosferde karbonizasyondan sonra elde edilebilir. 2500 ° C'nin üzerinde argonda grafitlenirse, kristallik, termal iletkenlik, anti-oksidasyon, yağlama ve ısı kapasitesi büyük oranda artar ve %99'dan fazla karbon içeriği ile grafit lifleri elde edilir (Afshari ve ark., 2008). ABD ve Rusya, rayon temelli karbon liflerinin iki büyük üreticisi.

Rayon bazlı karbon fiber ürünleri, kısa lifler, sürekli lifler, iplikler, kumaşlar, kayışlar ve giysiler gibi çeşitli biçimlerde karşımıza çıkmaktadır. Bunlar aynı zamanda rayon bazlı karbon fiberlere ve rayon bazlı grafit fiberlere de ayrılabilirler. Yüksek özgül mukavemeti, yüksek özgül modülü, iyi korozyon direnci ve iyi yağlama özelliklerine ek olarak, lifler ayrıca düşük yoğunluklu, düşük ısı iletkenlik, yüksek saflık, yüksek gerilme gerinimi, iyi esneklik, geniş yüzey alanı ve kolay aktivasyon ile karakterize edilir.

Bu lifler, ısıya karşı yalıtımlı / dirençli ve eriyik malzemelerde, takviye malzemelerinde ve mükemmel biyolojik uyumluluklarından ötürü umut veren biyolojik mühendislik malzemelerinde vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.

Rayon esaslı karbon fiberler temel olarak uçak frenleri, araba frenleri, radyoizotop kutuları, katı yakıtlı motor nozulları, atmosfere giriş araçları, roket ve füze burunları veya kafaları için geniş alanlı ısı çekim koruyucu malzemeler olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, polimer kompozitleri korozyona dayanıklı pompalar, laminatlar, borular, kaplar ve iletken teller, ısıtma gövdeleri, sızdırmazlık malzemeleri, katalizör destekleri ve tıbbi absorpsiyon malzemeleri ve tıbbi bandajlar ve antikimyasal giysilerin yanı sıra kolloidal malzemelerdeki uygulamalarla güçlendirmek için de kullanılabilirler.

2.2.3.1.4. Polimer fiber takviyeler

- Aromatik Poliamid Fiberler

Aromatik poliamid lifleri de aramid elyafları olarak adlandırılır. Aramid elyafları, fiber oluşturu maddenin, iki aromatik halkaya doğrudan eklenmiş en az %85 amid bağına (-CO-NH-) sahip uzun zincirli bir sentetik poliamid olduğu ısıya-dirençli ve güçlü bir sentetik polimer elyaf sınıfıdır. Aramidler genellikle bir amin grubu ve bir karboksilik asit halit grubu arasındaki reaksiyon ile hazırlanır.

Dimetil asetamid solüsyonundaki poliamidler, kuru-eğirme, ıslak-eğirme veya kuru-ıslak eğirme yöntemleri kullanılarak doğrudan liflere dönüşebilir. Yıkama ve kurutma işleminden sonra, lifler hedef aramid elyafları elde etmek için gerilim altında 500-600 ° C'de ısı ile işlenir.

Aromatik poliamidler ilk olarak 1960'ların başlarında meta-aramid lifleri olarak ticari amaçla kullanıldı ve 1960'larda ve 1970'lerde para-aramid lifleri geliştirildi.

ABD'de DuPont tarafından üretilmesinin dışında, meta-aramid ayrıca Hollanda'da ve Japonya'da Teijin tarafından Teijin Conex ticari adıyla ve Çin'de Yantai tarafından New Star adıyla meta-aramidin bir çeşidi üretildi. Bir başka çeşidi de Fransız Kermel tarafından yine Kermel adı altında üretildi. En çok bilinen para aramid lifleri p-fenilen tereftalamid (PPTA) liflerdir ve ticari isimleri Kevlardır ve Dupond tarafından üretilmiştir. PPTA aramid lifleri iki tip olarak sınıflandırılır: biri, 3.0-5.5 GPa'ya kadar

gerilme mukavemetine ve 60-90 GPa'lık Young modülüne sahip yüksek mukavemetli bir tiptir.

- Aromatik Polyester Fiberler

Aromatik polyester lifleri ayrıca poliakrilat (PAR) lifleri olarak da anılır ve aslında aromatik dikarboksilik asitlerden ve difenollerden elde edilen bir çeşit aromatik polyester kopolimer elyaflardır. Bir tür monomerden aromatik polyesterlerin esnekliği, yüksek performanslı lifler elde etmek için yeterli değildir. Kopolimerleştirici bileşen diğerlerine göre düşük maliyetli, düşük erime noktasına sahip olmalı ve yüksek mukavemeti ve yüksek modülü koruyabilen iyi bir eğirme kopolimeri olmalıdır.

Mevcut aromatik polyester ürünlerinin ticari isimleri Ekonol ve Vectron'dur. Her ikisi de aromatik polyester kopolimerlerden üretilmiş ve geliştirilmiştir.

PPTA lifleri ile aynı güç ve katsayı seviyesinde, aromatik polyester liflerin en göze çarpan özelliği, kuru-ısı ve ıslak-ısı işleminden sonra tutulan mukavemetlerinin, PPTA liflerinden daha üstün olmasıdır. Bunun nedeni, bunların higroskopik olmadıkları ve kuru veya ıslak koşullar altında plastik şekil değiştirme veya yaşlanmadan sonra küçülmemeleridir.

- Heterosiklik Polimer Elyaf

Aramid lifler, havacılık yapısal malzemeleri, kurşun geçirmez malzemeler, otomotiv yapısal malzemeleri, lastik kordları, vb. olarak kullanılmasına rağmen, uygulamalarını sınırlayan düşük çevresel stabiliteye sahip olmaları gibi zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu, oksidasyon ve hidrolize eğilimi olan molekülün ana zincirindeki amid bağlarından kaynaklanmaktadır.

- Polibenzimidazol (PBI) Fiberler

Polibenzimidazol elyafları, yüksek sıcaklıkta mekanik ve kimyasal özellikler bakımından stabildir ve çeşitli alev geciktirici sentetik fiberleri içerir. Tagylon ticari

adı ile pazarlanmaktadır ve PBI olarak bilinirler. Vakum altında ya da iki aşamalı polikondensasyon yöntemi ile sentezlenir. PBI lifleri altın rengidir. Bu liflerin iki türü mevcuttur. Bunlar iplik olarak ve kırık elyaf olarak üretilirler. Sırasıyla 300-500 ve 250-400 MPa çekme mukavemetine sahiptirler. 560 Celcius'ta bile yanmazlar, erimezler ve gaz çıkarmazlar. Karbonasyondan sonra bile yumuşak kalırlar ve yalıtım özelliğini korurlar.

2.2.3.1.5. Seramik fiber takviyeler

İleri seramikler çoğunlukla metalik olmayan oksitler, yarı-metal oksitler, karbürler, nitrürler, alümina, alüminyum nitrür ve karbon, vs. anlamına gelir. Hammaddeleri genellikle yüksek saflıkta, ultra-ince sentetik inorganik bileşiklerdir. Bunların ortak özellikleri, yüksek sıcaklık stabilitesi, oksidasyon direnci, erozyon direnci, korozyon direnci, aşınma direnci, yüksek sertlik ve düşük plastik akma oranı ile ışık, elektrik, manyetik, akustik ve termal özelliklerine bağlı özellikleridir. Bunlar, yüksek sıcaklık stabilitesi, korozyon direnci ve aşınma direnci vb. gerektiren yüksek teknoloji ve askeri teknik alanlarda kullanılır. Örnekler mekanik salmastralar, seramik yataklar, küresel vanalar, seramik silindirler ve kesme aletleri olabilir.

- Alumina Fiberler

Alümina liflerinin ana fazı Al_2O_3 'tür ve az miktarda SiO_2 , B_2O_3 , Zr_2O_3 , MgO vb. de mevcuttur. Bu lifler, 1400 ° C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda mükemmel oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık stabilitesine sahiptir. Tipik bir örnek olarak, ABD'deki 3M Şirketi, tahıl arıtımı için demir oksit kullanılarak yeni bir Al_2O_3 lifi üretti. Bu fiberin gerilme mukavemeti ve elastisite modülü sırasıyla 3.2 ve 370 GPa kadardır (Nextel610). Ek olarak, Nextel610 düşük ısı iletkenliğine, eşsiz elektrokimyasal özelliklere ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir.

Diğer seramik fiberlerle karşılaştırıldığında, alumina fiberler basit işleme prosedürlerine, minimum ekipman gereksinimleri ile üretilebilir ve inert gaz korumasına gerek duymazlar. Bu nedenle, maliyet etkin ve büyük bir ticari değeri vardır. Askeri ve sivil kompozit malzeme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan

önemli bir güçlendirici elyafıdır. Alümina liflerinin ön hazırlık yöntemleri ve bileşimleri çeşitlidir ve özellikleri, üründen ürüne farklıdır. Alümina lifleri sürekli veya süreksiz olabilir.

- Silikon Karbid Fiberler

Bu fiber serisi silikon karbür (SiC) lifler, silikon nitrit (Si_3N_4) elyaflar ve silikonun küçük miktarlarda B, Ti, Zr ve C içeren ana element olduğu yeni silikon bazlı seramik liflerden oluşur.

SiC lifleri mükemmel mukavemet, elastiklik modülü, yüksek sıcaklık stabilitesi, oksidasyon direnci, korozyon direnci, antinötron radyasyon özellikleri ve elektromanyetik iletim ve emme özellikleri ile yeni bir tür seramik elyafıdır. SiC fiberler, yapısal kompozitler için ideal takviyeler olan ve 1980'lerde seramik elyaflarda kullanım için hızlı bir gelişme gösteren önemli bir türdür.

Sürekli SiC liflerinin üretiminde PVD (kimyasal buhar biriktirme) ve PPD (seramik öncesi polimer türevi) yöntemleri kullanılmaktadır.

- Boron Nitrid (BN) Fiberler

Çeşitli inorganik ısıya dayanıklı fiber olarak BN fiberleri beyaz, esnek polikristal liflerdir. Üretim yöntemine ve mikro yapılarına göre, genellikle kompozit fiberlere ve saf fiberlere ayrılırlar.

Birincisi CVD tarafından, gaz buharı olarak boron, amonyak ve bor triklorür ve biriktirme ve kompozit elyafın çekirdeği olarak sıcak bir W tel kullanılarak hazırlanır. İkincisi genellikle düşük sıcaklıklarda stabil olmayan bor amini ve 1800°C 'de ısıya dayanıklı polikristalin BN vermek üzere NH_3 ile işlendikten sonra eriyik halinde bükülmüş B_2O_3 liflerinden gelir. Şu anda, polimerden türetilen BN fiberlerin çekme mukavemeti 1.5 GPa'ya kadardır.

- Boron Fiberler

Bor fiberleri gelişmiş kompozitler için önemli takviyelerdir. CVD, B veya C lifleri üzerinde B'yi 100-200 lm'lik bir dış çapa sahip sürekli bir monofilament şeklinde biriktirerek üretilir.

Bor elyafının en ümit verici avantajları mekanik özellikleridir (gerilme mukavemeti ve Young'ın modülü sırasıyla 3.5 ve 400 GPa'dır) ve düşük yoğunluktadır (2.5 g / cm³). İşleme olgunluğu ve makul fiyat, gelişimleri için temel nedenlerdir. Ek olarak, B fiberleri iyi eğilme mukavemetine sahiptirler ve karşılık gelen basma mukavemeti 6.9 GPa'dır, yani oldukça yüksektir. Bu da iki kat gerilme direncidir. Bor elyafları, çekme dayanımında belirgin bir değişiklik olmaksızın, 1 saat boyunca havada 500 ° C'de çalışabilirler. Bununla birlikte, 500 ° C'yi aşan sıcaklıklarda, çekme mukavemeti önemli ölçüde azalır.

2.2.3.1.6. Metal fiber takviyeler

Metalik fiberler, metal, plastik kaplamalı metal, metal kaplamalı plastik veya tamamen metal ile kaplanmış bir çekirdekten imal edilmiş elyaflardır. Metalik elyaflar, olağanüstü mekanik özellikleri göz önüne alındığında kompozit uygulamalar için çekici bir elyaf sınıfıdır. Bununla birlikte, metalik liflerin ağırlık / mukavemet oranına göre daha yüksek yoğunlukları nedeniyle yüksek performanslı karbon, polimer veya seramik liflerine göre daha düşüktür. Ayrıca kötü korozyon direnci ve matriks ile düşük yapışma direnci gibi dezavantajları vardır. Ancak, metalik liflerin yüzeyi bu problemleri çözmek için seramiklerle kaplanabilir. Bugüne kadar, altyapı oluşturma, elektromanyetik girişim koruma (EMI koruma), vb. Uygulamalar için popüler tercihlerdir.

50 mikron çapında veya daha az çekilmiş bir tel bir lif olarak tanımlanır. Metal elyaf üretmek için 300 ve 400 serisi paslanmaz çelik, nikrom, inconel, hastelloy x, marangoz 20cb3, nikel, 80/20 nikel krom, titanyum ve tantal kullanılmaktadır. Tipik elyaf çapı 2 ila 50 mikron arasında değişir. Doğranmış lif, şerit, sürekli çekme, hava serilmiş ağ, sürekli filament iplik ve kırık lif şeklinde mevcuttur.

Paslanmaz çelik lifler, kullanılabilirlik, uygulama ve malzeme özellikleri açısından en potansiyel metal liflerdir. Çelikte bulunan krom, bu metaller üzerinde kendiliğinden iyileştirici bir oksit filmi üretir ve bu da yüksek korozyon direnci oluşturur. Nikel ve molibden gibi asil metallerin eklenmesiyle daha fazla gelişme sağlanmıştır. Bu alaşımlardan elde edilebilen çok çeşitli mekanik özellikler, korozyon direnciyle birlikte ve bazı durumlarda yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnç, uygulamalarında çok yönlü bir hale getirmektedir. Martensitik, ferritik, çökeltme sertleştirilmiş, östenitik çelikler (AISI300 serisi), üretim ve kullanım kolaylığı açısından offinalı tel ve elyaf formunda mevcuttur. Genel olarak, 5–100 µm çapında çekilmiş tavlanmış paslanmaz çelik lifler yapısal kompozitlerdeki uygulamalar için mevcuttur ve yüksek sertlik ve yüksek gerilme-kopma özelliklerine sahiptirler.

Lifler amorf (cam), polikristal (karbon, bor, alümina vb.) veya tek kristaller (silisyum karbür, alümina, berilyum ve diğer bırıklar) olmasına rağmen, metalik lifler çoğunlukla polikristalindir. Genel olarak, bir lifin mukavemet ve sertlik özellikleri, daha az kristal kusurları ve lif uzunlukları boyunca kristalitlerin daha yüksek yönelimi nedeniyle yığın malzemeye kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Kristalitlerin lif yönüne doğru yönelimi de önemli ölçüde yardımcı olur (Rana, 2016).

2.2.3.1.7. Whiskers fiber

Whiskerler uzamış tek kristallerdir. Kısa elyaf olarak mevcutturlar. Whiskerler neredeyse hatasız olması nedeniyle, mekanik özelliklerin teorik değere yakın olarak gerçekleştirilmesi mümkündür. Diğer bir kısa fiber olarak ta terminolojide geçebilir. Karbon ve silisyum nitrür kısa fiberi mevcut olmasına rağmen, silikon karbür kısa fiber kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviyelerdir. SiC kısa fiberler genellikle pirinç kabuğunun veya buhar-sıvı-katı (VLS) işleminin karbotermik indirgenmesi ile hazırlanır. Pirinç kabuğu, pirinç tanelerinin parlatılması sırasında elde edilen atık malzemedir. Silika ve organik bileşiklerin bir karışımını içerir. Temizlenen pirinç kabuğu organik bileşikler karbon haline dönüştürmek için inert koşullarda 700 ° C'de koklaştırılmıştır. Sıcaklık daha sonra 1400 ° C'ye yükseltilir. Bu sıcaklıkta, karbon silika ile reaksiyona girer ve SiC partiküllerini ve kısa fiberleri oluşturur. Kalan karbon

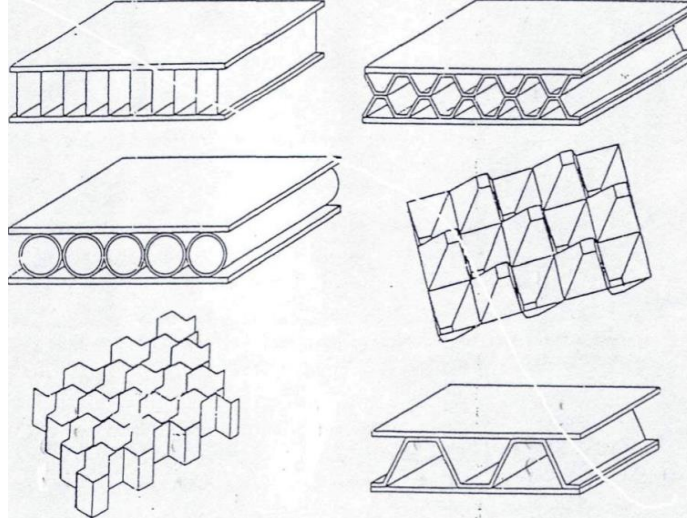
ve silikon karbür partikülleri, çeşitli işlemlerle SiC kısa fiberlerinden çıkarılır. Bu işlemle oluşturulan kısa fiberlerin en / boy oranı düşüktür ve ayrıca özelliklerinde geniş bir çeşitlilik vardır.

VLS prosesi ile yüksek en-boy oranına sahip kaliteli SiC kısa fiberler oluşturulur. VLS, buhar besleme gazları, sıvı katalizör ve katı kısa fiber anlamına gelir. Katalizör olarak 30 µm büyüklüğündeki geçiş metali parçacıkları kullanılır. Bu metalik parçacıklar bir karbon alt katman üzerine alınır ve bir reaksiyon odasında 1400 ° C'ye kadar ısıtılır. SiO ve karbonlu gazlar, kontrollü akış hızıyla bir oda da beslenir. Katalizör parçacıkları bu sıcaklıkta erir ve SiO ve C gazlarını emer. Bunlar reaksiyona girer ve SiC oluşturur. Süperdoymuş olduğunda SiC, kısa fiber olarak çökeler. Bu kısa fiberlerin 20 GPa kadar yüksek bir mukavemeti olabilir.

SiC kısa fiber MMC ve CMCs takviye olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, kısa fiber kullanmanın birçok problemi var. Kompozitlerde yüksek mekanik özellikler, sadece fiberlerin yükleme yönünde hizalanmasıyla gerçekleştirilebilir ve bu nedenle fiblerin hizalanması önemli bir problemdir. Diğer bir problem, özelliklerin geniş çeşitliliğidir. Fiber çapı mikron altı seviyede olduğundan, aglomera oluşturma eğilimi vardır. Düzgün dağılım, bir başka büyük engeldir. SiC fiber doğada kanserojendir. Çok küçük oldukları için, fiberler akciğerlere gidebilir ve orada birikebilir, bu da kansere neden olabilir. Bu nedenle, fiberleri biriktirirken uygun önlemleri almak gerekir (Rana ve ark. 2016).

2.2.3.2. Dolgu takviyeler

Üç boyutlu ve sürekli bir malzemenin işlenmesi ile yapılan makro ölçekte bir yapıdır. Daha sonra bu iskelet yine üç boyutlu bir matris malzemesi ile doldurulur / kalıplanır ya da farklı takviyeler ile başka kompozit yapılar oluşturur.



Şekil 2.12. Dolgu Takviyeler

2.2.3.3. Partikül takviyeler

Matris içine karıştırılan bir tür takviye elemanıdır. Partiküller ya da parçacıklar halinde bulunurlar. Sıfır, tek ve iki boyutlu mikroskobik partiküllerin boyutları ortalama boyutu $1\ \mu\text{m}$ 'den küçüktür ve yüzdece 25'ten az olarak kullanılmaktadır. En çok Al_2O_3 ve SiC seramikler kullanılmaktadır.

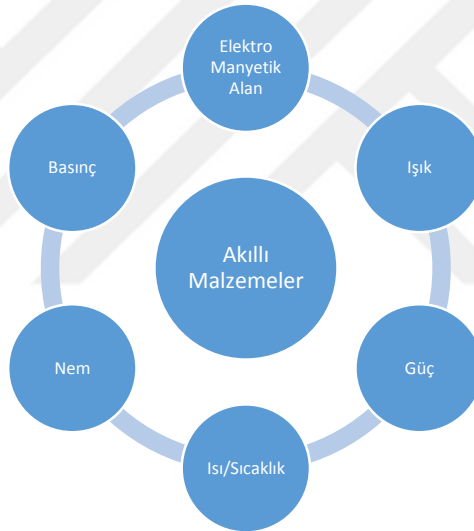
Oluşmuş olan yapı izotropiktir. Bu nedenle yükü elyaf ve matris birlikte taşır. Metal, seramik ve polimerik birleşiminden oluşabilen kompozitlerdir. Bu oluşan kompozitler iyileşmekten ziyade alışılmışın dışında özellikler göstermektedir. Parçacıkların sertliği, yapının mukavemetini arttırıcı etki göstermektedir. Genellikle plastik matris içerisine metal partiküllerin eklenmesi ile kullanılmaktadır. Bu vesile ile metal parçacıklar tarafından ısı ve elektriksel iletkenlik sağlanabilir. Bu kompozitlerde seramik partiküller, metal bir matrisin içerisine katıldıklarında yüksek sertlikte ve yüksek ısıl dayanımda yeni bir kompozit malzeme ortaya çıkar. Fakat döküm yolu ile üretilen bu tür malzemelerde parçacık tozların karışması zordur ve oluşacak eriyiğin viskozitesinin düşmesi, kalıbın doldurulamamasına, boşlukların kalmasına ve istenmeyen kusurlara neden olabilir.

2.3. Teori

2.3.1. Çok işlevli malzemeler ve akıllı malzemeler

Çevresel değişikliklere karşı işlevsel bir tepki veren veya bulunduğu ortama işlevsel etkileri olan materyallere Akıllı Malzemeler denir. Bu malzemeler elektro manyetik alan, ışık, basınç, nem, ısı, güç ve daha başka enerji çeşitlerine bağlı olarak etkilenir (Şekil 2.13.).

Akıllı materyaller aynı anda bir, iki ya da daha fazla görevi gerçekleştirebilir. Bu tür malzemelere *Çok İşlevli Malzemeler* denmektedir.



Şekil 2.13. Akıllı Malzeme-Çevre Etkileşimi

O'Brien ve arkadaşları (2011), çok işlevli malzemelerde yapısal kapasitörler için bir tarif yapmışlardır. Toplam sistemin kütlesini, elektrik depolayan kısmın kütlesi (m_e) ile yapısal kısmın kütlesinin (m_s) toplamına eşit olduğu görüşünde bulunmuşlardır.

$$M = m_e + m_s \quad (2.1)$$

Kapasitörün kütle ile normalize edilmiş enerji yoğunluğu $\bar{F}$,

$$\bar{F} = \frac{\frac{1}{2}C_{kap}S^2}{m_e} \quad (2.2)$$

ile gösterilmektedir. Burada C_{kap} kapasite, S kapasitörün bozulma voltajıdır. Yapı, yoğunluğu ile normalize edilen yapının elastik modülü olarak tanımlanan belirli bir $\bar{E}$ rijitliğine sahiptir. Daha sonra bu geleneksel sistem kapasitif ve yapısal elemanlardan oluşturulan yeni bir sistem ile değiştirilir.

$$M^* = m_e^* + m_s^* + m_{mf}^* \quad (2.3)$$

M^* yeni sistemin kütesini, m_e^* kapasitif elemanın kütesi, m_s^* yapısal elemanın kütesi ve m_{mf}^* yapısal kapasitörün kütesidir.

Bu yeni sistem, genel sistem kütesini azaltırken geleneksel tasarımın genel mekanik ve enerji depolama kapasitesini korumalıdır. Bu koşullar sağlandığı takdirde

$$\bar{\Gamma} m_e^* + \bar{\Gamma}_{mf} m_{mf}^* = \bar{\Gamma} m_e \quad (2.4)$$

ve

$$\bar{E} m_s^* + \bar{E}_{mf} m_{mf}^* = \bar{E} m_s \quad (2.5)$$

$\bar{\Gamma}_{mf}$ ve $\bar{E}_{mf}$, sırasıyla, yapısal kapasitörün enerji yoğunluğu ve özgül rijitliğidir.

Kütle tasarrufu analizi için, geleneksel olarak hesaplanan hacim-normalleştirilmiş enerji yoğunluğundan (J / cm^3) ziyade, kütle-normalleştirilmiş kapasitörün enerji yoğunluğu (J / g) kullanılmaktadır.

Eşitlik (2.4) ve (2.5) yeni tasarımdaki konvansiyonel yapının ve kondansatörün, geleneksel tasarımdaki bileşenlerden farklı kütelelere eşdeğer özelliklere sahip olduğu varsayılmaktadır.

Eğer azaltılmış kütle gereksinimi karşılanırsa,

$$M^* < M \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.1), (2.2), (2.4) ve (2.5)'in birleştirilmesi ile aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

$$(M - M^*) = \left(\frac{\bar{\Gamma}_{mf}}{\bar{\Gamma}} + \frac{\bar{E}_{mf}}{\bar{E}} - 1 \right) m_{mf}^* \quad (2.7)$$

Bu nedenle sistem kütlesini eşitlik (2.6)'da tanımlanan şekilde azaltılması için yapısal kapasitör, şu ilişkiyi karşılamalıdır:

$$\frac{\bar{\Gamma}_{mf}}{\bar{\Gamma}} + \frac{\bar{E}_{mf}}{\bar{E}} > 1 \quad (2.8)$$

Kolaylık olması açısından η_e kapasitif verim ve η_f yapısal verim olarak tanımlanmıştır ve

$$\eta_e = \frac{\bar{\Gamma}_{mf}}{\bar{\Gamma}} \text{ ve } \eta_f = \frac{\bar{E}_{mf}}{\bar{E}} \quad (2.9)$$

olarak gösterilmiştir.

Son olarak çok fonksiyonluluğun verimi ise η_{mf} olarak gösterilmiştir ve

$$\eta_{mf} \equiv \eta_s + \eta_e > 1 \quad (2.10)$$

olarak tanımlanmıştır.

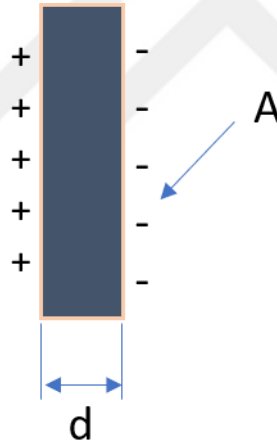
Denklem (2.10), kütle tasarrufu sağlayan çok işlevli tasarım için temel tasarım gereksinimini sağlar.

2.3.2. Kapasite

İki iletken zıt elektrik yükleri ile elektrik alan oluşturarak yük depolarlar (Şekil 2.14.). İki iletken arasındaki gerilim farkı yük ile orantılıdır (Coulomb Kanunu). Bu oran sabitine kapasite adı verilir ve C_{kap} ile gösterilmektedir. Birimi Farad'dır ve adını babası olan Faraday'dan almaktadır.

$$C_{kap} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.11)$$

Formülü ile hesaplanmaktadır. Burada A, paralel olan yüzeylerin alanı, d iki paralel yüzey arasındaki mesafe, ϵ_0 vakum ortamının geçirgenliğidir (ya da serbest uzayın geçirgenliği) ve birimi F/m'dir, ϵ_r ise iki plaka arasındaki malzemenin bağlı yalıtkanlık sabitidir.



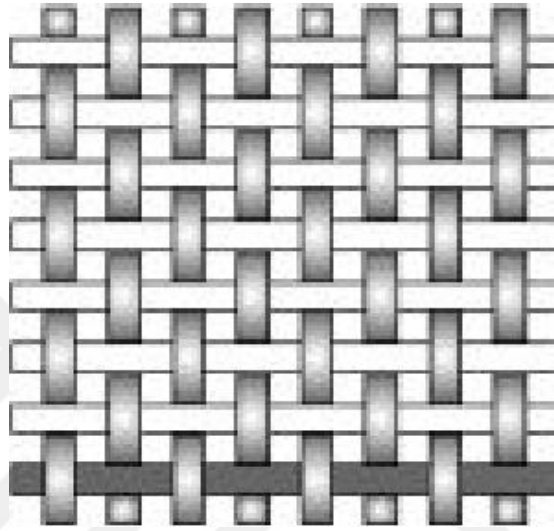
Şekil 2.14. Paralel plakalar ve ölçüler,

2.3.3. Karbon fiber kumaşlar ve örgü tipleri

Karbon fiber kumaşlar kullanım alanlarına, imalat yöntemlerine ve mukavemet ihtiyaçlarına göre farklılık gösterirler. Dokuma tipleri, metrekaşe başına düşen ağırlıkları, yönlendirilmeleri, kumaştan ürüne imalat metodu ve polimer malzemelerine göre karakterize edilirler.

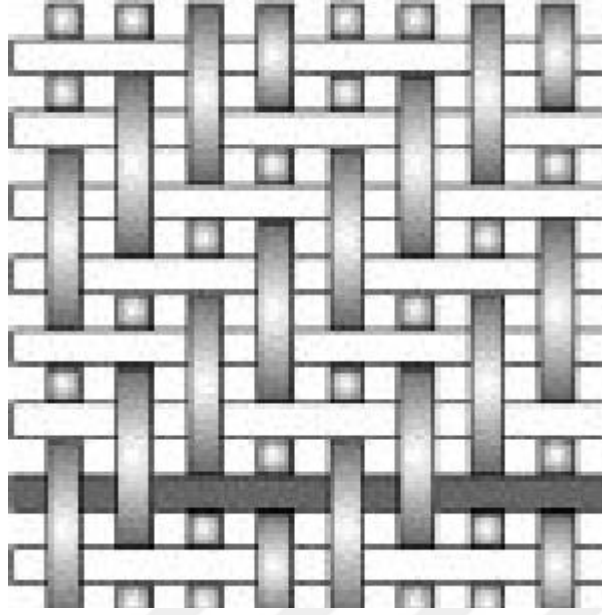
Kumaşların dokuma tipleri şu şekilde sıralanabilir:

Plain (Bezayağı): Birbirine dik açıyla yerleştirilmiş lifler bir altından ve bir üstünden sırayla geçerek devam ederler. En basit dokuma türü olan Plain (Bezayağı) örgü tipi, her bir atkının her bir çözgünün altından ve üstünden geçirilerek oluşturulur. Atkı ve çözgü birbirine dik olarak yerleşir.



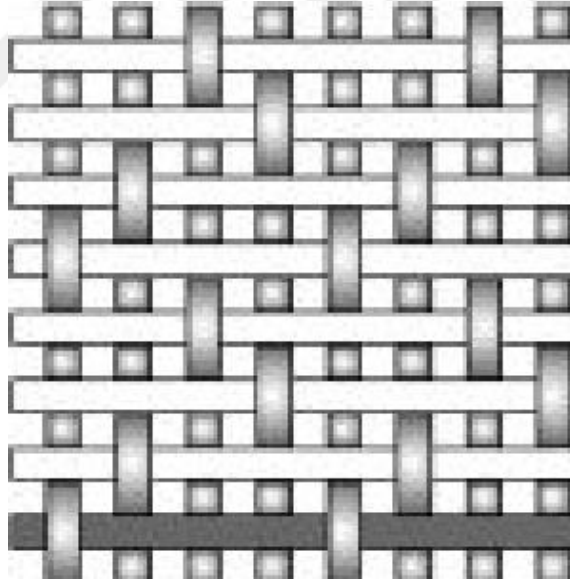
Şekil 2.15. Plain Örgü

Twill (Dimi): Sürekli tekrarlanan şekilde devam eden ve bir ya da daha fazla birbirine dik yönde serilmiş liflerin hem altından hem de üzerinden geçerek örülen örgü tipidir. Plain örgü türüne benzemektedir. Her bir atkının iki örgü türünden atlaması kaidesi ile oluşmaktadır. Plain örgü tipine göre sıklaştırmaya daha uygundur. Bu nedenle daha yüksek mukavemet ve rijitlik elde etmek mümkündür.



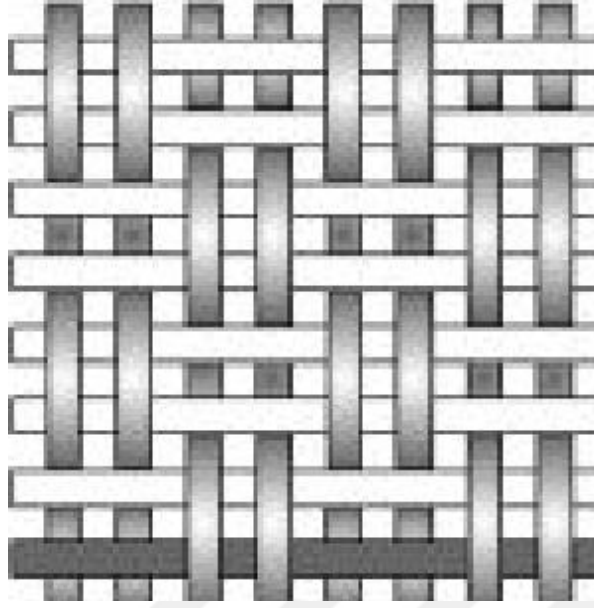
Şekil 2.16. Twill Örgü

Satin: Twill örgü tipinde oluşan kesişim noktalarını en az seviyeye indirmek amacıyla yapılmış örgü tipidir.



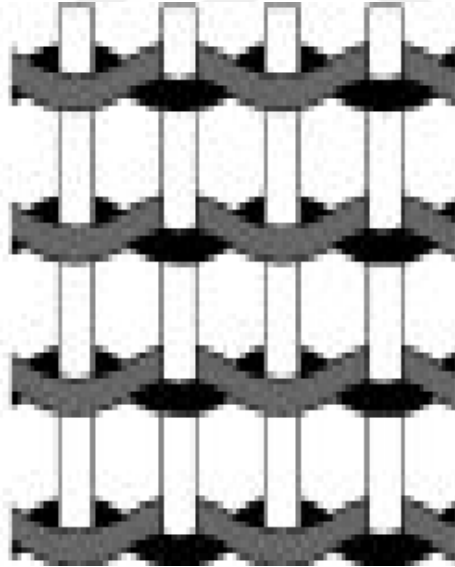
Şekil 2.17. Satin Örgü

Basket: Birbirine dik yatay ve dikey liflerden oluşan temelde plain örgü tipine benzer olarak dizilen iki veya daha çok liflerin oluşturduğu örgü tipidir.



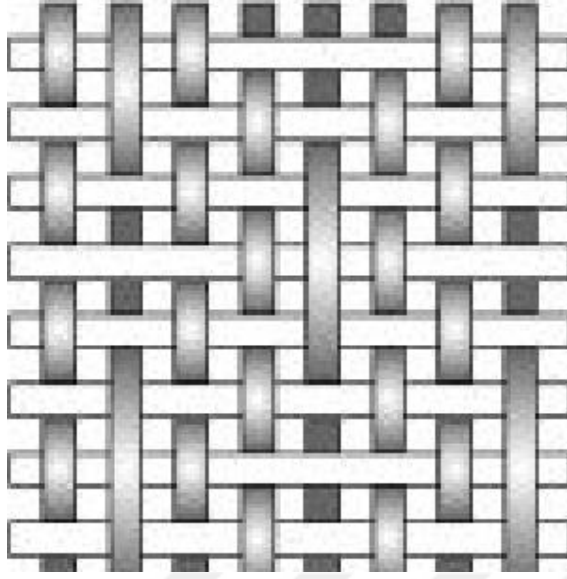
Şekil 2.18. Basket Örgü

Leno: Plain örgü tipine benzer olarak dikey liflerin yatay liflerin etrafına sarılarak örülen örgü tipidir. Dikey olarak belirtilen lifler sabitlenmiştir.



Şekil 2.19. Leno Örgü

Mock Leno: Plain örgü tipiyle aralarında benzerlik vardır. Bazı yatay lifler düzenli aralıklarla birden fazla düşey lifle alttan ve üstten geçerek örülürler.



Şekil 2.20. Mock Leno Örgü

Tablo 2.3. Örgü Tiplerinin Özellikleri (5 üzerinden)

Özellik	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno	Mock Leno
Stabilite	4	3	2	2	5	3
İyi Kapanma	2	4	5	3	1	2
Düşük Boşluk	3	4	5	2	1	3
Düzgün Yüzey	2	3	5	2	1	2
Balans	4	4	2	4	2	4
Simetri	5	3	1	3	1	4
Düşük Kıvrım	2	3	5	2	2/5	2

Bahsedilen örgü tiplerinin haricinde, örgü yapısına sahip olmayan tek yönlü ve kırpık elyaflardan oluşan kumaş türleri de bulunmaktadır. Tek yönlü örgü tipleri, fiberlerin dizildiği yönde dayanım sağlarken enine dayanımları oldukça düşüktür. Kırpık fiberlerden oluşan kumaşlar ise her yönde dayanım sağlamaktadır.

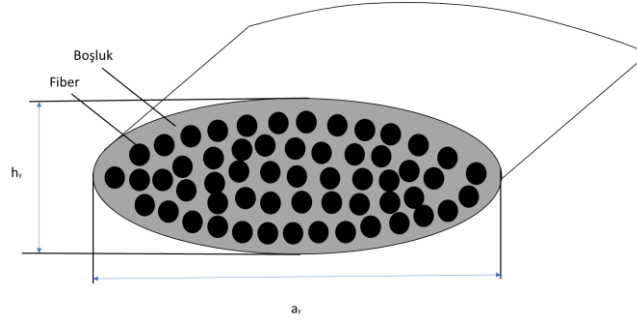


Şekil 2.21. Kırpık Karbon Elyaf

2.3.4. Kompozit malzemelerde çok ölçekli malzeme tasarımı

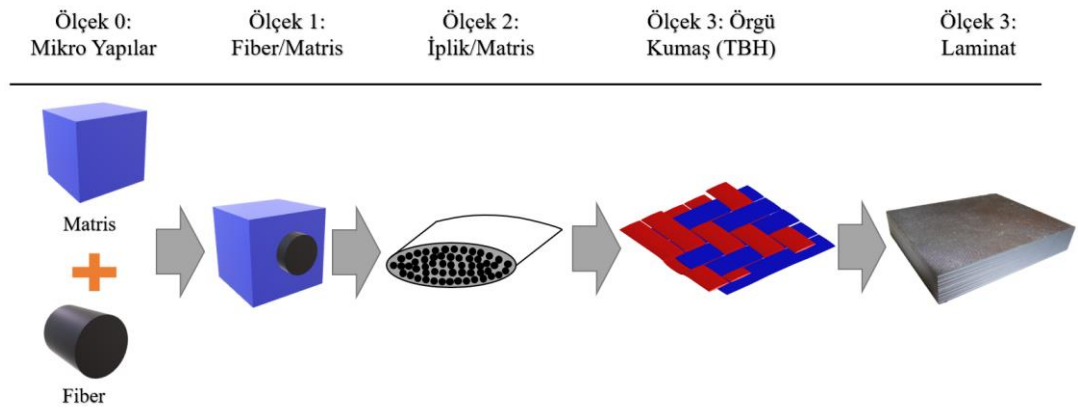
Kompozit malzemeler doğaları gereği birçok malzemenin bir araya gelmesiyle yeni yapılar oluşturur ve kendini bir araya getiren malzemelerin özelliklerinden farklı özellikleri içerir. Kompozisyonun içinde bulunan malzemeler mekaniksel ve geometrik olarak her bir ölçekte farklı malzeme oluşturur. Bu nedenle oluşturduğu malzemenin her ölçeğinde oluşan malzemenin mekanik özellikleri farklılık gösterebilir.

Fiberli kompozit malzemelerde ise durum bundan farklı değildir. Tek bir fiber silindirik yapıdadır ve kalınlığı mikronlar ile ölçülür. Dikine mekaniksel özellikleri ve enine mekaniksel özellikleri genellikle farklı olur. Onu kaplayan matris ise her yönde aynı özellik gösteren bir yapıdadır. Bu iki malzemenin birleşmesi hem geometrik olarak hem de mekanik özellikler olarak bir önceki hallerine göre farklılık gösterecektir (Ölçek 0'dan Ölçek 1'e geçiş).



Şekil 2.22. İplik (Yarn)

Matris ile kaplı binlerce fiberin bir araya getirdiği iplik yapısı (ölçek 2) geometrisinden ve iç yapısında oluşacak kusurlardan dolayı bir önceki fiber + matris ölçeklemesinden farklı mekaniksel özellikler gösterecektir (Şekil 2.22.). Genellikle kumaş datalarında 3k, 6k, 12k, vb. gibi sayılarla ifade edilir. Örneğin 12k bir iplikte 12000 adet fiber bulunmaktadır. Her bir iplik, meydana gelecek olan kumaşın atkısını ve çözgüsünü oluşturmaktadır. Bu iplikler bilinen örgü modellerinden herhangi birisine getirildiğinde ise ipliklerin birlikte hareket etmesi, aralarında oluşturacakları boşluklar, birbirleri üzerinden atlatılırken maruz kalacakları kayma ve diğer gerilmeler, atlamalarda gelen kuvvetleri açılı durumda karşılamaları gibi faktörler sebebiyle bir önceki sade iplik ölçeğinden farklı mekanik özellikler gösterecektir. En son laminat düzeyinde, yani birçok kumaşın üst üste getirilmesi ile oluşan yapı, imalat metoduna, serim açlarına ve laminalar arası mukavemet değerlerine göre daha başka bir mekanik özelliklerle karşımıza çıkacaktır. Ölçek 0'dan ölçek 3'e kadar olan hiyerarşik yapı Şekil 2.23.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Çok Ölçekli Malzeme Tasarım Şeması

2.3.5. Kompozit malzemelerin makro mekanik özelliklerinin hesaplanması

Kompozit malzemenin yapısına göre ortaya çıkan malzeme her yönde aynı ya da her yönde farklı mekaniksel özellikler gösterebilir. Malzemenin mekaniksel davranışlarını ortaya seren bir dizi kanun ortaya sürülmüştür ve buna Hook Kanunu adı verilir. Hook kanunu malzemenin elastik olarak şekil değiştirmesiyle birlikte malzeme üzerine uygulanan gerilim ile malzemenin birim şekil değiştirme miktarı yani gerinim arasındaki lineerliği ortaya koyan kanundur. Yeteri kadar küçük deformasyonlar için gerilme ile deformasyon doğru orantılıdır ve orantı sabiti deformasyona uğrayan maddenin cinsine ve yapısına bağlıdır (Autar 2006). Üç boyutlu gerilme durumundaki doğrusal bir izotropik malzemenin Hook kanunundaki x-y-z ortogonal sistemdeki (Şekil 2.24.) bir noktanın gerilme-gerinim ilişkileri eşitlik (2.12)'de verilmiştir.

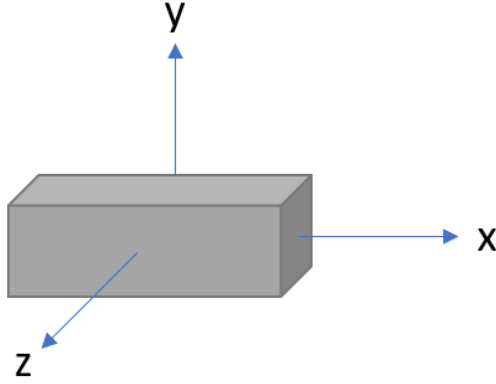
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.14)$$

Burada σ yöne bağlı olarak gerilmeyi, τ yöne bağlı olarak kayma gerilmesini, E malzemenin elastiklik modülünü, ν poisson oranını, ε yöne bağlı olarak deformasyonu, γ yöne bağlı olarak kaymanın oluşturduğu deformasyon ve G kayma modülünü temsil etmektedir. Denklem (2.12)'de verilen 6x6'lık matris uyum matrisi $[S]$ olarak anılır.

Uyum matrisinin ters çevrilerek oluşturduğu eşitlik (2.13)'teki 6x6'lık matris ise izotropik bir malzemenin rijitlik matrisi [C] olarak ifade edilmektedir.



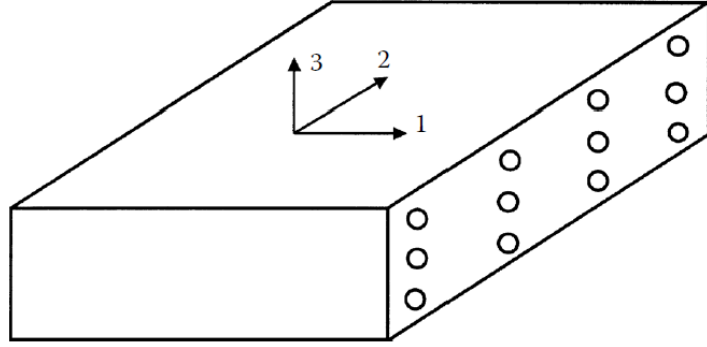
Şekil 2.24. Malzemenin Kartezyen Koordinat Sistemi

Bu eşitlikler izotropik malzemelerde kullanılabilirken, ortotropik malzemelerde geçerliliğini yitirmektedir. Ortotropik malzemeler kartezyen koordinat sisteminde her yönde farklı özellikler gösterebilirler. En genel halde gerilme-şekil değiştirme bağıntısı, üç boyutlu cisim için 1-2-3 kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki gibi verilebilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15)'te 6x6'lık rijitlik matrisi gösterilmektedir ve 36 sabite sahiptir. Rijitlik matrisinin tersinin alınması ile Şekil 2.25.'te gösterilen 1-2-3 kartezyen koordinat sisteminde gerilme-şekil değiştirme bağıntısı bulunur:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$



Şekil 2.25: 1-2-3 Kartezyen Koordinat Sistemi

Esneklik matrisinin mühendislik sabitlerine doğrudan bağlı olan bileşenleri şu şekilde yazılır:

$$S_{11} = \frac{1}{E} = S_{22} = S_{33} \quad (2.17)$$

$$S_{11} = -\frac{\nu}{E} = S_{13} = S_{21} = S_{23} = S_{31} = S_{32} \quad (2.18)$$

$$S_{44} = \frac{1}{G} = S_{55} = S_{66} \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.17), (2.18) ve (2.19) haricinde kalan S matris elemanları sıfıra eşittir. Eğer bir malzeme, karşılıklı olarak birbirine dik üç malzeme simetri düzlemine sahipse rijitlik matrisi eşitlik (2.20)'deki gibi ele alınır:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

İkiden fazla simetri düzlemi olması sebebiyle,

$$C_{16} = 0, C_{26} = 0, C_{36} = 0, C_{45} = 0 \quad (2.21)$$

Malzeme simetrisinin karşılıklı üç dik düzlemi, malzemenin üç ekseninde mekaniksel özelliklerinin üç dik düzlemde simetrik olduğunu gösterir. Bundan dolayı dokuz bağımsız elastik sabiti vardır. Esneklik matrisi şu şekilde tarif edilir:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

- Her bir ekseninde elastiklik modülü E_1, E_2, E_3 ,
- Her bir düzlem için iki adet poisson oranı $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{21}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{32}$,
- Her bir düzlemdeki kayma modülleri G_{23}, G_{31}, G_{12} olmak üzere 12 adet mühendislik sabiti tanımlanmıştır.

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.23)$$

$$\frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3} \quad (2.24)$$

$$\frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (2.25)$$

Bu denklemler, bağımsız mühendislik sabitlerin toplamda dokuza indirir ve rijitlik veya esneklik matrisindeki bağımsız sabitler ile aynı sayıdadırlar. Mühendislik sabitleri ile esneklik sabitleri yeniden yazıldığında;

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

elde edilir.

Denklem (2.26)'nın tersi rijitlik matrisi $[C]$ olur ve şöyle ifade edilir:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\Delta = (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13})/E_1 E_2 E_3 \quad (2.28)$$

Termodinamiğin 1. kanununa göre rijitlik matrisi ve esneklik matrisi pozitif tanımlı olmalıdır. Bu nedenle köşegenler pozitif olmalıdır.

$$E_1 > 0, E_2 > 0, E_3 > 0, G_1 > 0, G_2 > 0, G_3 > 0 \quad (2.29)$$

$$1 - \nu_{23}\nu_{32} > 0, 1 - \nu_{23}\nu_{32} > 0, 1 - \nu_{12}\nu_{21} > 0 \quad (2.30)$$

$$\Delta = 1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32}C - 2v_{21}v_{32}v_{13} > 0 \quad (2.31)$$

Burada; $\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j}$ için $i \neq j$ ve $i, j=1,2,3$,

Eşitsizlik buna göre yeniden yazılırsa;

$$v_{12} < \frac{1}{v_{21}} = \frac{E_1}{E_2} \frac{1}{v_{12}} \quad (2.32)$$

$$|v_{12}| < \left| \frac{E_1}{E_2} \frac{1}{v_{12}} \right| \quad (2.33)$$

$$|v_{12}| < \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad (2.34)$$

Benzer şekilde diğer beş bağlantı daha yazılırsa,

$$|v_{21}| < \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \quad (2.35)$$

$$|v_{32}| < \sqrt{\frac{E_3}{E_2}} \quad (2.36)$$

$$|v_{23}| < \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} \quad (2.37)$$

$$|v_{31}| < \sqrt{\frac{E_3}{E_1}} \quad (2.38)$$

$$|v_{13}| < \sqrt{\frac{E_1}{E_3}} \quad (2.39)$$

şeklinde izah edilmiş olur.

Bir lamina ince ve düzlem dışı yük almıyorsa, bu laminada düzlem gerilme durumu incelenmelidir. Denklem (2.16) ve (2.26) kullanarak $\sigma_3 = 0$, $\tau_{31} = 0$ ve $\tau_{23} = 0$ olarak alınır. Böylece;

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \quad (2.40)$$

$$\gamma_{23} = \gamma_{31} = 0 \quad (2.41)$$

ε_1 ve ε_2 birim şekil değiştirme değişkenleri, ε_3 'ün fonksiyonlarıdır. Bu nedenle ε_3 gerilme-şekil değiştirme bağıntısından çıkartılabilir. Kayma şekil değiştirmeler γ_{23} ve γ_{31} sıfır olduğu için çıkartılabilir. Bu şekilde denklem (2.26) tekrar düzenlenir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Burada S_{ij} esneklik matrisi elemanıdır. Ters alınarak gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Q_{ij} , esneklik katsayılarıyla bağıntılı olan indirgenmiş rijitlik katsayılarıdır.

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \quad (2.44)$$

$$Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \quad (2.45)$$

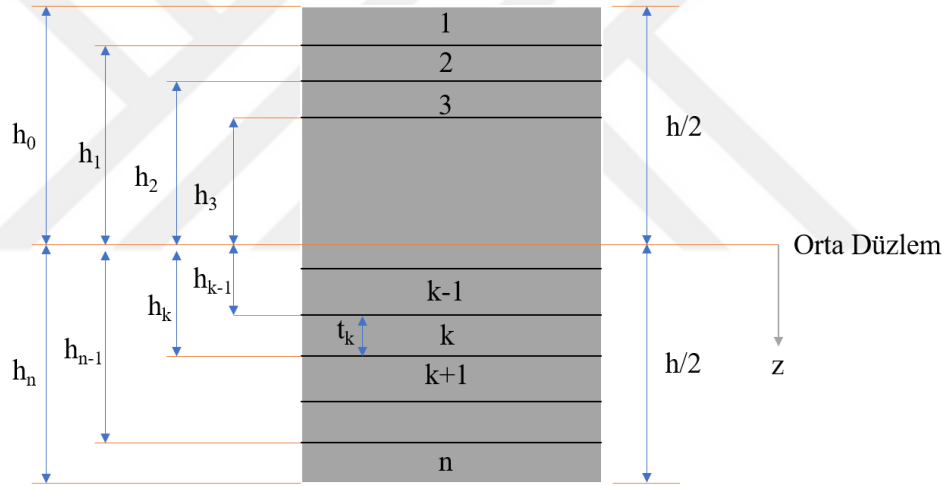
$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \quad (2.46)$$

$$Q_{66} = \frac{1}{s_{66}} \quad (2.47)$$

İndirgenmiş rijitlik matrisi Q_{ij} elemanları, C_{ij} matris elemanları ile aynı değildir.

Autar K. Kaw (2006), bu indirgemeleri ve matrisleri Kompozit Malzeme Mekanığı kitabında rijitlik ve esneklik matrisleri ilişkisi detaylı olarak anlatmıştır.

Polimer ile güçlendirilmiş karbon fiber yapılar genellikle birden çok tabaka halinde kullanılırlar. Bu yapılara laminat adı verilir. Laminatların içerisinde farklı açılarda, farklı yönlerde ve farklı örgü tiplerinde laminalar olabilmektedir. Şekil 2.26.'te laminat tabakalarının koordinat sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Laminat tabaka koordinatlama sistemi

Uzama-kısalma matrisi $[A]$, bağlantı matrisi $[B]$ ve eğilme rijitlik matrisi $[D]$ olarak adlandırılmaktadır. Bu matrislerin oluşturduğu altı eş zamanlı lineer ve altı bilinmeyenli matris oluşturmaktadır. Bu matrise ABD matrisi adı verilmektedir.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i=1,2,6; j=1,2,6 \quad (2.48)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i=1,2,6; j=1,2,6 \quad (2.49)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), i=1,2,6; j=1,2,6 \quad (2.50)$$

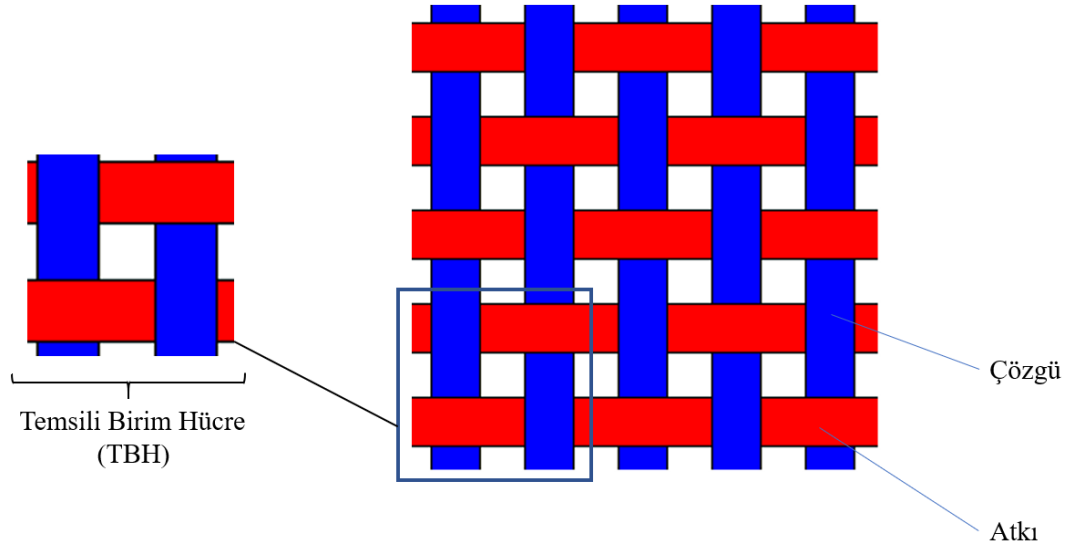
ABD matrisi şu şekilde açıklanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

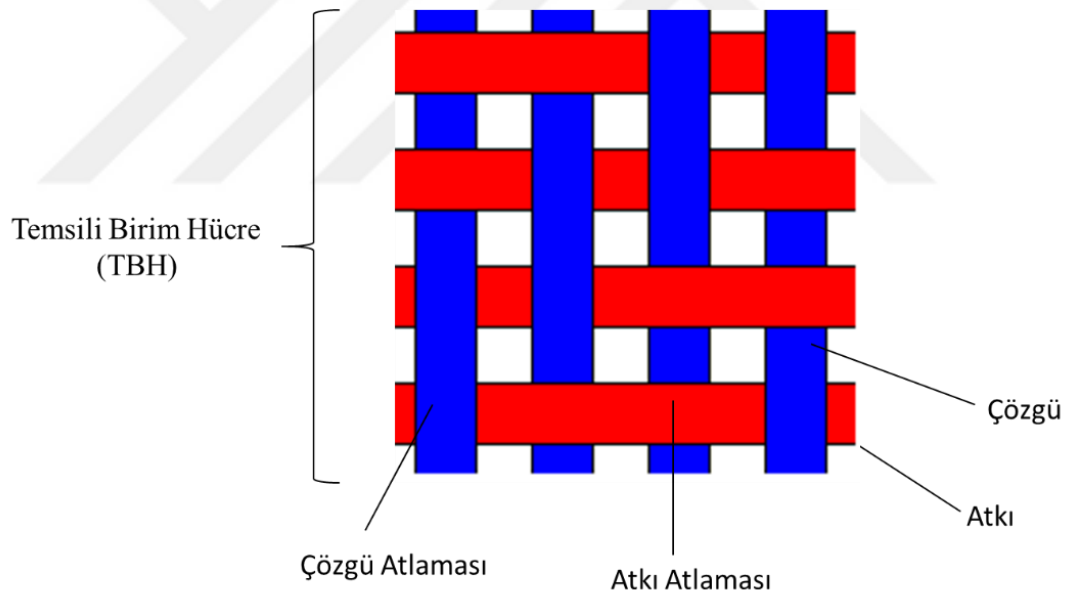
Uzama-kısalma rijitlik matrisi [A] bileşke düzlem kuvvetler ile düzlem şekil değiştirme arasındaki bağlantıyı kurmaktadır. Eğilme rijitlik matrisi [D], eğilme momenti bileşenleri ile plaka eğriliği arasındaki bağlantıyı kurmaktadır. Bağlantı rijitlik matrisi [B] de kuvvet ve moment terimleri ile orta düzlem şekil değiştirmeleri ve eğrilikleri arasındaki bağlantıyı kurmaktadır.

2.3.6. Kompozit malzemelerde mikro ve mezo ölçekte mekanik özelliklerin hesaplanması

İki iplik takımının birbirine açılı olarak yerleşmesi ve polimer emdirilmesiyle mezo ölçekte dokuma kompozit malzemeyi oluşturmaktadır. Mikro-yüzey modeli (Kedar ve ark. 2015), dokuma kompozit malzeme içerisinde birbirini periyodik olarak tekrar eden ve Temsili Birim Hücre (TBH) olarak anılan en küçük yapının mekaniksel özelliklerini karakterize eder. Bu çalışmada kullanılacak plain ve 2x2 twill örgü kumaş için Temsili Birim Hücre Şekil 2.27. ve Şekil 2.28.'de verilmiştir.



Şekil 2.27. Plain Örgü Tipi ve Temsili Birim Hücresi



Şekil 2.28. 2x2 Twill Örgü Tipi ve Temsili Birim Hücresi

TBH'nin üç farklı plakadan oluştuğu varsayılmaktadır: atkı plakası, çözgü plakası ve polimer matris plakası. Bu plakaların sistemin mekaniksel özelliklerine paralel olarak etki ettiği varsayılmaktadır. TBH'nin elastiklik tensörü:

$$K^{TBH} = \frac{V_y}{2} K^{FY} + \frac{V_y}{2} K^{WY} + (1 - V_y) K^M \quad (2.52)$$

olarak ifade edilmektedir.

Burada K^{TBH} , K^{FY} , K^{WY} , K^M sırasıyla TBH'nin, atkı ipliğinin, çözgü ipliğinin ve matrisin dördüncü dereceden sertlik tensörleridir. V_y ise ipliğin bir TBH içindeki hacimsel oranıdır ve

$$V_y = \frac{V_f}{V_f^Y} \quad (2.53)$$

olarak hesaplanır. V_f , bir TBH içindeki fiberin hacimsel oranı; V_f^Y , bir iplik içindeki fiberin hacimsel oranıdır. Kumaş üreticileri genellikle bu oranları ürün datalarında ideal olarak paylaşmaktadırlar.

İzotropik bir matrisin sertlik tensörü

$$K_{ijkl}^M = \frac{E^m}{3(1-2\nu^m)} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{E^m}{2(1-\nu^m)} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \delta_{kl}) \quad (2.54)$$

ile hesaplanabilir. Burada $ijkl$ alt indisleri 1'den 3'e kadardır ve δ_{ij} Kronecker delta ya da ikinci dereceden tanım tensörü olarak adlandırılır. E^m ve ν^m matrisin elastiklik modülü ve poisson oranıdır.

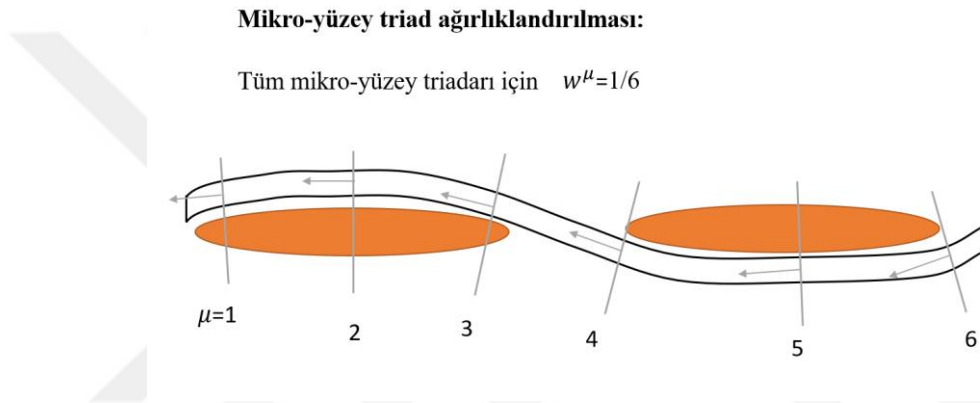
İplik tabakasının sertlik tensörü mikro-yüzey teorisi uygulanarak türetilmiştir. İpliğin TBH içindeki bazı kısımları dalgali yapıdadır. Bu nedenle birkaç farklı kısma ayrılarak incelenir. Her bir bölüm, n mikro-yüzey normlarından birinin, bölüm merkezindeki iplik eğrisine teğet olmalıdır. Diğer bir mikro-yüzeyin paralel olarak m normal bir vektöre sahip olacak şekilde yönlendirilmiş ve ortogonal bir mikro-yüzeyin üç yöndeki vektörünü temsil eder.

Gerilme enerji yoğunluğu denkliği uygulanarak K^{FY} ve K^{WY} iplik plakalarının sertlik tensörleri elde edilir. T^{YP} , ortalama gerilme enerji yoğunluğudur ve her bir T^μ 'inci konumundaki gerilme yoğunluğu ile hesaplanmaktadır.

$$T^{YP} = \frac{1}{AL} \int_V T^\mu dV = \frac{1}{L} \int_L T^\mu dL \quad (2.55)$$

A iplik plakasının kesit alanı, L ipliğin eğrisel uzunluğu, V ipliğin hacmi olmak üzere $dV = AdL$ 'dir.

TBH kesit alındığında twill ve plain örgü tipi için şekilde Şekil 2.29. ve Şekil 2.30.'da gösterildiği gibi en az 6 ya bölünmesi gerekmektedir (Kedar ve ark., 2015).

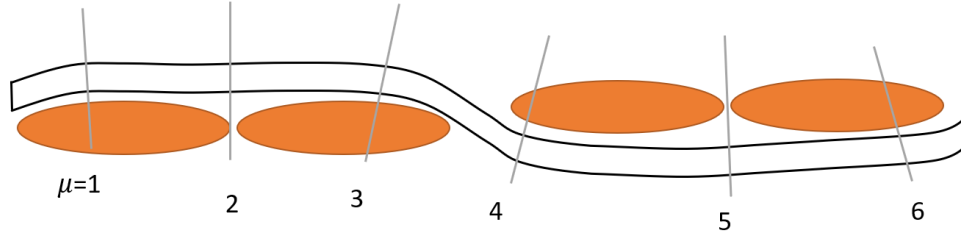


Şekil 2.29. Plain Örgü Tipinin Mikro-yüzey Triad Ağırlıklandırılması

Mikro-yüzey triad ağırlıklandırılması:

$\mu = 2$ ve 5 için $w^\mu = 1/4$

$\mu = 1, 3, 4, 6$ için $w^\mu = 1/8$

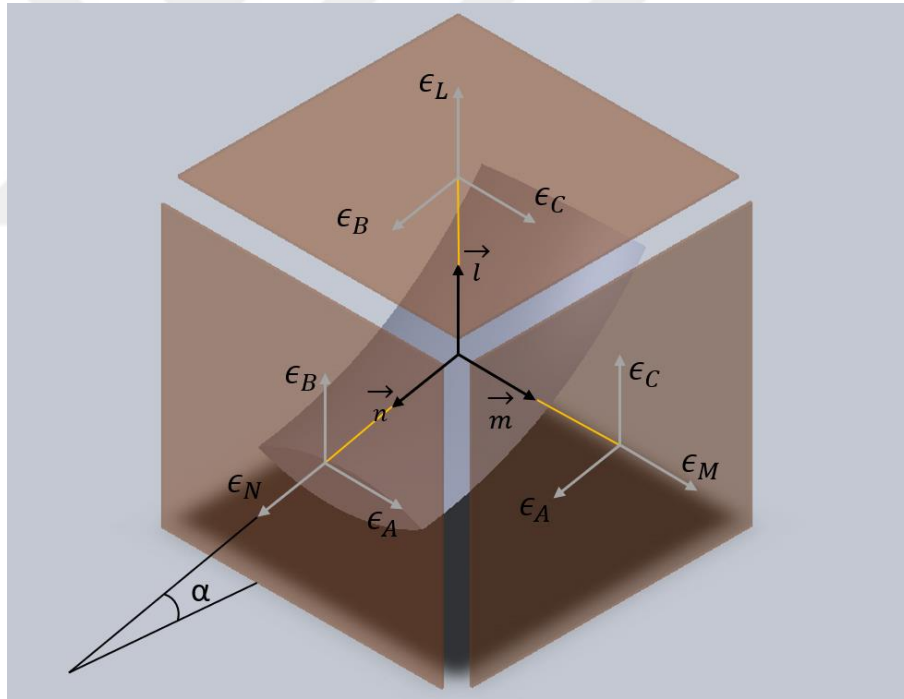


Şekil 2.30. Twill (2x2) Örgü Tipinin Mikro-yüzey Triad Ağırlıklandırılması

Mikro-yüzey triadların ağırlıkları, her elipsin üç parçaya bölünmesine ve ardından ayrıklaştırılmış dalgalanma yolunun çizilmesine dayanarak karar verilir. Yol, her biri bir mikro-yüzey triadına karşılık gelen altı bölümden oluşur. Triada verilen ağırlık, bu

dilim tarafından işgal edilen iplik uzunluğunun oranı ile orantılıdır. Böylece, twill bir dokuma için, ağırlıklar 1/8, 1/4, 1/8, 1/8, 1/4 ve 1/8'dir. Yukarıdaki mikro-yüzey yönelimleri, ağırlıklar, hacim fraksiyonları ve bileşen özellikleri kullanılarak, TBH K^{TBH} 'nin sertlik tensörü hesaplanabilir. Bu, laminatın elastik özelliklerini verir.

Her iplik bölümü için üç boyutlu bir mikro-düzlem tanımlanır. Dalgalandan iplik boyunca n eğrisinin teğet çizgisine dik gelecek bölme çizgisinin normale olan açısı α 'dır. Her triad için m ve l vektörleri yerel iplik yönüne normaldir. (2.55) numaralı eşitlikte belirtildiği üzere üç triadlı uzayda gerilme enerjisinin ağırlıklı ortalaması alınabilir. L^μ , mikro-yüzey triadının μ 'ye karşılık gelen iplik parçasının uzunluğu olmak üzere $w^\mu \approx L^\mu/L$ olarak hesaplanır. Bu şekilde mikro-yüzey triad sertliği, kaplanmış iplik uzunluğuna oranı ile ağırlıklandırılır.



Şekil 2.31. Triadlar ve diğer koordinat sistemlerinin gösterimi

$$T^{YP} = \sum_{\mu=1}^6 w^\mu T^\mu \quad (2.56)$$

μ , mikro-yüzey triadının numarasıdır ve w^μ , numarası verilen mikro-yüzeyin ağırlıklandırılmasıdır.

Toplam gerilme enerjisi yoğunluğu hesaplandıktan sonra, iplik plakasının sertlik tensörü

$$K_{ijkl}^{YP} = \frac{\partial^2 T^{YP}}{\partial \epsilon_{ij} \partial \epsilon_{kl}} \quad (2.57)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitliklerden faydalananarak K_{ijkl}^{YP} 'nin nihai hali şu şekilde belirtilir:

$$K_{ijkl}^{YP} = \frac{\partial^2}{\partial \epsilon_{ij} \partial \epsilon_{kl}} (\sum_{\mu=1}^6 w^{\mu} T^{\mu}) = \sum_{\mu=1}^6 w^{\mu} \frac{\partial^2 T^{\mu}}{\partial \epsilon_{ij} \partial \epsilon_{kl}} = \sum_{\mu=1}^6 w^{\mu} K_{ijkl}^{\mu} \quad (2.58)$$

K_{ijkl}^{μ} , seçilen mikro-yüzey seviyesinin sertlik tensörüdür. Bu yaklaşım, geleneksel mikro-yüzey modelinde makro ve mikro-yüzey gerilmelerini ilişkilendirmek için İzotropik partiküllü kompozitler için kullanılan geleneksel yaklaşım prensibine benzemektedir.

Her bir mikro-yüzey üçlüsü, ipliğin tek yönlü, enine izotropik, saf liflerden ve lifler arası matristen oluşan bir bileşik olarak kabul edilen bir bölümünü temsil eder.

Normal mikro-yüzey gerinimi

$$\epsilon_N = \epsilon_{ij} n_i n_j \quad (2.59)$$

ile verilir ve enine normal gerinimi

$$\epsilon_M = \epsilon_{ij} m_i m_j, \quad \epsilon_L = \epsilon_{ij} l_i l_j \quad (2.60)$$

Eşitlikleri ile karakterize edilir. Ayrıca triadlardaki enine kayma gerinimi şu şekilde hesaplanır;

$$\epsilon_A = \frac{1}{2} \epsilon_{ij} (n_i m_j + m_i n_j), \quad \epsilon_B = \frac{1}{2} \epsilon_{ij} (n_i l_j + l_i n_j), \quad \epsilon_C = \frac{1}{2} \epsilon_{ij} (m_i l_j + l_i m_j) \quad (2.61)$$

Bu gerilme vektörleri mikro-yüzey triadının dördüncü seviye sertlik tensörünü türetmek için kullanılacaktır. Buna göre, bir mikro-yüzey triadı T^μ için gerinim enerji yoğunluğu

$$T^\mu = A_1 \epsilon_N^2 + A_2 \epsilon_M^2 + A_3 \epsilon_L^2 + \frac{A_4}{2} (\epsilon_N \epsilon_M + \epsilon_M \epsilon_N) + \frac{A_5}{2} (\epsilon_N \epsilon_L + \epsilon_L \epsilon_N) + \frac{A_6}{2} (\epsilon_M \epsilon_L + \epsilon_L \epsilon_M) + A_7 \epsilon_A^2 + A_8 \epsilon_B^2 + A_9 \epsilon_C^2 \quad (2.62)$$

Olarak hesaplanır. $A_1, A_1, \dots, A_9$ tek yönlü kompozit ipliğin elastik sabitleridir. Eşitlik (2.59), eşitlik (2.62) içine yerleştirilirse birinci terim

$$T_1 = A_1 \epsilon_N^2 = A_1 (\epsilon_{ij} n_i n_j)^2 = A_1 (\epsilon_{ij} n_i n_j) (\epsilon_{kl} n_k n_l) \quad (2.63)$$

olarak belirtilir. Devamında ikinci ve üçüncü terim

$$\begin{aligned} T_2 &= A_1 (\epsilon_{ij} m_i m_j) (\epsilon_{kl} m_k m_l) \\ T_3 &= A_3 (\epsilon_{ij} l_i l_j) (\epsilon_{kl} l_k l_l) \end{aligned} \quad (2.64)$$

Çapraz terimler içeren 4'ten 6'ya kadar olan terimler

$$\begin{aligned} T_4 &= \frac{A_4}{2} [(\epsilon_{ij} n_i n_j) (\epsilon_{kl} m_k m_l) + (\epsilon_{ij} m_i m_j) (\epsilon_{kl} n_k n_l)] \\ T_5 &= \frac{A_5}{2} [(\epsilon_{ij} n_i n_j) (\epsilon_{kl} l_k l_l) + (\epsilon_{ij} l_i l_j) (\epsilon_{kl} n_k n_l)] \\ T_6 &= \frac{A_6}{2} [(\epsilon_{ij} m_i m_j) (\epsilon_{kl} l_k l_l) + (\epsilon_{ij} l_i l_j) (\epsilon_{kl} m_k m_l)] \end{aligned} \quad (2.65)$$

olarak hesaplanır. Benzer şekilde 7'den 9'a kadar olan terimler aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} T_7 &= A_7 (\epsilon_{ij} a_i a_j) (\epsilon_{kl} a_k a_l) \\ T_8 &= A_8 (\epsilon_{ij} b_i b_j) (\epsilon_{kl} b_k b_l) \\ T_9 &= A_9 (\epsilon_{ij} c_i c_j) (\epsilon_{kl} c_k c_l) \end{aligned} \quad (2.66)$$

Burada $a_i a_j = \frac{1}{2}(n_i m_j + m_i n_j)$, $b_i b_j = \frac{1}{2}(n_i l_j + l_i n_j)$, $c_i c_j = \frac{1}{2}(m_i l_j + l_i m_j)$ olmaktadır.

Denklem (2.62)'de yerine koyulmuş ve gerilme tensörüne göre iki kez türev alınmış, bir mikro-yüzey triadının rijitlik matrisinin ifadesi

$$K_{ijkl}^{\mu} = \frac{\partial^2 T^{\mu}}{\partial \epsilon_{ij} \partial \epsilon_{kl}} = K_{ijkl}^{N\mu} + K_{ijkl}^{P\mu} + K_{ijkl}^{S\mu} \quad (2.67)$$

olarak gösterilebilir.

Burada sağ tarafta kalan üç terim, sertlik tensörünün çeşitli kısımlarını temsil eder. $K_{ijkl}^{N\mu}$, eksenel ve enine doğrultulardaki normal sertliği, $K_{ijkl}^{P\mu}$ Poisson etkilerini, $K_{ijkl}^{S\mu}$ kayma sertliğini gösterir.

Eksenel ve enine doğrultulardaki normal sertlik aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$K_{ijkl}^{N\mu} = 2A_1 n_i n_j n_k n_l + 2A_2 m_i m_j m_k m_l + 2A_3 l_i l_j l_k l_l \quad (2.68)$$

4'ten 6'ya kadar olan terimler Poisson oranını etkiler ve

$$K_{ijkl}^{P\mu} = \frac{A_4}{2}(n_i n_j m_k m_l + m_i m_j n_k n_l) + \frac{A_5}{2}(n_i n_j l_k l_l + l_i l_j n_k n_l) + \frac{A_6}{2}(m_i m_j l_k l_l + l_i l_j m_k m_l) \quad (2.69)$$

olarak karakterize edilirken yırtılma sertliğini etkileyen 7'den 9'a kadar olan terimler $K_{ijkl}^{S\mu}$ için yazıldığında,

$$K_{ijkl}^{S\mu} = 2A_7(a_i a_j a_k a_l) + 2A_8(b_i b_j b_k b_l) + 2A_9(c_i c_j c_k c_l) \quad (2.70)$$

açılımı elde edilir. Bunlar incelendiğinde bu üç terim, bir mikro-yüzey triadı için tam sertlik tensörünü verir.

Yazılacak olan $A_1, A_2 \dots A_9$ parametrelerinin açıklanması için mezo-mekanik yaklaşımı kullanılarak bir ipliğin etkin mekanik özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Üst simge olarak kullanılan Y iplik özelliklerini, matris özelliklerini m ve saf lif özelliklerini f göstermektedir. Bu bağlamda, matris terimi, bir ipliğin içindeki saf lifler arasındaki matrisi ifade eder.

$$E_{1'}^Y = V_f^Y E_{1'}^f + (1 - V_f^Y) E^m \quad (2.71)$$

Burada $E_{1'}^Y$ ipliğin eksenel modülünü, $E_{1'}^f$ fiberin eksenel modülünü, E^m matrisin modülünü ve V_f^Y ise fiberin ipliğin içerisindeki hacimsel oranını temsil etmektedir. Enine yöndeki modül için

$$E_{2'}^Y = E_{3'}^Y = \left(\frac{V_f^Y}{E_{2'}^f} + \frac{1-V_f^Y}{E^m} \right)^{-1} \quad (2.72)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Sistemin düzlem içi kaymaya karşı cevabı, kendi içinde tutarlı olarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$G_{1'2'}^Y = G_{1'3'}^Y = G^m \frac{(G_{1'2'}^f + G^m) + V_f^Y (G_{1'2'}^f + G^m)}{(G_{1'2'}^f + G^m) - V_f^Y (G_{1'2'}^f + G^m)} \quad (2.73)$$

Düzlem dışı kayma elastik modülü için, paralel değil bir seri bağlantı uygundur.

$$G_{2'3'}^Y = \left(\frac{V_f^Y}{G_{2'3'}^f} + \frac{1-V_f^Y}{G^m} \right)^{-1} \quad (2.74)$$

$G_{1'2'}^Y$, $G_{1'3'}^Y$, $G_{2'3'}^Y$, ipliğin kayma modülleri ve $G_{1'2'}^f$, $G_{1'3'}^f$, $G_{2'3'}^f$, fiberin kayma modülleridir. Ayrıca $G^m = E^m/2(1 + \nu^m)$ eşitliği sağlanarak matrisin kayma modülü bulunur. İpliğin tüm Poisson oranları için aşağıdaki eşitlikler varsayılır:

$$\begin{aligned} v_{1'2'}^Y &= V_f^Y v_{1'2'}^f + (1 - V_f^Y) \nu^m \\ v_{1'3'}^Y &= V_f^Y v_{1'3'}^f + (1 - V_f^Y) \nu^m \\ v_{2'3'}^Y &= V_f^Y v_{2'3'}^f + (1 - V_f^Y) \nu^m \end{aligned} \quad (2.75)$$

Bu efektif özellikler, ipliğin dördüncü dereceden elastikiyet tensörünün elde edilmesinden kullanılır. $1'2'$, $2'3'$, $1'3'$ olmak üzere üç adet simetri düzlemi vardır. C_{pq} , p ve q değerleri 1'den 6'ya kadar olmak üzere ipliğin elastiklik tensörü:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1'} \\ \sigma_{2'} \\ \sigma_{3'} \\ \tau_{1'2'} \\ \tau_{2'3'} \\ \tau_{1'3'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1'1'} & C_{1'2'} & C_{1'3'} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1'2'} & C_{2'2'} & C_{2'3'} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1'3'} & C_{2'3'} & C_{3'3'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{4'4'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{5'5'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{6'6'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \epsilon_{1'} \\ \epsilon_{2'} \\ \epsilon_{3'} \\ \gamma_{1'2'} \\ \gamma_{2'3'} \\ \gamma_{1'3'} \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

C_{pq} , ipliğin efektif elastiklik özelliklerini sağlar.

$$C_{1'1'}^Y = \frac{1 - (\nu_{2'3'}^Y \nu_{3'2'}^Y)}{E_{2'}^Y E_{3'}^Y \Delta}, \quad C_{2'2'}^Y = \frac{1 - (\nu_{1'3'}^Y \nu_{3'1'}^Y)}{E_{1'}^Y E_{3'}^Y \Delta}, \quad C_{3'3'}^Y = \frac{1 - (\nu_{1'2'}^Y \nu_{2'1'}^Y)}{E_{1'}^Y E_{2'}^Y \Delta} \quad (2.77)$$

$$C_{1'2'}^Y = \frac{\nu_{1'2'}^Y + \nu_{1'3'}^Y \nu_{3'2'}^Y}{E_{1'}^Y E_{2'}^Y \Delta} C_{1'3'}^Y = \frac{\nu_{2'3'}^Y + \nu_{2'1'}^Y \nu_{1'3'}^Y}{E_{1'}^Y E_{3'}^Y \Delta} C_{2'3'}^Y = \frac{\nu_{3'1'}^Y + \nu_{2'1'}^Y \nu_{3'2'}^Y}{E_{2'}^Y E_{3'}^Y \Delta} \quad (2.78)$$

$$C_{4'4'}^Y = G_{1'2'}^Y, \quad C_{5'5'}^Y = G_{2'3'}^Y, \quad C_{6'6'}^Y = G_{1'3'}^Y \quad (2.79)$$

$$\Delta = \frac{1}{E_{1'}^Y E_{2'}^Y E_{3'}^Y} \begin{vmatrix} 1 & -\nu_{2'1'}^Y & -\nu_{3'1'}^Y \\ -\nu_{1'2'}^Y & 1 & -\nu_{3'2'}^Y \\ -\nu_{1'3'}^Y & -\nu_{2'3'}^Y & 1 \end{vmatrix} \quad (2.80)$$

A_1 'den A_9 'a kadar olan parametrelerin açılımları:

$$A_1 = \frac{1}{2D} [(C_{1'1'} + C_{1'2'} + C_{1'3'})^2 + C_{1'1'}(C_{2'2'} + 2C_{2'3'} + C_{3'3'}) - (C_{1'2'} + C_{1'3'})^2] \quad (2.81)$$

$$A_2 = \frac{1}{2D} [(C_{1'2'} + C_{1'2'} + C_{2'3'})^2 + C_{2'2'}(C_{1'1'} + 2C_{1'3'} + C_{3'3'}) - (C_{1'2'} + C_{1'3'})^2] \quad (2.82)$$

$$A_3 = \frac{1}{2D} [(C_{1'3'} + C_{2'3'} + C_{3'3'})^2 + C_{3'3'}(C_{1'1'} + 2C_{1'2'} + C_{2'2'}) - (C_{1'3'} + C_{2'3'})^2] \quad (2.83)$$

$$A_4 = \frac{1}{2D} [2(C_{1'1'} + C_{1'2'} + C_{2'3'})(C_{1'2'} + 2C_{2'2'} + C_{2'3'}) + (2C_{1'2'}^2 (C_{1'1'} + C_{1'3'})(C_{2'2'} + C_{2'3'}) C_{1'2'}(C_{1'3'} + C_{2'3'} C_{3'3'}))] \quad (2.84)$$

$$A_5 = \frac{1}{2D} [2(C_{1'2'} + C_{2'2'} + C_{2'3'})(C_{1'3'} + 2C_{2'3'} + C_{3'3'}) + 2(C_{2'3'}(C_{1'1'} + C_{2'3'}) + C_{1'3'}(-C_{2'2'} + C_{2'3'}) - C_{2'2'}C_{3'3'} - C_{1'2'}(C_{1'3'} + C_{2'3'} + C_{3'3'}))] \quad (2.85)$$

$$A_6 = \frac{1}{2D} [2(C_{1'3'} + C_{2'3'} + C_{3'3'})(C_{1'1'} + 2C_{1'2'} + C_{1'3'}) + 2(C_{1'3'}(C_{1'3'} + C_{2'2'} + C_{2'3'}) - C_{1'1'}(C_{3'3'} + C_{2'3'}) - C_{1'2'}(-C_{1'3'} + C_{2'3'} + C_{3'3'}))] \quad (2.86)$$

$$A_7 = \frac{C_{4'4'}}{2} \quad A_8 = \frac{C_{5'5'}}{2} \quad A_9 = \frac{C_{6'6'}}{2} \quad (2.87)$$

$$D = C_{1'1'} + C_{2'2'} + C_{3'3'} + 2(C_{1'1'} + C_{1'3'} + C_{2'3'}) \quad (2.88)$$

A_1 'den A_9 'a kadar olan terimler eşitlik (2.67) ve (2.70) arasında kullanılarak bir mikro-yüzeyin sertlik tensörüne ulaşılabilir.

Yukarıdaki ifadeler, anizotropik malzemeler için elastik gerilim enerji yoğunluğunun hacimsel ve deviatorik gerilme tensörü kısımların toplamı olarak ifade edilmesiyle türetilmiştir. Bu konu hakkında daha fazla bilgi için Andrianopoulos ve Dernikas'ın (2013) çalışması incelenebilir.

Gerekli hesaplamaları yapmak için matrisin ve fiberin elastik özellikleri, fiberin bir TBH ve iplik içindeki hacimsel oranı ve mikro-yüzey yönelimini gösteren dalgalanma açısının bilinmesi gerekmektedir. Tipik olarak, elde edilmek istenilen özellikler eksenel modüller, kayma modülü ve kompozitin düzlem içi Poisson oranıdır. $[C^{TBH}] = [K^{TBH}]^{-1}$ olmak üzere bu değerler aşağıdaki yöntemler kullanılarak elde edilir.

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{C^{TBH}_{(1,1)}}; \quad v_{12} = -\frac{C^{TBH}_{(1,2)}}{C^{TBH}_{(1,1)}}; \quad G_{12} = \frac{1}{C^{TBH}_{(4,4)}} \quad (2.89)$$

Mikro-yüzey triadların ağırlıkları, her elipsin üç parçaya bölünmesine ve ardından ayrıklaştırılmış dalgalanma yolunun çizilmesine dayanarak karar verilir. Triada verilen ağırlık, bu bölüm tarafından kaplanan iplik uzunluğunun oranı ile orantılıdır. Böylece, twill bir dokuma için, ağırlıklar 1/8, 1/4, 1/8, 1/8, 1/4 ve 1/8'dir.

BÖLÜM 3. DENYSEL YÖNTEMLER

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Yapılacak olan deneyde farklı kumaş tipleri, farklı yalıtkan malzemeler ve farklı büyüklüklerde elektriksel test numunelerinin kombinasyonları kullanılacaktır.

Malzemeler:

- 200 gr/m² Plain dokuma kumaş
- 200 gr/m² Twill dokuma kumaş
- 420 gr/m² Twill dokuma kumaş
- Bond 300L Epoksi Seti
- 20 mikron kalınlığında LNC yalıtkan film
- 40 mikron kalınlığında LNC yalıtkan film
- 20 mikron kalınlığında PWH yalıtkan film
- 40 mikron kalınlığında PWH yalıtkan film
- 80 mikron kalınlığında PVC yalıtkan film
- 120 mikron kalınlığında PVC yalıtkan film

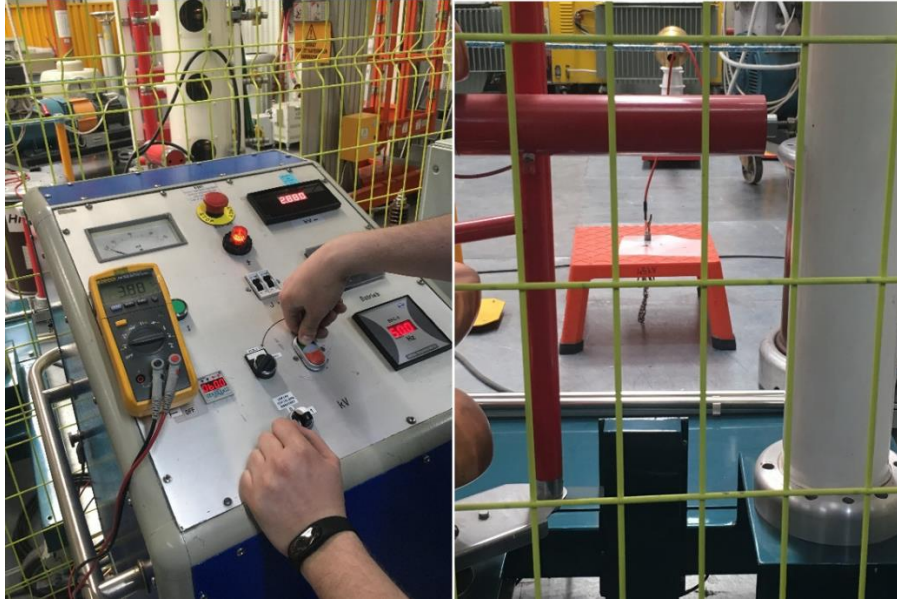
Kullanılacak olan LNC ve PWH yalıtkan filmleri Polibak firmasından temin edilmiştir. PVC filmler ise piyasada bulunan standart filmlerdir. Filmler, temin edildikten sonra Hilkar tarafından yalıtkanlık dayanımı ve yalıtkanlık sabitinin ölçümü için testlere tabi tutulmuştur.

0,02 ve 0,04 mm kalınlığındaki filmler için 6 kV'luk (Şekil 3.1.), 0,08 ve 0,12 mm kalınlığındaki filmler için 250 kV'luk (Şekil 3.2.) cihazlar kullanılmıştır.

Yalıtkanlık dayanımında her bir numuneden 6 adet ölçüm alınmıştır ve ortalama değerleri kullanılacaktır.

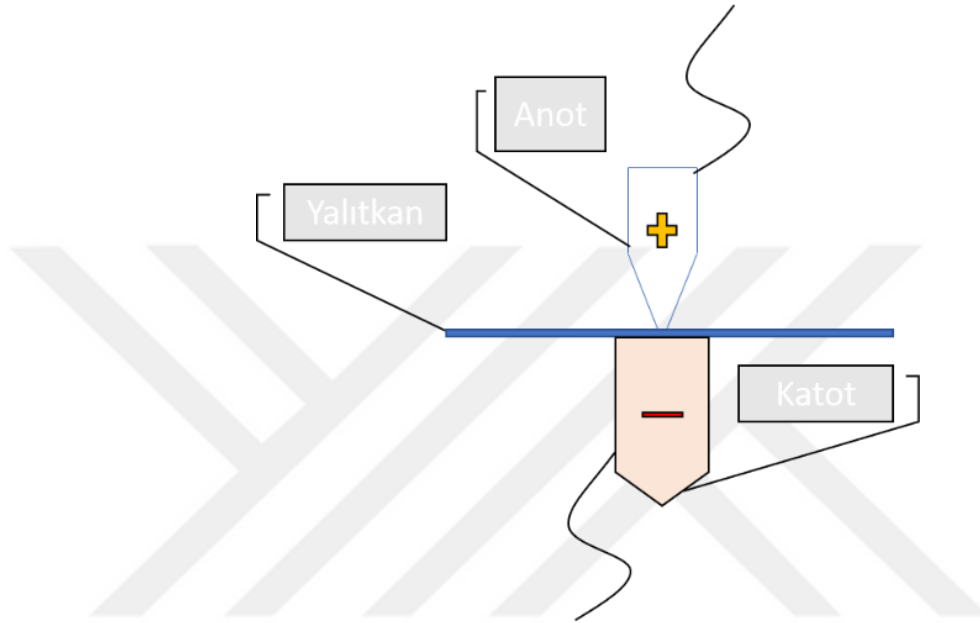


Şekil 3.1. Yalıtkanlık Dayanım Testi (6 kV'a kadar)



Şekil 3.2. Yalıtkanlık Dayanım Testi (250 kV'a kadar)

Yalıtkanlık dayanım testi, + ve – kutuplar arasına yalıtkan malzeme yerleştirilerek ve 5 Hz’de 0’dan başlayarak 20 kV’a kadar her saniyede 10 V arttırılarak gerilim uygulanması işlemiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.). Kısa devre oluştuğunda ise o malzemenin yalıtkanlık dayanımı belirlenmektedir. Her bir numune bir a4 kâğıdı boyutunda olmaktadır ve ölçüm aynı filminden alınmaktadır.



Şekil 3.3. Yalıtkanlık Dayanım Testinin Şematik Gösterimi

Yapılan ölçümler sonucu Tablo 3.1.’de görüldüğü gibi en yüksek 120 μm PVC ve en düşük 20 μm PWH olmak üzere dielektrik dayanım özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan yalıtkan malzemelerin dielektrik dayanımı

Dielektrik Dayanım Voltajı [V]					
120 μm PVC	80 μm PVC	20 μm PWH	40 μm PWH	20 μm LNC	40 μm LNC
9772	7446	3970	5780	4574	5508

3.2. Deney Tasarımı

3.2.1. Taguchi deney tasarımı

Deneysel Tasarım 1920’lerde İngiliz istatistikçi Ronald Fisher tarafından tarım alanında yapılan araştırmalar esnasında bulunmuş ve geliştirilmiştir. Yöntem, sonraki yıllarda Amerika’da, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli ürünler üzerindeki etkilerini belirlemek üzere yoğun biçimde kullanılmış ancak uygulamalar tarım sektörü ile sınırlı kalmıştır (Şirvancı, 1996).

Yapılacak olan deneyde 3 farklı yalıtkan malzeme, 2 farklı kalınlık ve 3 farklı kumaş türü kullanılacaktır. Bu duruma göre

Parametler:

A: Yalıtkan malzeme

B: Polimer matrisli karbon fiber

C: Yalıtkan malzemenin kalınlığı

olmak üzere parametreler ve seviyeler Tablo 3.2.’de verilmiştir. Buradan yola çıkarak Ortogonal dizi 32 ve 21’den hesaplanacak olursa deney numunelerinin kombinasyonları L6 Ortogonal dizi şemasına göre hesaplanmalıdır. L6 Ortogonal dizi şeması Şekil 3.4.’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Taguchi Metodu İçin Parametre ve Seviyeler

SEVİYELER			
PARAMETRE	0	1	2
A	PVC	LNC	PWH
B	200 gr/m2 twill	200 gr/m2 plain	420 gr/m2 twill
C	Kalınlık 1	Kalınlık 2	

Experimental runs	Factor (levels)		
	A(3)	B(3)	C(2)
1	1	1	0
2	1	1	1
3	2	0	0
4	2	2	1
5	0	2	0
6	0	0	1

Şekil 3.4. L6 Ortogonal Dizisi $3^2 \times 2^1$ (Sorana ve Lorentz)

Deney kombinasyonları L6 ortogonal dizisine göre oluşturulduğunda Tablo 3.3.'te verilen örneklemeler gerçekleştirilecektir.

Tablo 3.3. Deney Numuneleri

DENEY NO	PARAMETRELER		
	Yalıtkan	Kumaş	Kalınlık
1	LNC	200-twill	20
2	LNC	200-twill	40
3	PWH	200-plain	20
4	PWH	420 twill	40
5	PVC	420 twill	80
6	PVC	200-plain	120

Yapılacak olan çalışmalarda tüm numuneler aynı boyutta olacaktır. Fakat kompozit malzemelerin iç yapısının düzensizliği, ölçülerdeki bozukluklar ve genel tolerans değerleri değişken olduğundan dolayı, bir örnek türünden 3 farklı boyutta numune üretilecektir. Bu, malzemenin yüzey alanı büyüdükçe, kapasitedeki değişimin formüle bağlı olarak doğrusal bir şekilde arttığını ya da kusurlardan dolayı doğrusal bir şekilde artmadığını gösterecektir.

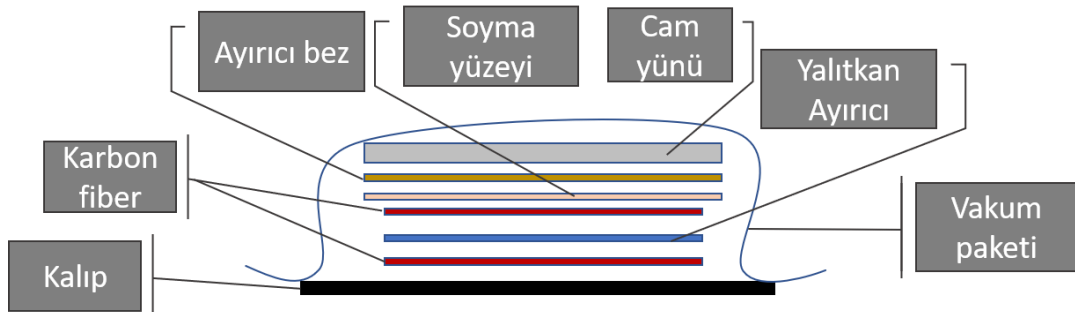
Standart deney numunesi 100 x 100 mm boyutlarındayken ayrıca 420 Twill örgü ve 80 mikron PVC ile bir adet 80 x 80 mm (Numune 7) ve bir adet 130 x 130 mm (Numune 8) üretilecektir.

Elde edilen deney sonuçlarından yola çıkarak, oluşabilecek en iyi kombinasyonun tahmini için hesaplamalar yapılacaktır. Uygun parametre seviyelerine karar verebilmek adına Sinyal/Gürültü (S/G) oranları kullanılacaktır.

3.2.2. Deney düzeneği ve imalat

Polimer ile güçlendirilmiş karbon fiber imalatında başta infüzyon, RTM, elle yatırma, vakum paketlenme olmak üzere pek çok imalat yöntemi bulunmaktadır. Yapılacak olan deneyde minimum bütçe ile maksimum kalitede ürün elde etmek gerekliliği düşünülürse vakum paketlenme yöntemi fiyat/performans bakımından diğer yöntemlere göre oldukça verimlidir.

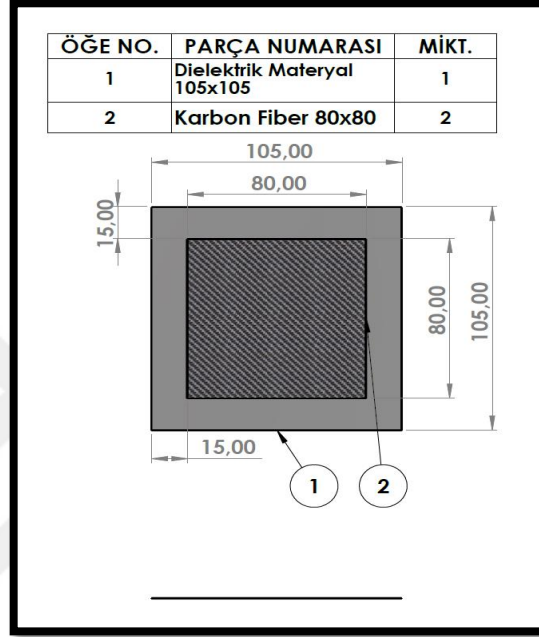
Vakum paketlenme yöntemi, bir kalıp üzerine fiber kumaşın serilmesinin ardından reçine karışımının bir fırça vasıtasıyla emdirilmesi yöntemine dayanır. Belirtilen prosesin yapılmasının ardından üzerine fazla reçinenin emilmesini sağlayacak delikli ayırıcı bir yüzey serilir. Ardından bir ayırıcı perde ve onun da üzerine fazla reçineyi emmesi için bir emici battaniye serilir. Daha sonra kalıbın etrafına vakum ortamının sağlanması amacı ile vakum bandı çekilir. Vakum poşetinin yapıştırılması ve vakum motoru ile iç ortamın vakumlanması ile proses tamamlanır. Bu yöntem, fazla reçinenin emilmesini sağlamakla birlikte laminaların birbirine boşluksuz bir şekilde yapışmasını sağlamaktadır. Teorik olarak bu yöntemle metrekare başına düşen karbonfiber ağırlığı kadar reçine, karbon fiber tarafından emilecektir. Bu da ağırlıkça %50 oranına tekabül etmektedir.



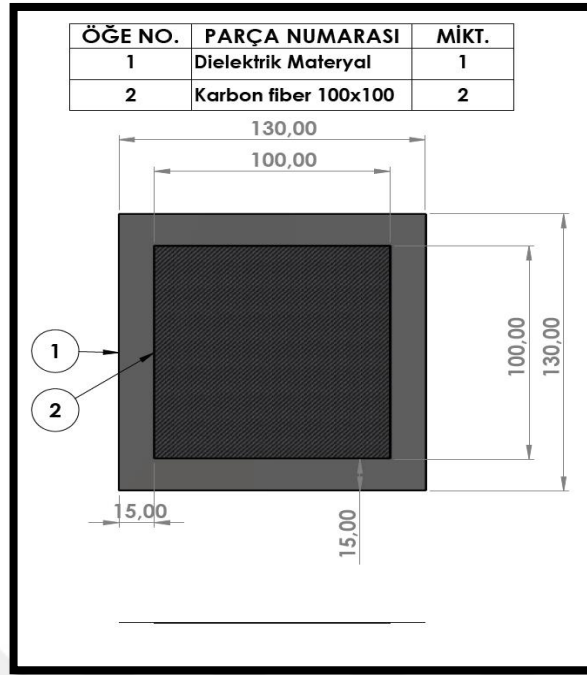
Şekil 3.5. Vakum Paketlenme Yöntemi ile Karbon Fiber Kapasitör Üretimi

3.2.3. Deneyin gerçekleştirilmesi

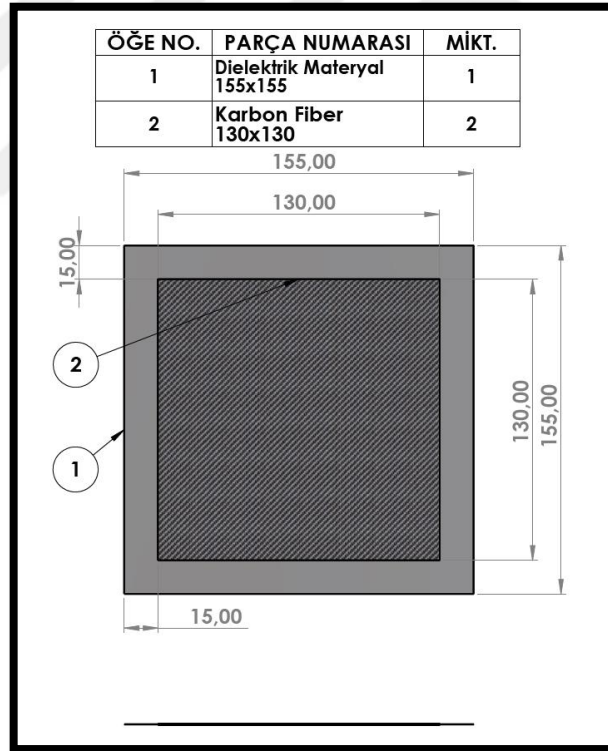
Deney, Profen İletişim Teknolojileri Prototip Atölyesi'nde gerçekleştirilmiştir. Deney de üretilecek elektriksel test numuneleri Şekil 3.6., Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de verilmiştir.



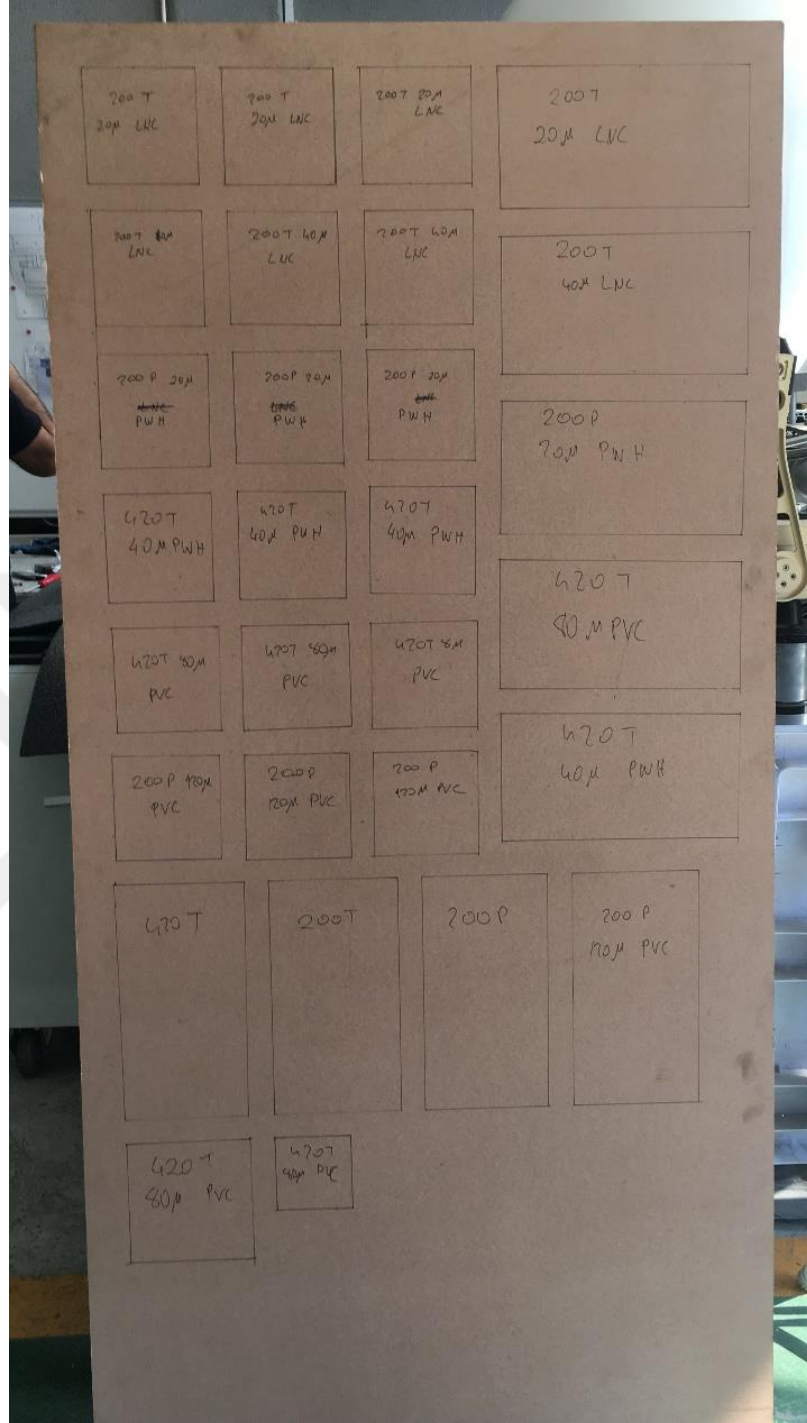
Şekil 3.6. Test Numunesi 7 ve 8'in ölçüleri



Şekil 3.7. Test Numunesi 1,2,3,4,5 ve 6'nın Ölçüleri



Şekil 3.8. Test Numunesi 8'in Ölçüleri



Şekil 3.10. Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımı ve mesafeler oluşturulduktan sonra, ölçüleri verilen mdf plakaların üzerine konumlar çizilerek yerleşimler belirlendi (Şekil 3.10.). Ardından kütleli olarak reçine-kürleştirici karışımı fırça vasıtası ile karbon fiber kumaşa emdirildi. İslatılmış kumaş Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Reçine Emdirilmiş Karbon Fiber

Etrafına boşluk kalmayacak şekilde sızdırmazlık bandı çekildikten sonra sırasıyla numunelerin üzerine peel ply, ayırıcı, emici katman ve vakum poşeti yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırası Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Numuneler Üzerine Yerleştirilen Katmanlar

Vakum poşetinin yerleştirilmesinin ardından, kalıbın ortasından vakum boşluğu açılıp, fazla reçine, emici yüzeye doğru vakumlanmaya başlanmıştır (Şekil 3.13.).



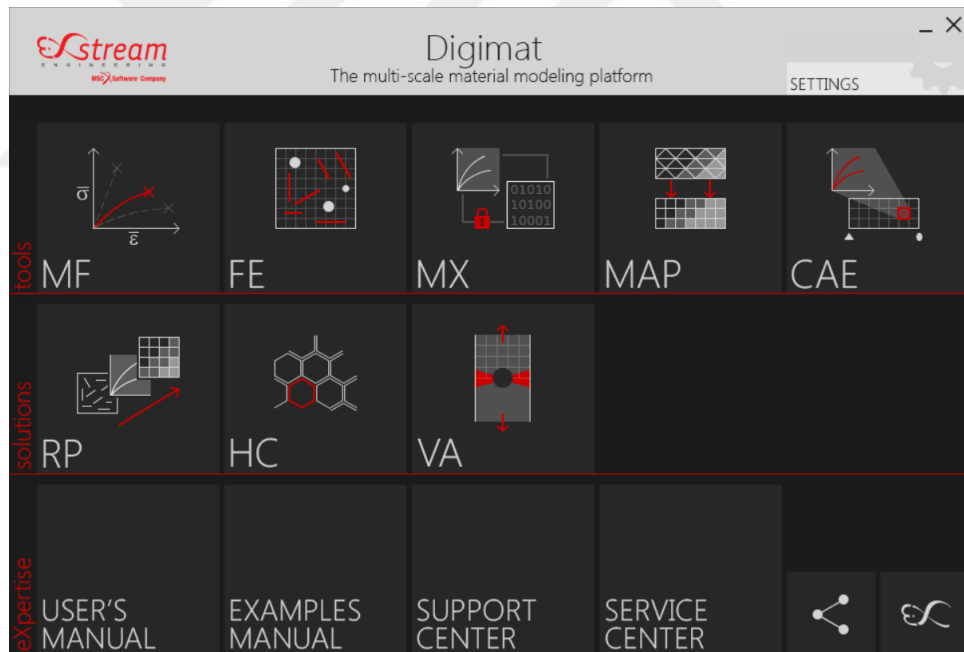
Şekil 3.13. Vakum Altında Kürlenme

Kontrollü imalat prosesinin parametreleri Őu Őekildedir:

Tarih	:2.06.2018
Sıcaklık	:28 Celcius
Bağıl Nem	:72%
Motor Vakum Hacmi	:5m ³ /h
ReĒine K�rleŐtirici Karışımı	:1/2
Kürlenme S�resi	:34 Saat
Vakum Pompası �alıŐma S�resi	:30 dakika
Yaklaşık Islak �r�n Karışımı	:1/1

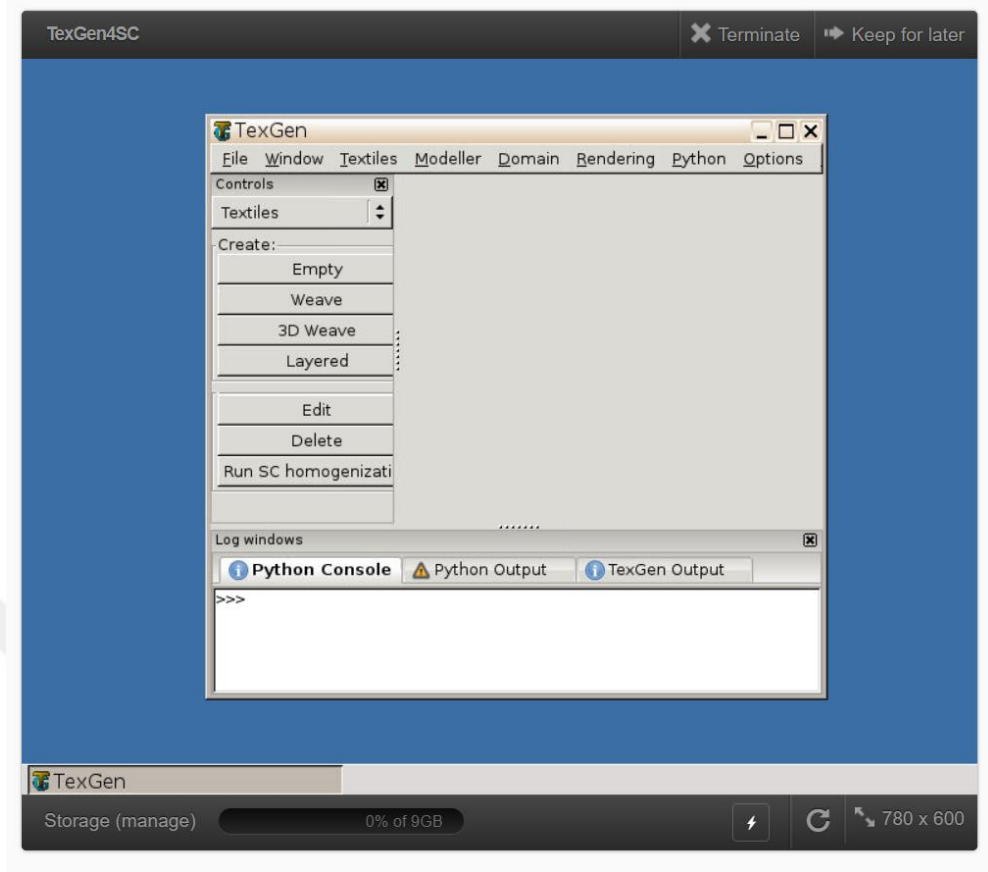
BÖLÜM 4. NUMUNEYE DAYALI HESAPLAMALAR

Teori bölümünde anlatılan çok ölçekli malzeme tasarımı için yapılacak olan hesaplamaları basit bir şekilde gerçekleştirebilmek amacı ile paket programlar kullanılmıştır. Bu programlar, daha hızlı ve hatasız çözümler vermektedir. Bunların en başında Digimat gelmektedir. MF ara yüzü kullanılarak bir kumaş tasarımı yapılabilir ve matris ile mekaniksel davranışları ön görülebilir. Gerekli olan bilgiler ise üretici dataları ve (veya) üretilmiş numunenin mikroskopik incelemesinden gelen geometri verilerine göre edinilebilir.



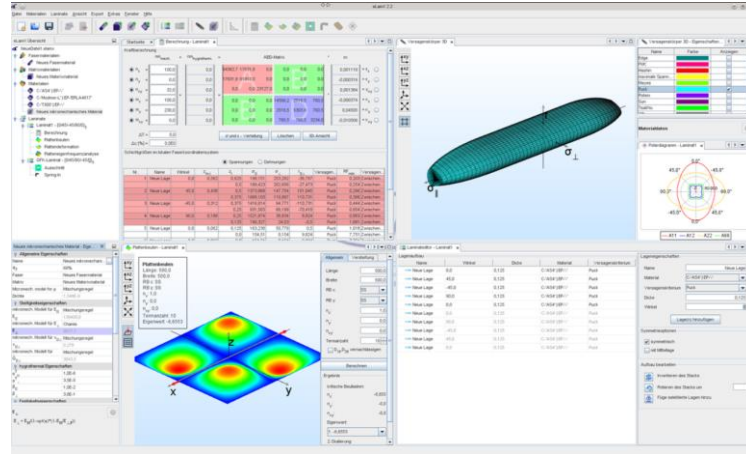
Şekil 4.1. Digimat Giriş Bölümü

Digimat benzeri ve açık erişimli bir program olan TexGen4SC'de bu işlemler ücretsiz olarak yapılabilir. TexGen4SC, sadece www.cdmhub.org sitesinden açılacak bir hesap ile uzak bir bilgisayar erişimi verilerek kullanılabilir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. TexGen4SC Uzak Bilgisayar Arayüzü

Dokuma bir kumaş ve polimerik bir reçine emdirilecek kumaşın temsili birim hücrelerden oluşan ve birden çok, farklı malzemelerden oluşacak katmanlı bir yapının yani laminatın mekaniksel özellikleri hesaplanmalıdır. Makro analiz için eLamX2 kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin makro mekanik özelliklerinin hesaplanması bölümünde yapılan hesaplamaları analitik olarak hesaplamak sürdürülebilir bir yöntem değildir. Bu nedenle eLamX2 gerekli hesaplama hızını kazandıracaktır.



Şekil 4.3. eLamX2 Program Ara yüzü

Malzeme özellikleri tedarikçi firmalardan temin edilmiştir ve değerleri Tablo 4.1., Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.1. Karbon Fiberin Mekanik Özellikleri

Yoğunluk	Eksenel Elastiklik Modülü	Düzlem İçi Elastiklik Modülü
1,8 g/cm ³	220 GPa	40 GPa
Enine Kayma Modülü	Enine Poisson Oranı	Düzlem İçi Poisson Oranı
30 GPa	0,25	0,3

Tablo 4.2. Epoksinin Mekaniksel Özellikleri

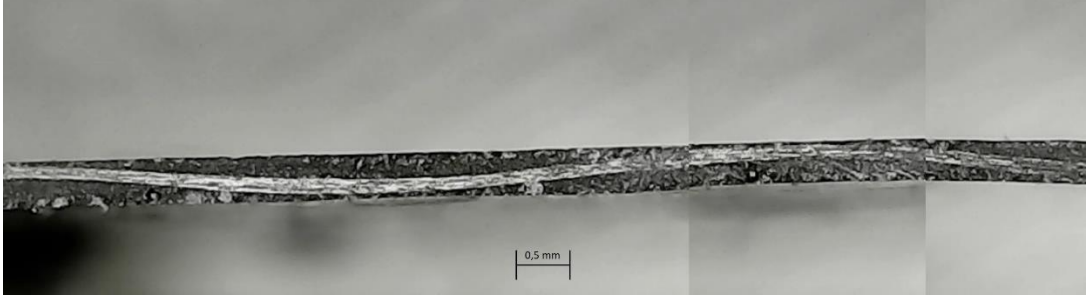
Yoğunluk	Elastiklik Modülü	Kayma Modülü	Poisson Oranı
1,54 g/cm ³	3000 MPa	1240 MPa	0,35

Tablo 4.3. İnce Filmlerin Mekaniksel Özellikleri

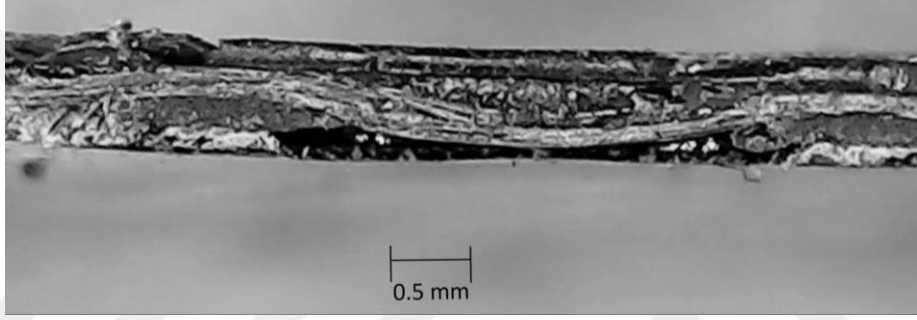
İnce Film	Yoğunluk	Elastiklik Modülü	Kayma Modülü	Poisson Oranı
PVC	1,4 g/cm ³	2480 MPa	885 MPa	0,4
PWH	0.96 g/cm ³	266 MPa	113 MPa	0,2
LNC	0,9 g/cm ³	288 MPa	124 MPa	0,16

Elde edilen veriler doğrultusunda 200 g/m² twill ve plain kumaşların geometrik yapılarını belirlemek amacı ile numuneler mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 4.4.,

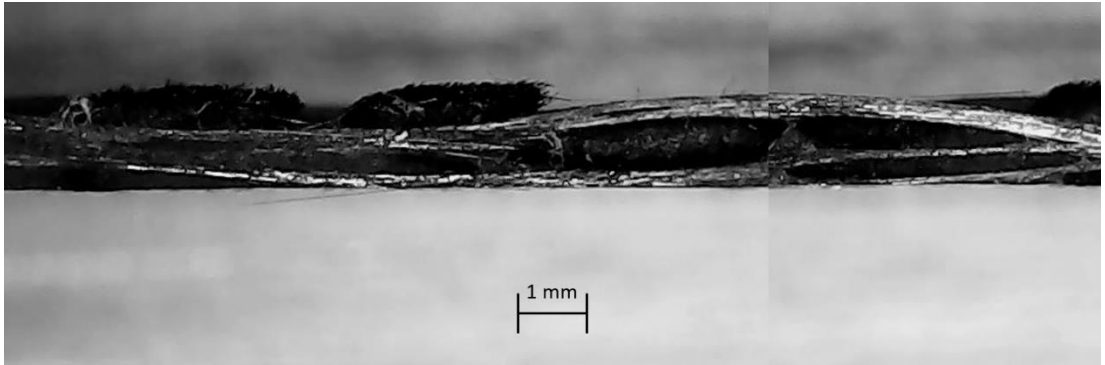
Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.). İncelemeler sonucunda gerekli ölçüler alınmıştır ve program içine veriler girilmiştir.



Şekil 4.4. 200 g/m² 2x2 Twill Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi



Şekil 4.5. 200 g/m² Plain Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi



Şekil 4.6. 420 g/m² Twill Kumaşın İmalat Sonrası Geometrisi

Tek bir plaka halinde düşünülerek yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 4.4.'te verilmiştir. Daha sonra eLamX2 programında lamina olarak girilmiştir. İki lamina arasına bir yalıtkan yerleştirilecek şekilde kombinasyonlar oluşturulmuştur. Kombinasyonların mekaniksel özellikleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Hesaplanan Tek Tabaka Lamina Özellikleri

Mekanik Özellik	Plain	2x2 Twill (200 g/m ³)	2x2 Twill (420 g/m ³)
Efektif Elastiklik Modülü (E11, E22)	20968 MPa	22564 MPa	237820 GPa
	2186,9		1888 MPa
Efektif Kayma Modülü	MPa	1318 MPa	

Tablo 4.5. Numunelerin Hesaplanan Elastiklik Modülleri

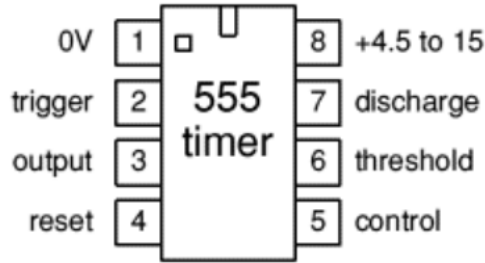
Numune Numarası	Hesaplanan [GPa]
1	22.12
2	21.7
3	20.5
4	23.2
5	23.7
6	19

BÖLÜM 5. ÖLÇÜM

5.1. Elektriksel Ölçümler

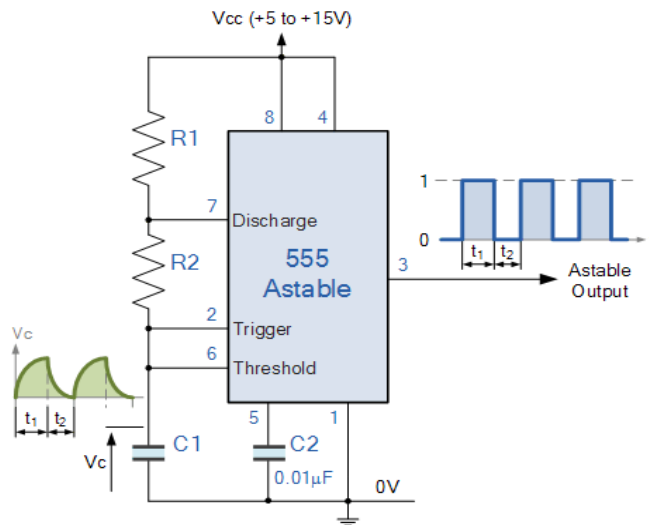
Elektriksel ölçümlerde 555 entegresi kullanılarak darbe üretimi gerçekleştirilmiştir.

555 entegresi, bir tür asimetrik kare dalga osilatörüdür. Basit zamanlama devrelerinde kullanılmaktadır.



Şekil 5.1. 555 Entegresinin Basit Şeması

555 Entegresi ile sinyal üreten bir devre yapılmıştır. Bu sinyaller ile kapasitörün dolma ve boşalması sağlanmıştır. Yapılan devrenin şeması Şekil 5.2.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Devre Şeması

Dolma ve boşalma süresine göre eşitlik (5.1)'de gösterilen hesaplama yöntemiyle kapasitörün kapasitesinin hesaplanması gösterilmiştir.

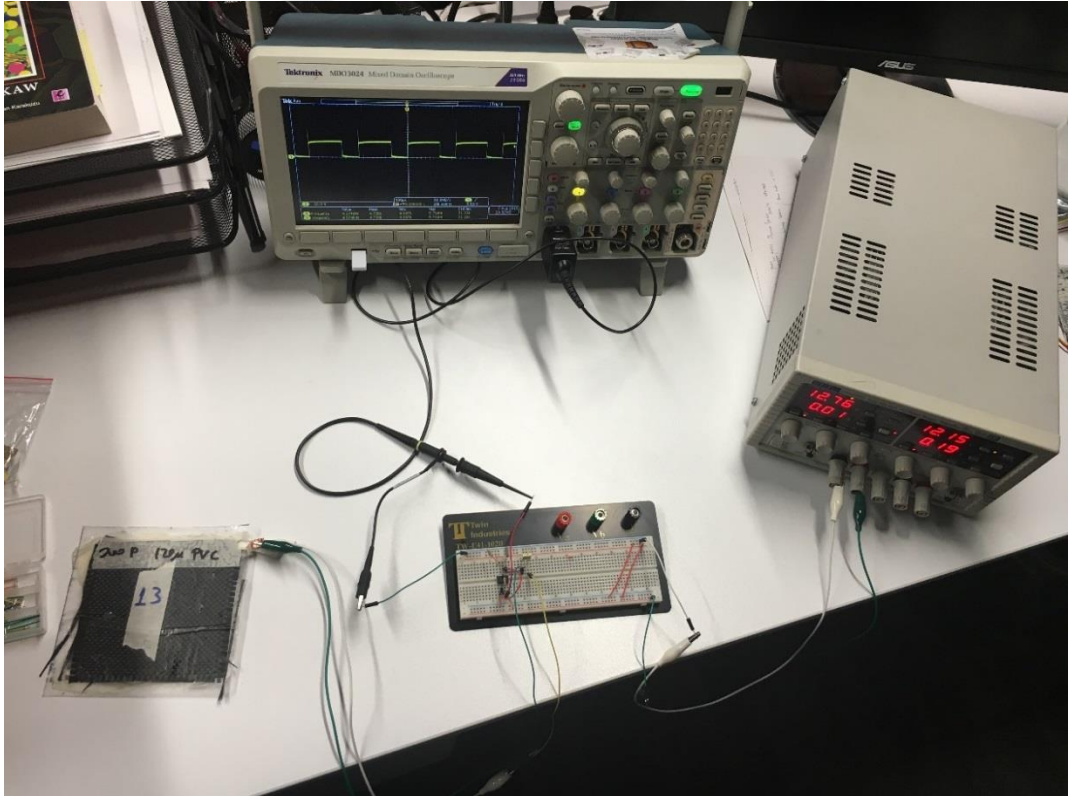
$$t_1 + t_2 = 0.693(R_1 + 2R_2).C_{kap} \quad (5.1)$$

Dirençlerin her ne kadar 1 kilo ohm olduğu anlaşılrsa da kontrol amaçlı ölçümler yapıldığında dirençler şu şekilde çıkmaktadır:

$$R_1 = 1008 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 1018 \text{ ohm}$$

Burada zaman ve direnç bilinenleri ile kapasite hesaplanmaktadır. Yapılan elektriksel test düzeneği Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. Ölçümlerde Tektronix marka MDO3024 model osiloskop kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Elektriksel Test Düzeneği

5.2. Mekaniksel Ölçümler

Yapılan çalışmalarda mekaniksel test numunelerinin birim kalınlıkları her bir malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle en ve boy olarak ASTM 3039D stadardına uygun olarak üretilsede kalınlık olarak standardın dışına çıkılması durumunda kalınmıştır. Bu, her bir birim yapının kendine özgü standardı olması gerektiğini göstermektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda çekme numunelerinde ASTM 3039D standartlarına ulaşmak adına istenilen kalınlıklara çıkılmıştır. Fakat bu mezo ölçekte tasarlanan birim yapı olduğundan dolayı, her iki yüzeyinde tek kat karbon fiber tabaka olmalıdır. 2-2,5 mm kalınlığındaki numuneler, birim yapının mekaniksel özelliklerini göstermekten ziyade daha çok o yapıda kullanılan polimer ile güçlendirilmiş karbon fiberin mekaniksel özelliklerini göstermektedir. Bu sebeple standarda uygun yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında mezo ölçekte çalışılan bu çalışmada yapılan mekaniksel testlerde malzemenin elastik davranışı düşük çıkmıştır.



Şekil 5.4. Sincotec Power Swingly Test Cihazı

Çekme testinde kullanılmak üzere her bir test örneğinden 3'er adet numune üretilmiştir ve Şekil 5.4.'te gösterilen Sincotec Power Swingly test cihazında çekme testi gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

6.1. Mekaniksel Sonuçlar

Daha önce hesaplanan (Tablo 4.5.) değerler ile testlerde elde edilen sonuçlar Tablo 6.1.'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.1. Hesaplanan ve Test Sonuçları Karşılaştırılması

Numune Numarası	Hesaplanan [GPa]	Test Sonuçları [GPa]	% Hata
1	22.12	21.34	3.5
2	21.7	17.24	20.55
3	20.5	15.29	25.41
4	23.2	20.3	12.5
5	23.7	22.4	5.4
6	19	13.6	28.42

Ağırlıkları ve hacimleri ölçülen numuneler, ölçülen elastiklik modülünün yoğunluklarına bölüldüğünde spesifik elastiklik modülü elde edilecektir. Sistemde ağırlıktan tasarruf ederken aynı zamanda rijitlik de istenmektedir. Bu sayede çok yönlü karşılaştırma yapılabilen Spesifik Elastikiyet Modülü hesaplanarak Tablo 6.2.'de verilmiştir.

Tablo 6.2.Spesifik Elastiklik Modülü (GPa/ g/cm³)

ÖRNEK						
Deney No	1	2	3	4	5	6
1	17,48	13,65	12,95	19,75	24,44	10,39
2	18,74	13,80	13,47	14,98	22,80	11,48
3	20,70	13,94	14,36	15,67	18,41	Fail
Ortalama	18,97	13,80	13,59	16,80	21,89	10,93

Spesifik elastiklik modülüyle birlikte spesifik çekme dayanımı da sistemin mukavemeti için önemli olacağından, spesifik çekme dayanımı da incelenecektir. Numunelerin Spesifik Çekme Dayanımı Tablo 6.3.'te gösterilmiştir.

Tablo 6.3.Spesifik Çekme Dayanımı (MPa/g/cm³)

ÖRNEK						
Deney No	1	2	3	4	5	6
1	187,422	165,6	152,444	103,9226	168,1258	120,2044
2	165,059	171,2	211,111	157,6032	166,5852	147,6378
3	173,333	138,2	167,7733	145,1859	167,5279	-
Ortalama	175,271556	158,33333	177,1096296	135,583684	167,343	133,92606

6.2. Elektriksel Deney Sonuçları

Elektriksel testlerde Taguchi deney tasarımına göre hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Her deney aynı şartlarda, 3'er numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numarasına göre elektriksel ölçüm sonuçları (nF) Tablo 6.4. Elektriksel Deney Sonuçları [nF]'te gösterilmiştir. Tablo 6.5.'te verilen 7. ve 8. deney ise sırasıyla 130x130 ve 80x80 mm'lik plakalarda, alana bağlı olarak kapasitenin değişimini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.

Tablo 6.4. Elektriksel Deney Sonuçları [nF]

ÖRNEK NO						
Deney No	1	2	3	4	5	6
1	1,4	1,324	1,21	1,21	1,46	0,69
2	1,67	1,255	1,03	1,28	1,783	0,8
3	1,6	1,301	1,11	1,26	1,553	0,82
Ortalama	1,557	1,293	1,117	1,25	1,599	0,77

Yapılan deneylerde sistemin yüzey alanı büyüdükçe kapasite eşitliğine bağlı olarak depolanan enerji de lineer olarak artmalıdır. Taguchi Deney Tasarımı başlığı altında da belirtildiği gibi, bu durumun örgü tipi karbon fiberden yapılan plakalarda nasıl değiştiğini gözlemlemek gerekmektedir. Bunun sebebi karbon fiber örgüleri arasına dolabilecek matris malzemesi, örgünün içinde barındırdığı dalgali yüzey yapısı ve kalabilecek hava boşluklarının enerji depolamanın doğrusallığını etkileyebilecek

olmasıdır. Küçük parçalarda alan ile birlikte kapasite artışı lineerliğini kaybetmese bile, daha büyük parçalara gidildikçe bu durum değişebilir.

Yapılan deneylere ilaveten 80 mikrometre PVC ve 420 g/m² twill örgü tipi kullanılarak 130x130 mm² ve 80x80 mm² boyutlarında numuneler üretilmiştir ve bunlara sırasıyla 7 ve 8 örnek numarası verilmiştir. Bu numunelerin elektriksel ölçüm sonuçları (nF) Tablo 6.5.'te verilmiştir.

Tablo 6.5. Lineerite test sonuçları

	ÖRNEK		
	7	8	5
Kapasite [nF]	2,83	0,85	1,599
Alan [mm²]	16900	6400	10000

Üretilen 1'den 6'ya kadar olan numunelerin birim ağırlık başına düşen enerji miktarları (j/g) Tablo 6.6.'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Üretilen Numunelerin Enerji Yoğunlukları (j/g)

	ÖRNEK NO					
Deney No	1	2	3	4	5	6
1	0.001627	0.00201	0.001059	0.00106	0.00204	0.00253
2	0.001941	0.0019	0.000902	0.00113	0.0025	0.00294
3	0.00186	0.00197	0.000972	0.00111	0.00217	0.00301
Ortalama	0.001809	0.00196	0.000978	0.0011	0.00224	0.00283

6.3. Taguchi Deneysel Yöntemi – Optimizasyon Sonuçları

Taguchi yöntemi ile tasarlanan deneylerden elde edilen mekanik ve elektriksel test sonuçları kullanılarak yine Taguchi yöntemi yardımıyla en iyi spesifik elastiklik modülü, spesifik çekme dayanımı ve enerji yoğunluğu değerlerini veren parametre optimizasyonu yapılmıştır. Taguchi yönteminde parametre optimizasyonu için Sinyal/Gürültü (S/G) oranları kullanıldığı üç farklı analiz bulunur (Tablo 6.7.). Bu çalışmada en büyük spesifik elastiklik modülü, spesifik çekme dayanımı ve enerji

yoğunluğu değerlerini elde etmek amaçlanmıştır. Bu yaklaşımdan yola çıkarak en büyük en iyi analizi kullanılmıştır.

Tablo 6.7. Sinyal/Gürültü Oranının Karakteristik Tipine Göre Hesaplanması

Karakteristik Tipi	S/N Oranı
En Küçük En İyi	$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right)$
Hedef Değer En İyi	$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum (y_i - y_0) \right)$
En Büyük En İyi	$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$

En büyük spesifik elastiklik modülü hesaplandığında 420 g/m²'lik twill kumaş ve 20 mikron kalınlığında LNC ince film sonucuna ulaşıldığı Tablo 6.8.'de gösterilmiştir. Bu üretilmemiş fakat ön görülebilen kombinasyonun adı artık "Numune 9" olarak anılacaktır.

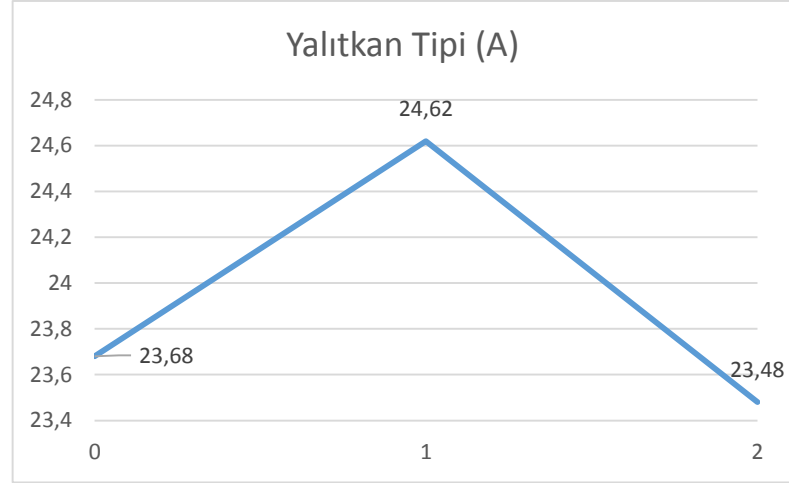
Tablo 6.8. Spesifik Elastiklik Modülüne Göre En Büyük En İyi (Numune 9)

Parametre	Seviye	Malzeme
A	1	LNC
B	2	420 twill
C	0	20

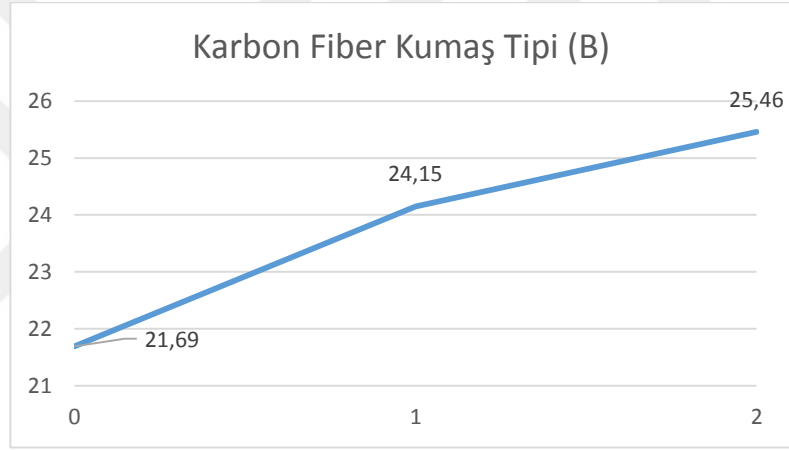
Numune 9'un en büyük en iyi spesifik elastiklik modülü için S/G oranları Tablo 6.9.'da, S/G oranlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 6.1., Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'te verilmiştir.

Tablo 6.9. En büyük spesifik elastiklik modülü için S/G oranları

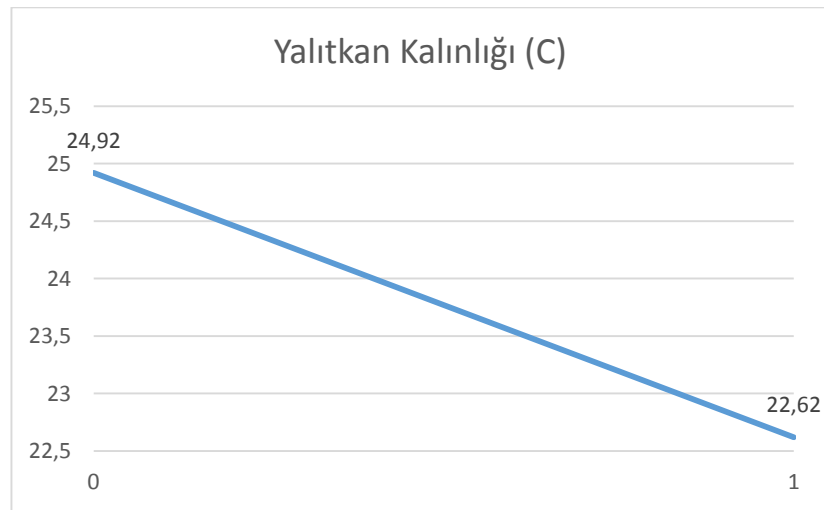
Parametre	Seviye	S/G Oranı
A	0	23.68
	1	24.62
	2	23.48
B	0	21.69
	1	24.15
	2	25.46
C	0	24.92
	1	22.62
S/G Optimum	26.994	



Şekil 6.1. En büyük spesifik elastiklik modülü için A parametresinin S/G oranları



Şekil 6.2. En büyük spesifik elastiklik modülü için B parametresinin S/G oranları



Şekil 6.3. En büyük spesifik elastiklik modülü için C parametresinin S/G oranları

En büyük spesifik çekme dayanımı hesaplandığında 200 g/m²'lik twill kumaş ve 20 mikron kalınlığında LNC ince film sonucuna ulaşıldığı Tablo 6.10.'da gösterilmiştir.

Bu kombinasyon Numune 10 olarak verilmiştir. Numune 10, aslında 1 numaralı numune ile aynı kombinasyondur. Deneysel sonuç ile Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyon sonucu arasında % 9 civarı fark görülmektedir. LNC ve 200 g/m² twill kumaş ile yapılan bu kombinasyonda 3 farklı test yapılarak ortalaması kullanılmış ve deneysel çalışmada aynı şartlarda çalışılsa dahi bazı bozucular sebebiyle ölçülen değerlerde sapma görülebilmektedir. Bu kombinasyon için optimum şartlarda beklenen spesifik çekme dayanımı değeri, 185.48 [MPa/g/cm³] olarak değerlendirilebilir. Spesifik elastik modülü ve enerji yoğunluğu, 1 numaralı numune ile aynı kabul edilecektir.

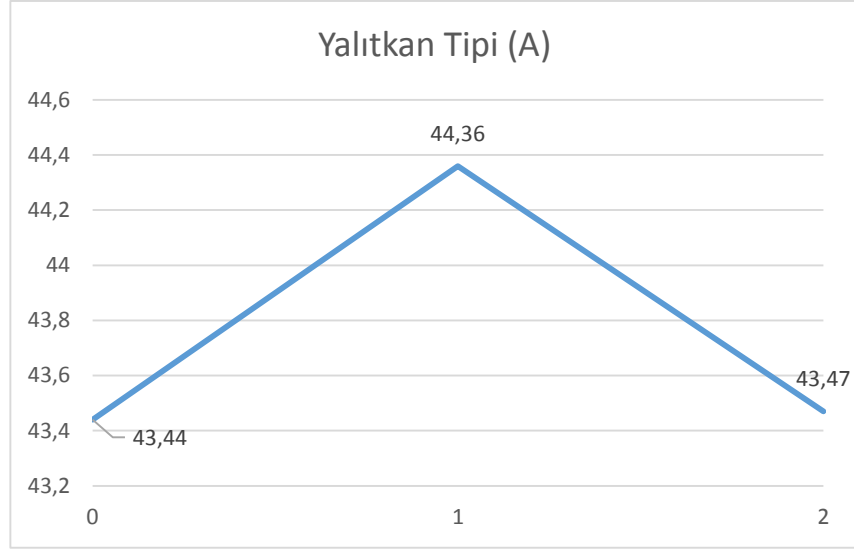
Tablo 6.10. Spesifik Çekme Dayanımına Göre En Büyük En İyi (Numune 10)

Parametre	Seviye	Malzeme
A	1	LNC
B	1	200 twill
C	0	20

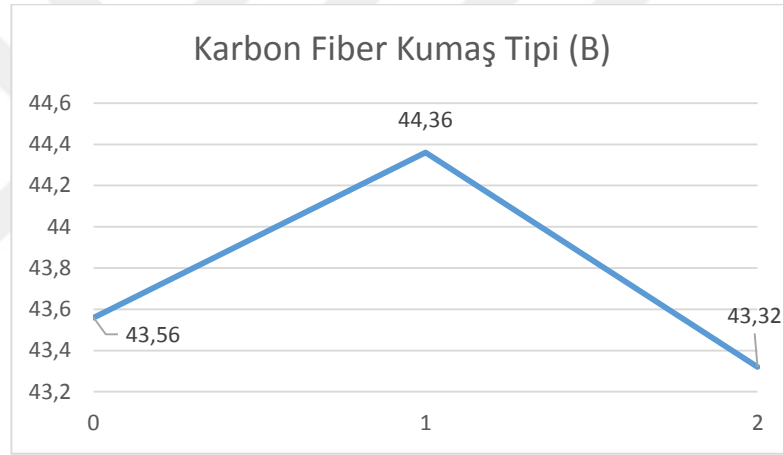
Numune 10'un en büyük en iyi spesifik çekme dayanımı için S/G oranları Tablo 6.11.'de, S/G oranlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 6.4., Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.'da verilmiştir.

Tablo 6.11. En büyük spesifik çekme dayanımı için S/G oranları

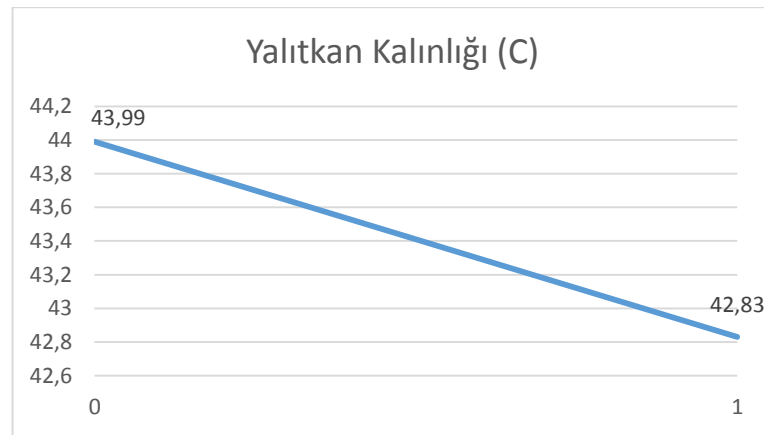
Parametre	Seviye	S/G Oranı
A	0	43.44
	1	44.36
	2	43.47
B	0	43.56
	1	44.36
	2	43.32
C	0	43.99
	1	42.83
S/G Optimum		45.37



Şekil 6.4. En büyük spesifik çekme dayanımı için A parametresinin S/G oranları



Şekil 6.5. En büyük spesifik çekme dayanımı için B parametresinin S/G oranları



Şekil 6.6. En büyük spesifik çekme dayanımı için C parametresinin S/G oranları

En büyük enerji yoğunluğu hesaplandığında 200 g/m²'lik twill kumaş ve 120 mikron kalınlığında PVC ince film sonucuna ulaşıldığı Tablo 6.12.'de gösterilmiştir. Üretilmemiş fakat ön görülebilen bu kombinasyonun adı artık “Numune 11” olarak anılacaktır.

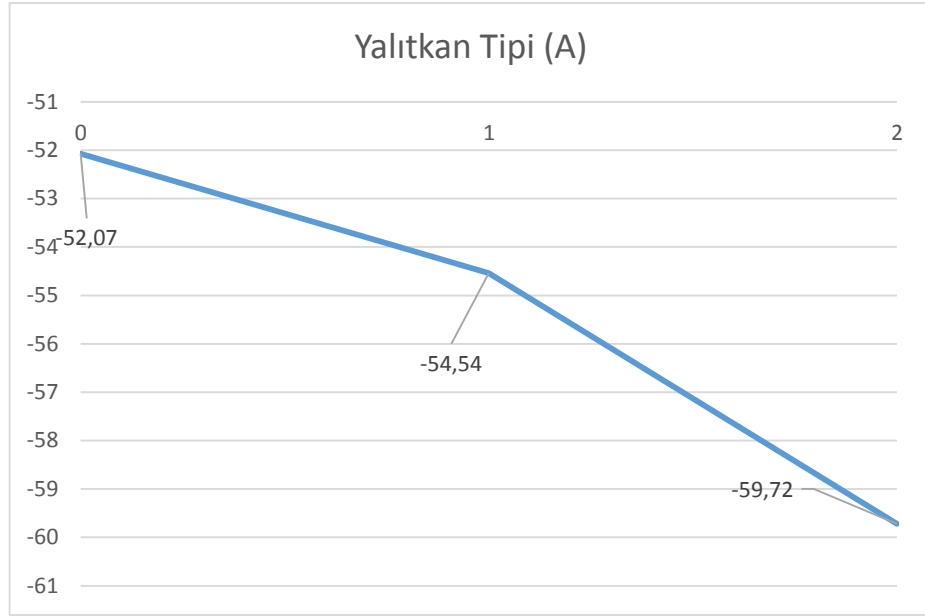
Tablo 6.12. Enerji Yoğunluğuna Göre En Büyük En İyi (Numune 11)

Parametre	Seviye	Malzeme
A	0	PVC
B	1	200 twill
C	1	120

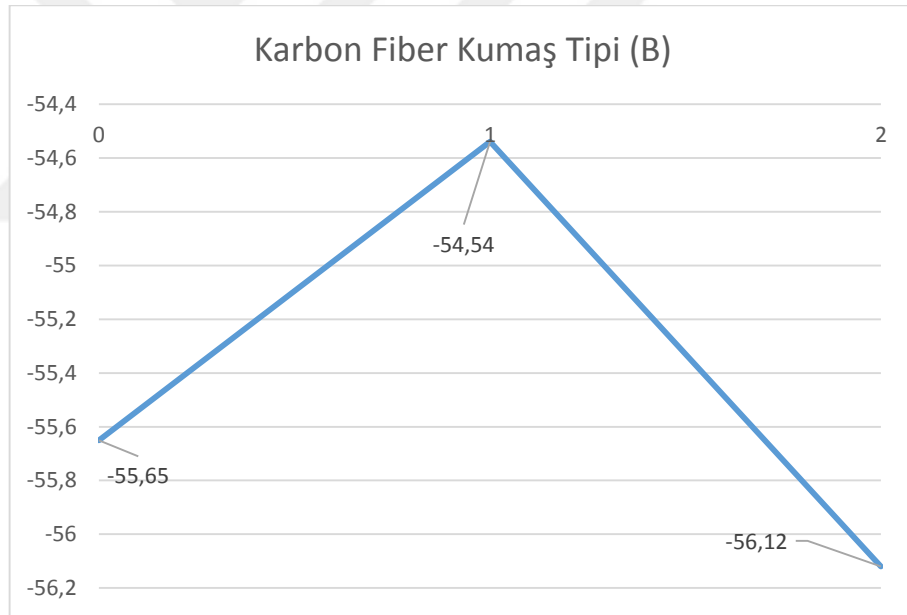
Numune 11'in en büyük en iyi spesifik enerji yoğunluğu için S/G oranları Tablo 6.13.'de, S/G oranlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 6.7., Şekil 6.8. ve Şekil 6.9.'da verilmiştir.

Tablo 6.13. En büyük enerji yoğunluğu için S/G oranları

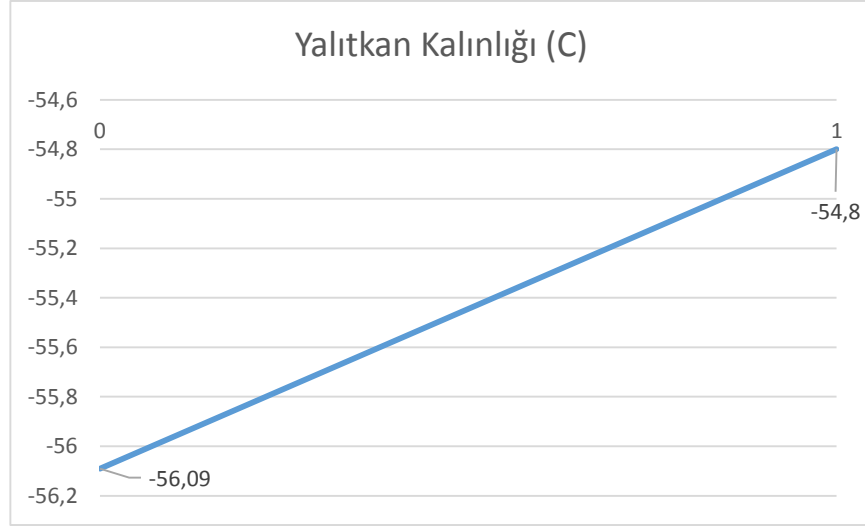
Parametre	Seviye	S/G Oranı
A	0	-52.07
	1	-54.54
	2	-59.72
B	0	-55.65
	1	-54.54
	2	-56.12
C	0	-56.09
	1	-54.8
S/G Optimum		-50.52



Şekil 6.7. En büyük enerji yoğunluğu için A parametresinin S/G oranları



Şekil 6.8. En büyük enerji yoğunluğu için B parametresinin S/G oranları



Şekil 6.9. En büyük enerji yoğunluğu için C parametresinin S/G oranları

En büyük en iyi hesaplanan değerler Tablo 6.14.'te gösterilmiştir.

Tablo 6.14. En Büyük En İyi Kombinasyon Değerleri

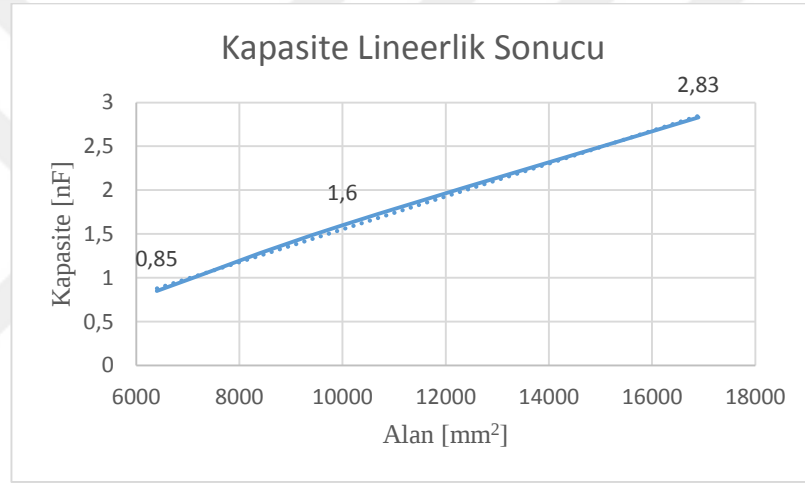
En Büyük En İyi	Numune	Kombinasyon	Değer
Spesifik Elastiklik			
Modülü	9	420 Twill / 20 mikron / LNC	22.37 [GPa/g/cm ³]
Spesifik Çekme			185.48
Dayanımı	10	200 Twill / 20 mikron / LNC	[MPa/g/cm ³]
Enerji Yoğunluğu	11	200 Twill / 120 mikron / PVC	0.003 [j/g]

Yeni numune kombinasyonlarının mekaniksel özellikleri mikro, mezo ve makro ölçekte hesaplanacak olursa numune 9 ve 11'in elastiklik modülleri sırasıyla 23,47 GPa ve 20,4 GPa olarak hesaplanmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda kullanılan ince filmlerin oluşturduğu kombinasyonlardan elde edilen elektrik depolama özelliğinden faydalanılarak 9, 10 ve 11 numaralı numunelerin kapasiteleri 1,56 nF, 1,56 nF ve 0,77 nF varsayılırsa, enerji yoğunlukları yaklaşık olarak 0,00098, 0,0018 ve 0,003 j/g olarak hesaplanır.

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Yapılan elektriksel ölçümlerde kapasite, boyut faktörü dikkate alındığında, formüle bağlı olarak yüzey alanı ile orantılı olarak lineer artmaktadır. Boyut büyüdükçe iç yapı kusurlarına bağlı olarak herhangi bir değişme gözlemlenmemektedir.



Şekil 7.1. Kapasite Lineerliği

Mekaniksel özellikler ele alındığında hesaplama ile ilgili hata oranları yaklaşık olarak %5-28 arasında değişkenlik göstermektedir. %5-20 arasında bulunan hatalar, bu tür karmaşık yapıların mekanik sonuçları için normal olsa da diğer sonuçların hata oranları yüksek çıkmıştır.

Bunların başlıca sebepleri daha önceden de tahmin edildiği gibi ince filmlerin yapışma yüzeyleridir. Yapışma enerjisi düşük olan ince filmler sisteme hem mekanik özellik hem de kapasite olarak negatif etkide bulunmaktadır.

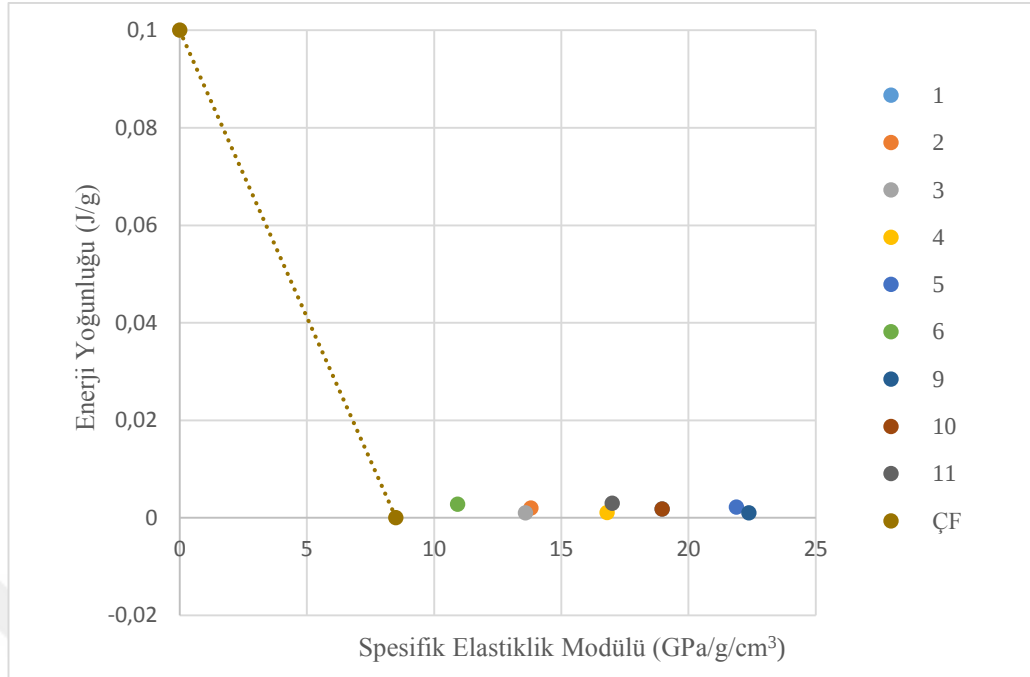
Taguchi metodu ile hesaplanan optimum numuneler ürün ağacına eklendiğinde LNC ile yapılan kombinasyonlarda mekanik olarak daha yüksek performans gösterdiği

görülmektedir. Ürün ağacında bulunan numunelerin genel özellikleri Tablo 7.1.'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Numunelerin Genel Özellikleri

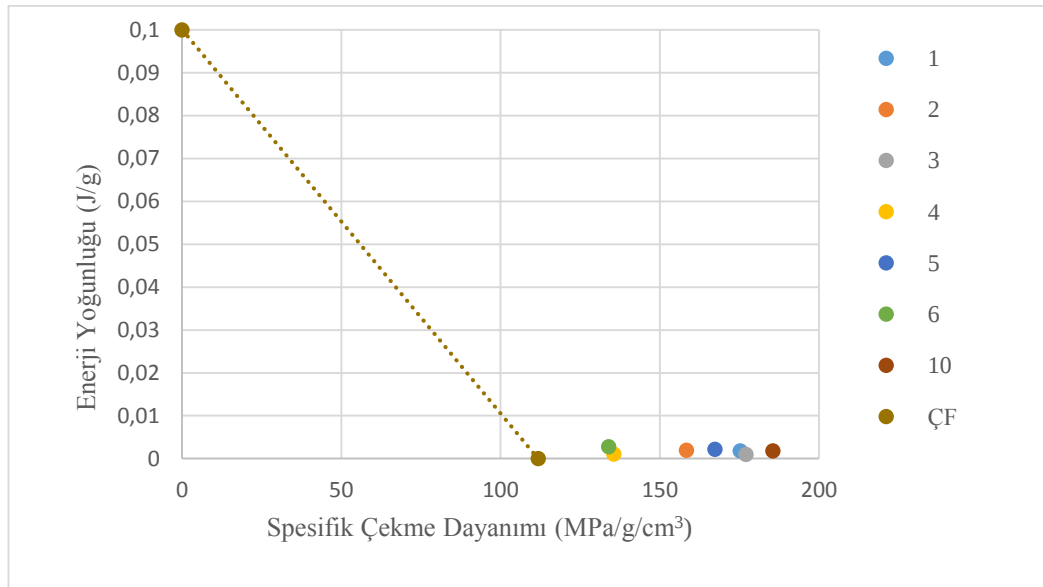
Numune	Spesifik Elastiklik Modülü	Spesifik Çekme Dayanımı	Enerji Yoğunluğu
1	18,97	175,27	0,0018
2	13,80	158,33	0,002
3	13,59	177,11	0,00098
4	16,80	135,58	0,0011
5	21,89	167,34	0,0022
6	10,93	133,93	0,0028
9	22,37	-	0,00098
10	18,97	185,48	0,0018
11	17,00	-	0,003

Malzemelerin bir plastik kapasitör (Kumar 2016) ile değiştirildiğinde çok fonksiyonluluğu Şekil 7.2.'te incelenmiştir. Buna göre çok fonksiyonluluk (ÇF) doğrusunun üstünde kalan malzemeler, bu kapasitör ile değiştirilecek yapısal kapasitörün yerine kullanılabilirken, sisteme de çok fonksiyonluluk katarlar. Ağırlık başına düşen enerji depolama özellikleri ve ağırlık başına düşen elastiklik özellikleri, plastik bir kapasitöre göre daha iyidir.



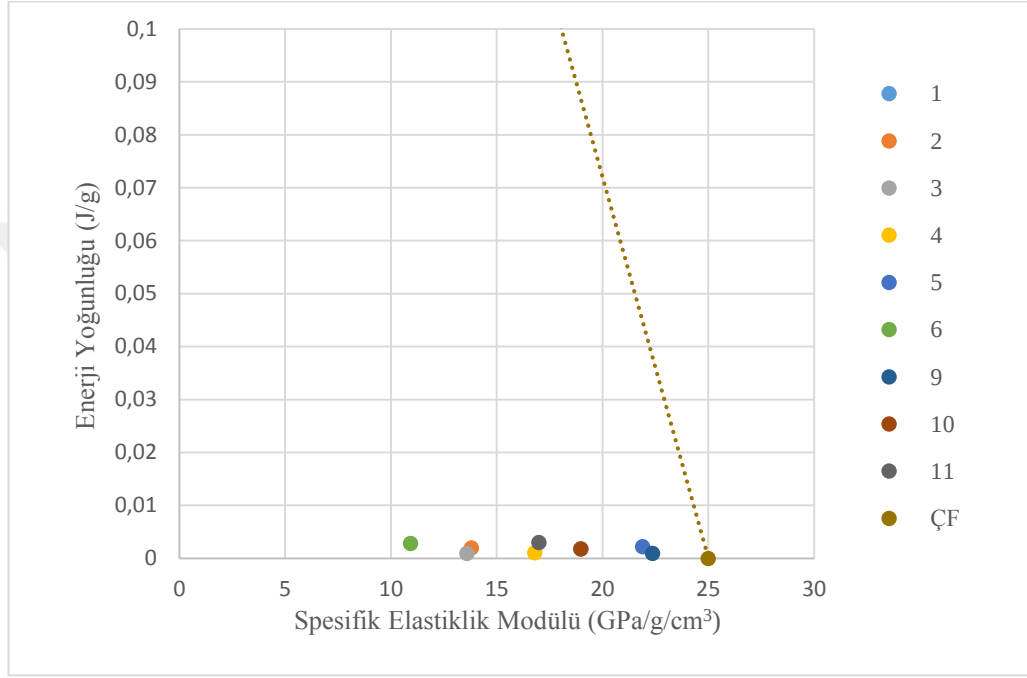
Şekil 7.2. Plastik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Elastiklik Modülüne Göre Karşılaştırılması

Çok fonksiyonluluğa bağlı spesifik çekme dayanımı ele alındığında Şekil 7.3.'te kullanılan malzeme kompozisyonlarının enerji depolama ve spesifik çekme dayanımı gösterilmektedir. Enerji yoğunluğu açısından düşük kalsa da numunelerin hepsi plastik kapasitör yerine geçecek çok fonksiyonlu yapısal kapasitör kullanılabilir.



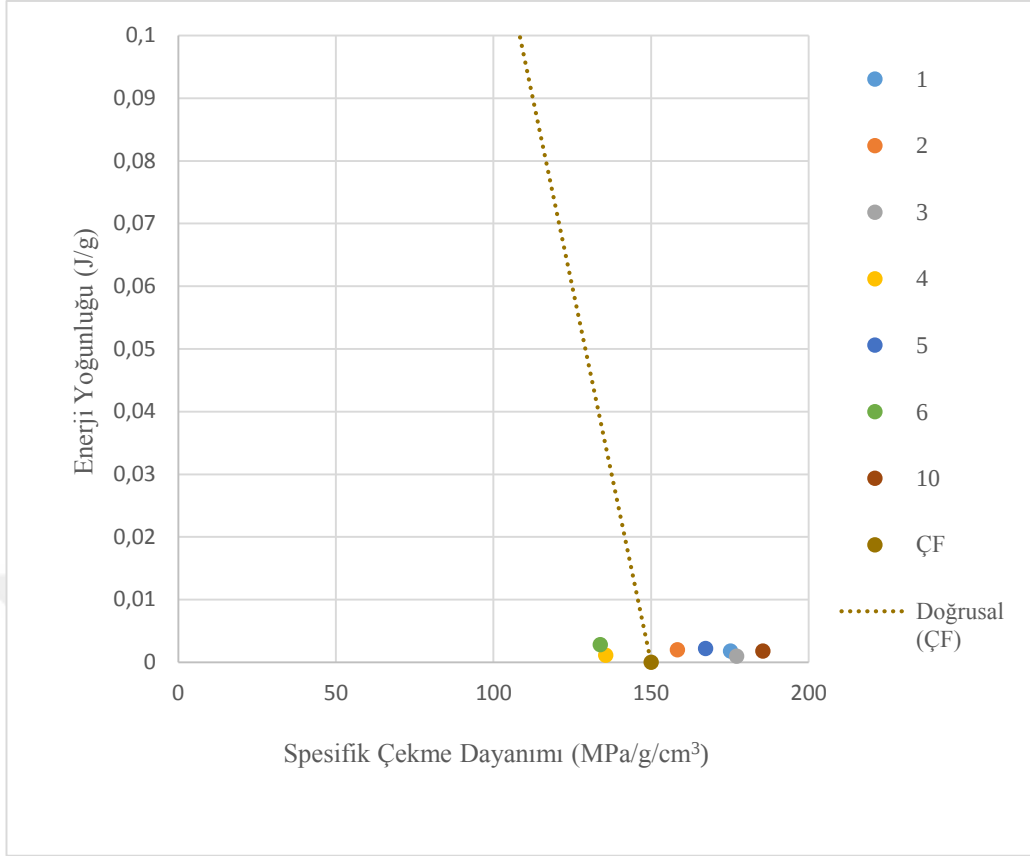
Şekil 7.3. Plastik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Çekme Dayanımına Göre Karşılaştırılması

Alüminyum elektrolitli kapasitöre göre incelendiğinde enerji yoğunluğu / spesifik elastiklik modülü grafiğinde bütün numuneler için çok fonksiyonluluk doğrusunun altında kalmıştır. Bu nedenle alüminyum elektrolitli kapasitörler için bu yapısal kapasitörlerin hiç birisi kullanılamamaktadır. Elastiklik özelliğe bağlı ağırlıktan kazanç ve enerji depolama özelliği bu malzemeler için geçerli değildir.



Şekil 7.4. Alüminyum Elektrolitik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Elastiklik Modülüne Göre Karşılaştırılması

Spesifik elastiklik modülü yerine spesifik çekme dayanımının ön planda olduğu bir sistem kullanılacak olursa 4 ve 6 numaralı numuneler haricinde geri kalan tüm numuneler ile oluşturulan bir yapısal kapasitör hem mekanik hem de elektriksel katkı ön planda tutularak kullanılabilir. Şekil 7.5.'te görüldüğü üzere çok fonksiyonluluk çizgisi altında kalan iki adet numune vardır ve bunlar kullanılamazlar.



Şekil 7.5. Alüminyum Elektrolitik Kapasitöre Göre Çok Fonksiyonluluğun Spesifik Çekme Dayanımına Göre Karşılaştırılması

Yapılan çalışmalarda 200 gr/m^2 2x2 Twill kumaşın oluşturduğu kombinasyonlarda bariz olarak görülmektedir ki yüksek dayanım elde edilmektedir. Twill örgü tipinin plain örgü tipine göre daha stabil bir kumaş türü olduğu zaten çalışmanın başlarında anlatılmıştır ve bilinmektedir. Bununla birlikte 20 mikrometre LNC ince filminin oluşturduğu kombinasyonlarda – özellikle twill örgü tipi ile – mukavemete katkısı azımsanamayacak derece iyi olduğu görülmektedir. Fakat enerji yoğunluğu açısından düşünülecek olursa 120 mikrometre PVC daha yüksek kapasite sağlamaktadır. Yalıtkanlık dayanımı diğer ince filmlere göre daha yüksek olması, bu film ile yapılacak kombinasyonlara daha yüksek voltajlarda yükleme yapılabilecek olması bunun en büyük sebebidir.

Yapılan bu çalışmada unutulmamalıdır ki, ince film ile karbon fiber yüzey arasında epoksi birikmesi ihmal edilmiştir. Bunun sebebi, bu birikmenin ölçümünün zorluğudur. Bu birikme yapısal kapasitörün yalıtkanlık dayanımını daha çok

arttıracaktır ve daha fazla elektrik ile yüklenmesini sağlayacaktır. Bu durum, yapısal kapasitörün kapasitesini ve doğal olarak ta enerji yoğunluğunu arttıracaktır.

Deneyin sonucunun daha iyi anlaşılması için bir örnek vermek daha makul olacaktır: 5 numaralı numuneyi ele alırsak ve bir bisiklet kadrosu imal etmek için yaklaşık olarak 3 m^2 bu malzemeden kullanırsak, bize sağlayacağı enerji miktarı yaklaşık 13,5 joule civarı olacaktır. Bu bisikletin aydınlatmasını ya da sinyal/stop lambalarını bir led vasıtası ile yapılması düşünüldüğünde 3 V ve 0.02 mA ile çalışan bir ledin çalışması için bu lede 0,02 watt elektrik gücü sağlanmalıdır. Bu şekilde üretilen bir bisiklette ledin aydınlatma süresi yaklaşık olarak 11,5 dakikadır ve ekstra olarak herhangi bir batarya, pil vb. ağırlığa ihtiyaç duyulmamıştır. Kapasitörlerin hızlı dolma ve hızlı boşalma özelliği unutulmamalıdır. Bu nedenle yapısal kapasitörlerin çıkışlarına bunu düzenleyecek regülatör devreler konulmalıdır.

Daha önceki çalışmalarda kullanılan önceden ısıtılmış karbon fiberin otoklav ile üretimi metodu kullanılmıştır. Günümüzde önceden ısıtılmış karbon fiberin metre kare fiyatı 30 Euro fiyatlarındayken, bu çalışmada kullanılan karbon fiber ve epoksi fiyatı metrekare başına yaklaşık olarak 16 Euro civarındadır. Burada neredeyse hammadde fiyatlarında yarı yarıya bir farktan söz edilmektedir. Aynı zamanda otoklav ile üretim yöntemi ön yatırım maliyeti vakum paketleme yöntemine nazaran oldukça astronomik rakamlardadır. Bu, çok işlevli malzemeye üçüncü bir parametre olarak maliyet ve üretilirlik etkisini de katmaktadır. Bu nedenle üçüncü birçok işlev parametresi olarak üretim ve malzeme maliyeti de her bir metrekare ve her bir ürün adeti başına incelenmelidir. Enerji yoğunluğu/kg maliyeti, spesifik elastiklik modülü/kg maliyeti gibi teknik faktörlere bağlı olarak değişimler de bu incelemelere dahil edilebilir.

İlerleyen çalışmalarda yapısal kapasitörlerin ısı, nem, gerilmeler altındayken davranışları ve çalışma sıcaklık aralıkları incelenmelidir. Reçine ile güçlendirilmiş karbon fiber plakalar basma gerilmelerine maruz kaldığında burkularak kendini oluşturan laminalara ayrılmaya eğilimlidirler. Bu nedenle bu ayrılmalar gözlemlenme söz konusu olabilir. Dahası, yeterli deney ve simülasyonlar uygulanarak alınan veriler

doğrultusunda bir sistemde parça olarak çalışabilecek yapısal kapasitör yapay sinir ağıları ile öngörülebilir.

Bunların yanı sıra kilogram başına uzaya malzeme gönderme maliyetinin 20.000 Euro olduğu göz önünde bulundurulursa, yapısal kapasitörlerin enerji depolama özelliği arttığında önemi ilerleyen zamanlarda daha da belirginleşecektir.



KAYNAKLAR

- Afshari M, Sikkema DJ, Lee K, Bogle M (2008) High performance fibers based on rigid and flexible polymers. Polym Rev 48(2):230.
- Akın A., Kompozit Malzemeler ve Mekanığı Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, 2005, Natural Fibers, Biopolymers, and biocomposites International Standard Book Number-10: 0-8493-1741-X.
- Andrianopoulos N.P., Dernikas I.T., 2013, An attempt to separate elastic strain energy density of linear elastic anisotropic materials based on strains considerations, Acta Mech 2013; 224: 1879–1885.
- Autar K. Kaw, 2006, Composite Material Mechanics.
- BUTEKOM - Uludağ Tekstil İhracatçıları Birliği, 2012, Teknik Tekstil Frankfurt Fuarı Teknolojik Değerlendirme Raporu, T.C. Ekonomi Bakanlığı Uludağ İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği, Bursa, 31-34.
- Chang WP, 1996, Newsletter: Preparation of high modulus of carbon fibers. New Carbon Mater 11(11):19.
- Chung DDL, Wang S, 1999, Carbon fiber polymer-matrix structural composite as a semiconductor and concept of optoelectronic and electric devices made from it. Smart Materials and Structures 1999;8:161-166.
- D. J. O'Brien, D. M. Baechle and E. D. Wetzel, 2001, Design and performance of multifunctional structural composite capacitors, Journal of Composite Materials 45(26) 2797–2809.
- Deran T., Ahmet Y., 2016, Enerji depolama sistemlerinin araştırılması ve analizi, AKU J. Sci. Eng.16, 113-121.
- Hasan Basri ÖNGEL , 2001, Gelişim Sürecinde Erken İç Asya Türk Okçuluğu / Middle Asia Turkish Archery in Early Period of Development Process - G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi Cilt 21, Sayı 2 (2001) 189-215.
- https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584728main_Wings-ch4b-pgs182-199.pdf
Erişim Tarihi: 15.12.2017.

- Huggins R. A. 2010. Energy Storage. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, USA.
- Kedar K., Marco S., Zdenek P.B., 2015, Microplane triad model for simple and accurate prediction of orthotropic elastic constants of woven fabric composites, *Journal of Composite Materials*, 0(0) 1–14.
- Kocaman B. 2013. Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu, 26–27 Nisan 2013, Ankara.
- Kumar S. 2016, Atomic Batteries: Energy from Radioactivity. *J. Nucl Ene Sci Power Generat Technology* 10.4172/2325-9809.1000144.
- L. F. Cabeza, I. Martorell , L. Miró, A. I. Fernández, C. 2015, Introduction to thermal energy storage (TES) systems, Barreneche Universitat de Lleida, *Advances in Thermal Energy Storage Systems Methods and Applications Woodhead Publishing Series in Energy* 1-28.
- Landry M., Gagnon Y. (2015). Energy Storage: Technology Applications and Policy Options, *Energy Procedia* 79 (2015) 315 – 320.
- Luo X, Chung DDL, 2001, Carbon-fiber/polymer-matrix compositors as capacitors. *Composite Science and Technology*, 2001;61:885-888.
- Michael F. Ashby, 2005, Third Edition Material Selection in Mechanical Design 5-51
- Michaela T., 2015, Inorganic Binders Study Materials, VŠB - Technical University of Ostrava Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Ostavra.
- Miroslava Klárová, 2015 Ostrava, Technicka Univerzita, Composite Materials Study Support Course/textbook, 1-43.
- Morrel R., 2004, Comprehensive Composite Materials: Vol 4 National Physical Laboratory, Teddington.
- Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER, 2014, Seramik Matrisli Kompozitler Ders Notları, İstanbul, 1-36.
- Qiu, J.; Molenaar, A.A.A.; van de Ven, M.F.C.; Wu, S.; Yu, J. 2012a, Investigation of self healing behaviors of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup. *Mater. Struct.* 2012, 45, 777–791.
- Qiu, J.; van de Ven, M.F.C.; Wu, S.; Yu, J.; Molenaar, 2012b, A.A.A. Evaluating self healing capability of bituminous mastics. *Exp. Mech.* 2012, 52, 1163–1171.
- Rana, Sohel, Ralul, Fanguero, 2016, Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Springer.
- Ru-Min Wang, Shui-Rong Zheng and Ya-Ping Zheng, 2011, Polymer matrix composites and technology, Woodhead Publishing, Cambridge.

- Shi Y, Cha QF, Liu L, 1995, Melt spinning of Y-shaped pitch-based carbon fiber. *New Carbon Mater* 10(3):33.
- Sorana D.B., Lorentz J., 2007, Design of Experiments: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 15, *Entropy* 2007, 9(4), 198-232.
- Şirvancı M., 1996 Kalite için Deney Tasarımı “Taguchi Yaklaşımı”, Literatür Yayıncılık, Milwaukee ABD, s.112.
- Tony Carlson, 2013, Multifunctional Composite Materials Design, Manufacture and Experimental Characterisation, Luleå University of Technology üniversitesi, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Division of Materials Science, Doktora Tezi.
- Trefilov V. I., 1995, Ceramic- and Carbon-matrix Composites, Chapman & Hall, Londra, Section 2.
- Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Shang, 2006, Composite Materials Engineering – Volume 1 Fundamentals of Composite Materials.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan Bartuğ Kurukaya, 17.12.1991 İstanbul doğumlu. İlk ve orta okul eğitimini Büyük Reşitpaşa İ.Ö.O'da ve lise eğitimini Yedikule Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü 2015 Ocak ayında bitirdi. Akabinde aynı senenin şubat ayında yüksek lisansa başladı. Stajını MKEK'de yaptı. 3BHub şirketinde 3D yazıcılar üzerine 1 sene çalıştı. Profen İletişim Teknolojileri şirketinde yaklaşık 4 sene Ar-Ge merkezinde Mekanik Tasarım Uzmanı olarak çalıştı.