



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

**SiO₂ KATKILI EPOKSİ MALZEMESİNİN ÇEKME DAYANIMININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET KERİM ERARSLAN

TEMMUZ

**MUHAMMET KERİM
ERARSLAN**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

TEMMUZ 2023

**SiO₂ KATKILI EPOKSİ MALZEMESİNİN ÇEKME DAYANIMININ
İNCELENMESİ**

Muhammet Kerim ERARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Doç. Dr. Levent SEMİZ

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

..... tarafından hazırlanan “.....
.....” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri
tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Amasya Üniversitesi
..... Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak
kabul edilmiştir.

Danışman: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: .../.../...

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

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)

(Adı Soyadı)

(Tarih)

SiO₂ KATKILI EPOKSİ MALZEMENİN ÇEKME DAYANIMININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammet Kerim ERARSLAN

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Bu çalışmada saf epoksi malzemesi ile katkılanmış epoksi malzemesi arasındaki mukavemet farklılıkları incelendi. Kompozit malzemelerin giderek yaygınlaştığı bu günlerde daha çok takviye olarak kullanılan epoksi malzemesinin katkılanarak daha da mukavemetli bir hal alması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda ilk olarak özel bir firmadan satın alınan epoksi ve sertleştirici malzemesi sırasıyla 1/1 – 1,5/1 – 2/1 – 2,5/1 – 3/1 oranlarında standart hacimlerde dökümü yapılarak çekme testine sokulmuştur. Daha sonra katkı malzemesi olarak 80 nanometre boyutunda ve 5-20 nanometre boyutlarında farklı yüzdelerde silika tanecikleri kullanılmıştır. Katkılama işleminin homojen bir biçimde gerçekleştirilmesi için manyetik karıştırıcı ve sonikatör makineleri kullanılmıştır. Katkılı malzemelerin çekme testleri de yapılarak çekme dayanımları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak optimum epoksi/sertleştirici oranı olarak 2/1 oranı belirlenmiştir. Katkılı epoksilerde ise katkı boyutu küçüldükçe mukavemet artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca optimum katkı oranı da yüzde 0,5 olarak belirlenmiştir.

Sayfa Adedi : 52
Anahtar Kelimeler : Epoksi, silisyum dioksit, çekme testi
Danışman : Doç. Dr. Levent SEMİZ

INVESTIGATION OF THE TENSILE STRENGTH OF SiO₂ DOPED EPOXY
MATERIAL
(M. Sc. Thesis)

Muhammet Kerim ERARSLAN

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
July 2023

ABSTRACT

In this study, the strength differences between pure epoxy material and doped epoxy material were investigated. It is aimed that the epoxy material, which is mostly used as a reinforcement, is added to become more durable these days when composite materials are becoming more and more widespread. In this direction, the epoxy and hardener material purchased from a private company was first put into the tensile test by casting in standard volumes at the ratios of 1/1 – 1.5/1 – 2/1, 2.5/1 – 3/1, respectively. Then, silica particles in 80 nanometer size and 5-20 nanometer size in different percentages were used as additive material. Magnetic stirrer and sonicator machines were used to perform the doping process homogeneously. The tensile strengths of the additives were also examined and compared by performing tensile tests. As a result, 2/1 ratio was determined as the optimum epoxy/hardener ratio. In epoxies with additives, an increase in strength was observed as the size of the additive decreased. In addition, the optimum contribution rate was determined as 0.5 percent.

PageNumber : 52
KeyWords : Epoxy, silicon dioxide, tensile test
Supervisor : Doç. Dr. Levent SEMİZ

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde benden yardımın esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Levent Semiz ve aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kompozitler.....	1
1.1.1. Matriks türüne göre kompozitler	2
1.1.2. Takviye türüne göre kompozitler.....	19
2. MATERYAL VE METOT	27
2.1. Materyaller	27
2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Metot.....	28
2.2.1. Kalıpların hazırlanması	28
2.2.2. Numunelerin hazırlanması	31
2.2.3. Çekme testleri.....	34
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	36
3.1. Epoksi Sertleştirici Oranının Bulunması	36
3.1.1. 1/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu	36
3.1.2. 1,5/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu	37

Sayfa

3.1.3. 2/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu	38
3.1.4. 2,5/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu	39
3.2. Kütlece Yüzde Farklı Miktarlarda ve Boyutlarda Silisyum Dioksit Katkılanmış Epoksilerin Çekme Testi Sonuçları	40
3.2.1. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	40
3.2.2. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	41
3.2.3. Kütlece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	41
3.2.4. Kütlece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	43
3.2.5. Kütlece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	44
3.2.6. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	46
3.2.7. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	47
3.2.8. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi	48
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. İki bileşenli kompozit malzemelerin olası birleşimleri	2
Çizelge 1.2. Metal alaşımları ve elyaf takviyeli plastiklerin tipik özelliklerinin karşılaştırılması.....	6
Çizelge 1.3. Epoksi reçine türlerinin genel özelliklerinin kıyaslanması.....	14
Çizelge 1.4. Kompozit ürünlerin üretim süreçleri.....	16
Çizelge 1.5. Epoksi reçinenin dünya pazarlarında değere göre karşılaştırılması.....	17
Çizelge 1.6. Karbon elyafının çapı ve çekme dayanımı arasındaki ilişkisi.....	23
Çizelge 2.7. Optimum Epoksi/Sertleştirici oranını hesaplamak için hazırlanacak numunelerin Ep/Se oranları.....	30
Çizelge 2.8. Silisyum dioksit taneciklerinin kütlece yüzdesi ve katkılanma ağırlıkları.....	31
Çizelge 3.9. 1/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu.....	34
Çizelge 3.10. 1,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu.....	35
Çizelge 3.11. 2/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu.....	36
Çizelge 3.12. 2,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu.....	37
Çizelge 3.13. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	39
Çizelge 3.14. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	40
Çizelge 3.15. Kütlece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	41
Çizelge 3.16. Kütlece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	42
Çizelge 3.17. Kütlece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	43
Çizelge 3.18. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	44

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.19. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	45
Çizelge 3.20. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu.....	46
Çizelge 3.21. 80 nm SiO ₂ Katkılı Epoksi Malzemelerinin Gerilme/Uzama Grafiği.....	47
Çizelge 3.22. 5-20 nm SiO ₂ Katkılı Epoksi Malzemelerinin Gerilme/Uzama Grafiği	47



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. Sıvı halde işleme yöntemi ile metal matriksli kompozit imalat metotları şematik gösterimi.....	4
Şekil 2. Bisfenol A'nın diglisidil eteri (BADGE), epoksi reçinenin moleküler yapısı.....	11
Şekil 3. Takviye türüne göre kompozitlerin temsili görsel anlatımı.....	18
Şekil 4. Tanecik kümelenme şekilleri; a birinci tip, b ikinci tip kümelenme şeklidir.....	24

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Güçlendirilmemiş Al alaşımı (alt) ve fiber (alümina + karbon) ile güçlendirilmiş (üst) bölümleri gösteren silindir gömleğinin mikro yapısı.....	3
Resim 1.2. Silisyum karbür matrikste Nextel 312 seramik fiberlerden oluşan mum tipi bir filtre.....	5
Resim 1.3. Elyaf sarma metodu ile üretilen karbon fiber (elyaf) takviyeli epoksi reçineden elde edilmiş bir boru.....	7
Resim 1.4. Pleksiglas malzeme.....	8
Resim 1.5. Rüzgâr türbini bıçağında kullanılan fiberglas ve reçine.....	15
Resim 1.6. Filament sarma metodu ve üretilmekte olan fiber takviyeli epoksi reçine boru.....	17
Resim 1.7. Lamine karbon fiber malzeme.....	19
Resim 1.8. Kutu kiriş karbon fiber malzeme.....	20
Resim 2.9. Kalıp cidarlarının kesim aşaması.....	28
Resim 2.10. Yarıısı bant ile kaplanmış kısa kenar cidarı örneği.....	29
Resim 2.11. Kalıbı oluşturan ana bileşenler, a: pleksiglas altlık, b: sunta cidar, c: bant, d: yapıştırıcı.....	29
Resim 2.12. Verilen Ep/Se oranları ile hazırlanmış saf epoksi numuneleri.....	30
Resim 2.13. Kütlece yüzde 4, 2, 1 ve 0,5 miktarında 80 nm boyutlarındaki silisyum dioksit tanecikleri ile katkılanmış epoksi (Ep/Se = 2/1) numunelerinin dökümü.....	31
Resim 2.14. Çekme testi makinesi.....	33
Resim 3.15. 1/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	34
Resim 3.16. 1,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	35
Resim 3.17. 2/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	36

Resim	Sayfa
Resim 3.18. 2,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	37
Resim 3.19. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	38
Resim 3.20. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	39
Resim 3.21. Kütlece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	40
Resim 3.22. Kütlece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	41
Resim 3.23. Kütlece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	42
Resim 3.24. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	43
Resim 3.25. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	44
Resim 3.26. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
m	Metre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre (metrenin milyonda biri)
nm	Nanometre (metrenin milyarda biri)
Rpm	Bir dakikadaki devir sayısı
MPa	Basınç birimi (paskalın 1 milyon katı)
GPa	Basınç birimi (paskalın 1 milyar katı)
gr/cm^3	Özgül ağırlık (gram bölü santimetre küp)
%	Yüzde
N/mm^2	Gerilme (Newton bölü milimetre kare)
Kısaltmalar	Açıklama
Al	Alüminyum
SiC	Silisyum Karbür
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
PVC	Polivinil Klorür
BPA	Bisfenol A
BADGE	Bisfenol A'nın diglisidil eteri
SiO_2	Silisyum di Oksit (silika)

Ep/Se

Epoksi/Sertleştirici



1. GİRİŞ

1.1 Kompozitler

Malzemelerin saf metallere kompozitlere geçişi, modern ürünlerin beklentilerini karşılamak için saf metallerin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Modern çağda, kompozit malzemeler imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yüksek özgül mukavemet, güçlü sönümleme kapasitesi ve yüksek özgül modül gibi gelecek vaat eden özellikleri nedeniyle geleneksel malzemelerin yerini büyük ölçüde almıştır. Kompozit malzemeler, özel özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenden oluşan çok fazlı malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Takviye ve matriks, herhangi bir kompozit malzemenin iki farklı bileşenidir. Takviye, kompozit ana bileşenidir ve kompozit malzemeye uygulanan yükün çoğunu alan kısımdır. Takviyenin yükü alması gerektiğinden sert, kırılman ve yüksek dayanıma sahip olmalıdır. Matriks, takviyeyi çevreleyen kompozit bileşenidir. Sadece takviyeyi korur ve destekler. Takviye ve matrikslerin türünü donatının düzeni, dağılımı ve hacmi ayrıca kompozitlerin üretim yöntemi gibi kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Kompozit malzemeler, takviye şekline ve matriks türüne göre farklı kategorilere ayrılır (Jojibabu, Zhang, ve Prusty, 2020). Çizelge 1’ de bu gruplandırmaların sonucunda elde edilebilecek kompozitlere bazı örnekler verilmiştir.

Kompozit malzemeler matriks tipine göre: (1) metal matriksli kompozitler, (2) seramik matriksli kompozitler, (3) polimer matriksli kompozitler olarak sınıflandırılır. Polimer kompozitte en yaygın kullanılan matriks, düşük büzülme, düşük toksisite, iyi yapışma özellikleri ve yüksek endüstri uygulamaları gibi umut verici özellikleri nedeniyle epoksi reçinedir (Omar Faruk, Andrzej, Bledzki, Fink and Sain, 2012). En yaygın kullanılan fiber; yüksek mukavemet, hafiflik, su direnci, kimyasal direnç, yüksek dayanıklılık, elektrik direnci, yangın direnci ve korozyon direnci gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Kompozitin bileşenleri kütleli, hacimsel ya da öz kütleli olarak farklı oranlarda belirlenebilmektedir. Bu oranlar kompozitlerin özelliklerini belirleyen etkenlerin başında gelir. Günümüzde malzeme bilimi ve mühendisliğinde epoksi reçinelerini güçlendirmek için farklı nano dolguların kullanılmasının ve bu dolguların oranlarının doğru belirlenmesi

epoksinin sertliğini ve mukavemetini artırabileceğinin bulunduğu önemli araştırma alanlarından biridir (Jojibabu ve diğerleri, 2020).

Çizelge 1. İki bileşenli kompozit malzemelerin olası birleşimleri (Groover, 2019).

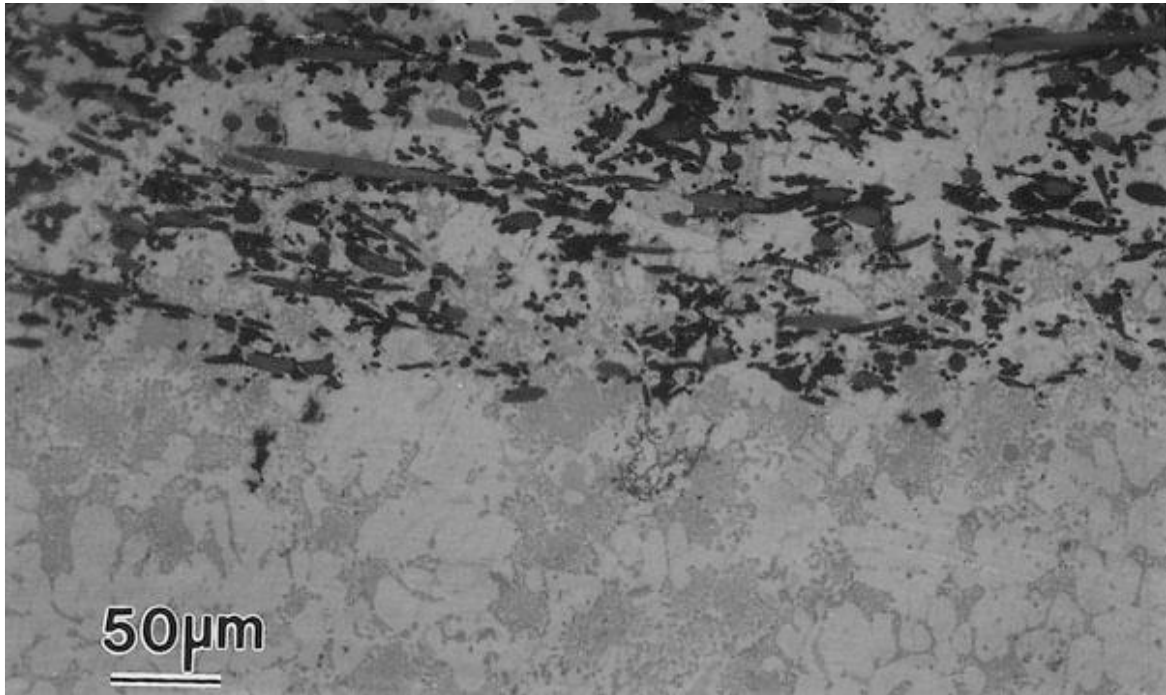
Takviye Türü	Matriks Türü		
	Metal Matriks	Seramik Matriks	Polimer Matriks
Metal Takviye	İkinci bir metalle süzölmüş toz metal parçacıklar		Çelik telli radyal lastikler, plastik kalıplama bileşimleri
Seramik Takviye	Alümina elyaf takviyeli intermetalik matriks kompozitler	SiC kılta takviyeli Al ₂ O ₃	Cam takviyeli bileşikler, plastik kalıplama bileşimleri
Polimer Takviye	Toz metal parça emdirilmiş polimer		Kevlar'la takviyeli Epoksi, plastik kalıplama bileşimleri
Element Takviye	Elyaf takviyeli metaller		Karbon siyahı kauçuk, fiberle takviyeli plastik

1.1.1. Matriks türüne göre kompozitler

Metal matriksli kompozitler

Metaller, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği olan, şekillendirmeye yatkın, teknolojik ve ticari önemi yüksek elementlerdir. Çelik, alüminyum, magnezyum, dökme demir, titanyum, çinko, nikel, bakır ve diğer çoğu metal ve alaşımları nispeten yüksek dayanım, rijitlik, darbe direnci ve şekillendirilebilirliğe sahiptirler. Bu malzemeler genellikle yapı ve yük taşıma uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. Saf metaller nadiren kullanılmakla beraber alaşım adı verilen metal kombinasyonları arzu edilen belirli bir özelliği iyileştirmek için tasarlanabilir (Groover, 2019). Metal matriksli kompozitler üç çeşittir; parçacık takviyeli, kısa elyaf takviyeli (ince kristal yapılı filament takviyeli), sürekli fiber takviyeli (plaka takviyeli). Uzay uygulamalarında mukavemet ön plandadır fakat hem mukavemet değerlerini azaltmadan hem de maliyeti azaltarak dengeli bir imalat gerçekleştirmek çok önemli bir süreçtir (Weissenbek, Bohm, Rammerstorfer, 1994).

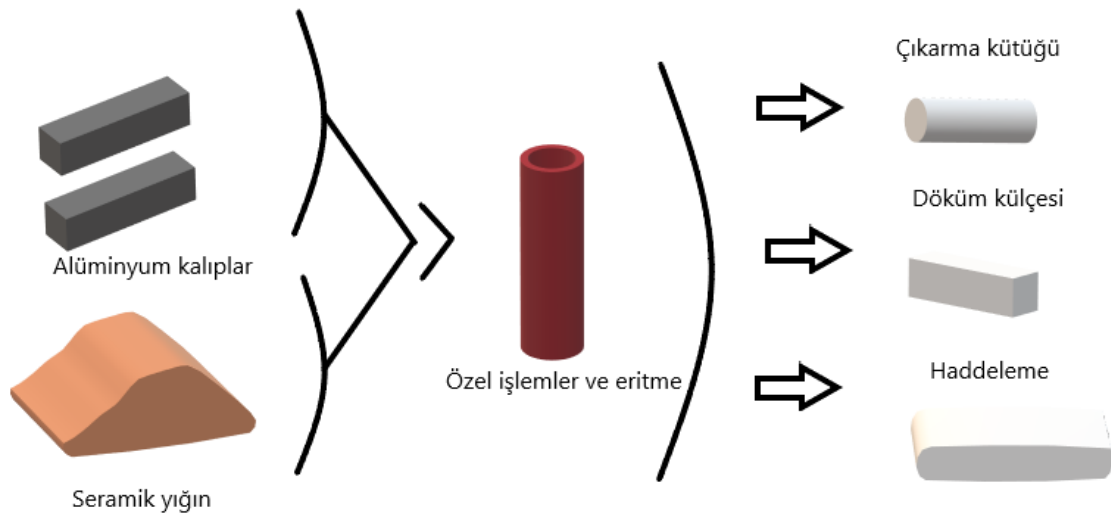
Kısacası maliyet ve performans önemlidir, bu yüzden seçilen matriks metali ile takviye malzemesinin optimum bir kombinasyonu gereklidir. Bu nedenlerden dolayı metal matriksli kompozitler bu alanda önemli bir yer kaplamaktadır. Metal matriksli kompozitlerin en büyük ticari uygulaması filamentli süper iletken kompozitlerdir. Metal matriksli kompozitlerin otomotiv alanında da birçok kullanım örnekleri bulunmaktadır. Metal matriksli kompozitler, elektronik paketlenme sistemlerinin gereksinimlerini karşılamak için optimum termal ve fiziksel özelliklere sahip olacak şekilde uyarlanabilir. Resim 1'deki mikroskobik görüntüde görüldüğü gibi Honda Motor Co'nun Prelude modelinde silindir gömlekleri için bir alüminyum alaşım matriksinde karbon-alümina fiber takviyeli kompozit kullanılmıştır (Chawla, 2012).



Resim 1. Güçlendirilmemiş Al alaşımı (alt) ve fiber (alümina + karbon) ile güçlendirilmiş (üst) bölümleri gösteren silindir gömleğinin mikro yapısı (Chawla, 2012).

Metal matriksli kompozitlerin imalatı için birden çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en önemlileri sıvı halde (Şekil 1'de şematik gösterimi olan) ve katı halde işleme yöntemleridir. Bazı işlemlerde ise yerinde biriktirme tekniği ya da güçlendirme tekniği kullanılmaktadır. İntermetalik bileşikler (iki saf metalin birleşimi esnasında arada oluşan fazdır), bakır, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları gibi birçok metalik yapı kompozit yapıyı oluşturmak için kullanılabilir.

Tabi ki bu elementlerin erime noktaları ve donma noktaları farklı olduğu için kompozit oluşturma işlemi farklı koşullarda gerçekleştirilmektedir. Nispeten titanyum metalinin erime noktası diğerlerinden yüksektir (1672 °C). Kompozit oluşturma işleminden önce alaşım oluşumu veya saf metallerin birçok özelliği göz önünde bulundurulmaktadır. Örneğin alüminyum (birincil malzeme), lityum (ikincil malzeme) alaşımının elastikiyet modülünü arttırmasının yanı sıra yoğunluğu azaltma özelliği bulunmaktadır.



Şekil 1. Sıvı halde işleme yöntemi ile metal matriksli kompozit imalat metotları şematik gösterimi.

Seramik matriksli kompozitler

Seramik malzeme, bir metal ve bir ya da daha fazla metal olmayan elementten oluşan inorganik bir bileşiktir. Mühendislik malzemesi olarak önemi doğada bolca bulunmalarından, fiziksel ve mekanik özelliklerinin metallerden oldukça farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Cam, porselen, briket, yalıtkanlar ve aşındırıcılar gibi seramikler zayıf elektrik ve ısı iletkenliklerine sahiptirler. Seramikler iyi dayanım ve sertliğe sahip olmalarına karşın süneklikleri, şekillendirilebilirlikleri ve darbe dayanımları zayıftır. Bu yüzden seramikler, yapı ve yük taşıma uygulamalarında metallerden daha az kullanılırlar. Buna karşın çoğu seramik korozyif şartlara ve yüksek sıcaklıklara karşı ciddi bir dirence ve alışılmışın dışında arzu edilen elektrik optik ve ısıl özelliklere sahiptirler. Seramik matriksli kompozitler, uçaklar, helikopterler, füzeler gibi havacılık araçlarında iyileştirmeler sağlayabilir. Aşınma direnci, termal şok direnci, termal iletkenlik gibi

özellikleri nedeniyle seramik matrisli kompozit uygulamalarının önemli bir alanı da kesici takım uçlarıdır, (Prewo, 1986).

Seramik kompozitlerin bir diğer kullanım alanı da filtrelerdir ve yine sıcaklık değişimini engelleyebilme özelliği nedeni ile Resim 2'deki gibi tercih edilmektedir. Son olarak, seramik matrisli kompozitlerin ısı motorlarında, enerji dönüşüm makinalarında, özel elektrik-elektronik uygulamalarında ve askeri sistemlerde uygulamalar bulunabilir (Chawla, 2012).



Resim 2. Silisyum karbür matrikste Nextel™ 312 seramik fiberlerden oluşan mum tipi bir filtre (Chawla, 2012).

Seramik matrisli kompozitlerin birçok üretim yöntemi mevcuttur, bunlar; soğuk presleme ve sinterleme (birbirine temas eden partiküllerin ergime sıcaklıklarının $2/3$ ' ünün altındaki sıcaklıklarda birbirlerine bağlanması metodu), sıcak presleme, reaksiyonla bağlama prosesleri, sızma, yönlendirilmiş oksidasyon veya lanxide™ prosesi, yerinde kimyasal reaksiyon teknikleri, sol-jel, polimer sızma ve piroliz, elektroforetik biriktirme, kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezidir. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan yöntem soğuk presleme ve sinterleme yöntemidir. Fakat kullanım alanlarının değişimine göre yukarıda da belirtildiği gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. (Baillie, 2004).

Polimer matrisli kompozitler

Polimer, her bir molekülü birbirini tekrarlayan ve birbirine bağlı olan birimlerin oluşturduğu zincirli moleküllerden meydana gelen birleşimdir. Tarih bakımından metal ve seramiklerden çok sonra keşfedilmişlerdir. Bu genç malzeme grubu günümüzde üzerinde en çok çalışılan alan olma unvanına sahiptir. Polimerler; plastikler ve kauçuklar olarak ikiye ayrılırlar. Plastikler de kendi içinde ikiye ayrılır; bunlar termoplastikler ve termosetlerdir. Polimerler polimerizasyon (monomerlerin zincirli yapı oluşturularak birbirine bağlanması yöntemi) olarak bilinen bir işlemle, tarım veya petrol ürünlerinin organik moleküllerinden daha büyük moleküller üretilerek elde edilirler. Polimerler düşük elektrik ve ısı iletkenliği ile düşük dayanıma sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun değildirler. Bazı polimerler mükemmel süneklik, şekillendirilebilirlik ve darbe dayanımına sahip iken diğer polimerler ise zıt özelliklere sahiptirler. Korozyon dirençleri mükemmel olan polimerler oldukça da hafiftirler. Hacimsel olarak metallere göre üretimleri daha az enerji harcanarak yapılmaktadır. Bununla orantılı olarak fiyatı da uygun olmaktadır. Tüm bu özelliklerinden ötürü kompozit malzemelerin ya birincil fazı olan matris olarak ya da ikincil fazı olan takviye olarak en yaygın kullanılan malzemesi polimerlerdir (Groover, 2019; Mohanty, Misra, Drzal, 2005).

Çizelge 2. Metal alaşımları ve elyaf takviyeli plastiklerin tipik özelliklerinin karşılaştırılması (Groover, 2019).

Malzeme	Özgül Ağırlık (Ağırlık/Hacim) (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (Maksimum kuvvet/ İlk kesit alanı) (MPa)	Elastisite Modülü (Gerilme/Birim şekil değişimi) (GPa)
Düşük karbon çeliği	7.87	345	207
Alüminyum alaşımı (ısıtılmış)	2.70	415	69
Polyesterli cam elyaf	1.50	205	69

Karbon (elyaf) epoksi	1.55	1500	140
-----------------------	------	------	-----

Polimer matriksli kompozitlerde ticari olarak en önemli grup bu gruptur ve genellikle birincil faz olarak (matriks) elyaflar kullanılır. Çizelge 2’de de görüldüğü gibi malzemelerin çekme dayanımlarını özgül ağırlıklarına oranladığımız taktirde polyesterli cam elyaf malzemesi düşük karbon çeliği alaşımından 3,1 kat, karbon (elyaf) epoksi malzemesi alüminyum alaşımından 2,23 kat daha dayanıklı olduğu ortaya çıkmaktadır (Groover, 2019).

Günümüzde, Resim 3’de bir örneği verilen karbon fiber (elyaf) takviyeli polimer matriksli kompozitler en önemli yapısal kompozitlerdir. Bu kompozitin en yaygın matriksi epoksi reçinedir. Uygun şekilde yönlendirilmiş katların istiflenmesiyle yapılan polimer matriksli kompozitlerin laminantları da yüksek oranda anizotropik (maddelerin mekanik özelliklerinin yön faktörüne bağlı olarak değişiklikler gösterdiği durum) özelliklere sahip kompozitlerle sonuçlanır. Özellikle, elyaf takviyeli polimerlerin özellikleri, uzunlamasına yönde diğer yönlerden biraz daha yüksektir. Sönümleme ve yalıtkanlık özellikleri ile ön plana çıkan polimer matriksli kompozitlerin uygulama yelpazesi oldukça geniştir. Spor malzemelerinden inşaat yapılarına, havacılık endüstrisinden kimyasal proses endüstrisindeki tanklar ve kaplara (basıncılı ve basınçsız), atık boru hatlarından otomotive, askeri araç gereçler ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar. Polimerlerin özellikleri katkılanarak değiştirilebilir. Bu katkılama polimeri kompozite çevirir. Antioksidanlar, çapraz bağlayıcı etkenler, alev geciktiriciler, kayganlaştırıcılar, renklendiriciler ve dolgular önde gelen katkılardır.



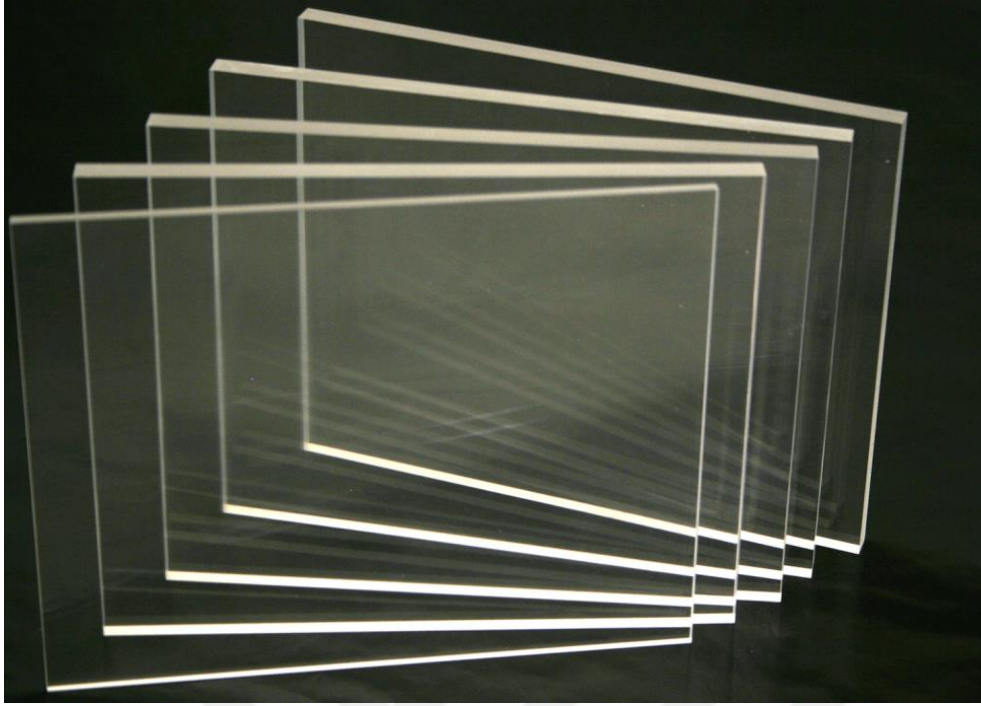
Resim 3. Elyaf sarma metodu ile üretilen karbon fiber (elyaf) takviyeli epoksi reçineden elde edilmiş bir boru (Erarslan ve diğerleri, 2017).

Termoplastik polimer matrisli kompozitler

Termoplastik polimerler oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Birkaç yüz dereceye kadar ısıtıldıklarında sıvı hale gelen malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı ekonomik anlamda büyük kolaylık sağlamaktadırlar. Termoplastik polimerlerin böyle olmasının sebebi çapraz bağlı olmayan doğrusal makromolekül yapısında olmalarıdır. Termoplastik polimerleri önemli bazı grupları akrilik, polietilen, polipropilen, polivinilklorür, polistirendir (Groover, 2019), (Oksman, 2000).

Akrilik

Akrilikler akrilik asitten türetilen polimerlerdir. Akriliklerin en önemli ürünü Resim 4’de gösterilen (bu tez çalışmasında kullanılan kalıp altlığı malzemesi) pleksiglastır. Mükemmel şeffaflık özelliğinden dolayı optik özellikleri bakımından çok iyidirler. Ayrıca mükemmel pürüzsüzlük özelliği de vardır. Stop lambaları, uçak camları, optik cihazlarda kullanımı mevcuttur.



Resim 4. Pleksiglas malzeme.

Polietilen

Günümüzde plastik malzeme grubunun en geniş kullanımına sahip termoplastik bir polimerdir. Bu ürünü çekici yapan özellikleri, kolay işlenebilirlik, kimyasal kararlılık ve maliyetinin az olmasıdır. Uygulamaları; Kablo izolasyonları, dondurulmuş gıda kapları, sıkılabilen şişeler ve levhalar vardır.

Polipropilen

Opak ve sert olan bu polimerin özgül ağırlığı düşüktür ve su da yüzer. Genellikle kalıplama için kullanılan plastiklerin başında gelir. En hafif plastiklerdir ve ağırlıklarına göre dayanımları oldukça yüksektir. Polipropilenin erime sıcaklığı ev aletleri ve otomotivde de kullanımını arttırmıştır. Kimyasallara karşı direnci de yüksek olan polipropilen sterilizasyon kaplarında da kullanılmaktadır. Aynı zamanda yanıcı da olan bu polimere kaplama ve boya yapılması zordur.

Polivinilklorür

Özellikleri katkılama ile değişebilen geniş kullanım alanına sahip bir polimerdir. PVC kapılar, pencereler, borular, oyuncaklar, zemin kaplamaları gibi uygulamaları mevcuttur. PVC polimerizasyonunda kullanılan malzemenin kansorejen etkisinden dolayı üretiminde dikkatli olunması gerekir.

Polistiren

Kolayca şekillendirilebilen, şeffaf bir polimerdir. Daha çok köpük şeklinde paketleme malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Termoset polimer matriksli kompozitler

Termoset polimerler termoplastik polimerlerin aksine tekrar eden ısı döngüsüne dayanamazlar. Başlangıçta kalıplama için ısıtıldıklarında yumuşar ve akar fakat yüksek sıcaklık nedeniyle kimyasal tepkimeye girerek tekrar eritilmeyen katılara dönüşürler. Tekrar eritilirse bozulurlar. Termoset polimerlerin örnekleri arasında epoksiler, silikonlar, fenolikler ve bazı polyesterler vardır (Groover, 2019).

Polyester

Bu malzeme hem termoplastik hem de termoset olabilir. Çoğunlukla takviyeli plastiklerde tank, boru, inşaat panelleri gibi uygulama alanlarında kullanılırlar. Kalıplama malzemesi olarak da kullanılabilen bu polimerin en önemli sınıfı alkit (alkol ve asit) reçineleridir. Alkit reçineleri boya, cila ve vernik malzemelerinin temel maddesidir.

Fenolik

Fenol reaktivitesi (yeniden reaksiyona girme özelliği) en yüksek formaldehit (organik bir bileşik) olan asidik bir bileşiktir. Kalıplamalarda kullanıldığı zaman minerallerle birleştirilirler. Ahşap tozları ve elyaf selülozlarla da kombine edildiklerinde kırılğan ve koyu renkli olurlar. Örneğin fenol fiber malzemeler tahtaya benzer yapısı ile üretildikten sonra havalı vakum pompalarında bıçak olarak kullanılabilmektedirler. Dakikada 500 devir yapabilen bu pompalar, dakikada 8500 litre hava çekme kapasitesine sahip olabilirken herhangi bir pürüzlülük olmadığı takdirde ve yeteri kadar yağlandığı takdirde (saat 0,2 litre)

sorunsuz bir şekilde devamlı çalışabilen bir malzemedir. Fakat pompa iç yüzeyinde oluşabilecek pürüzlerde bu bıçaklar zamanla yıpranır hatta kırılabilir. Aynı zamanda baskılı devre kartlarında da kullanılmaktadırlar.

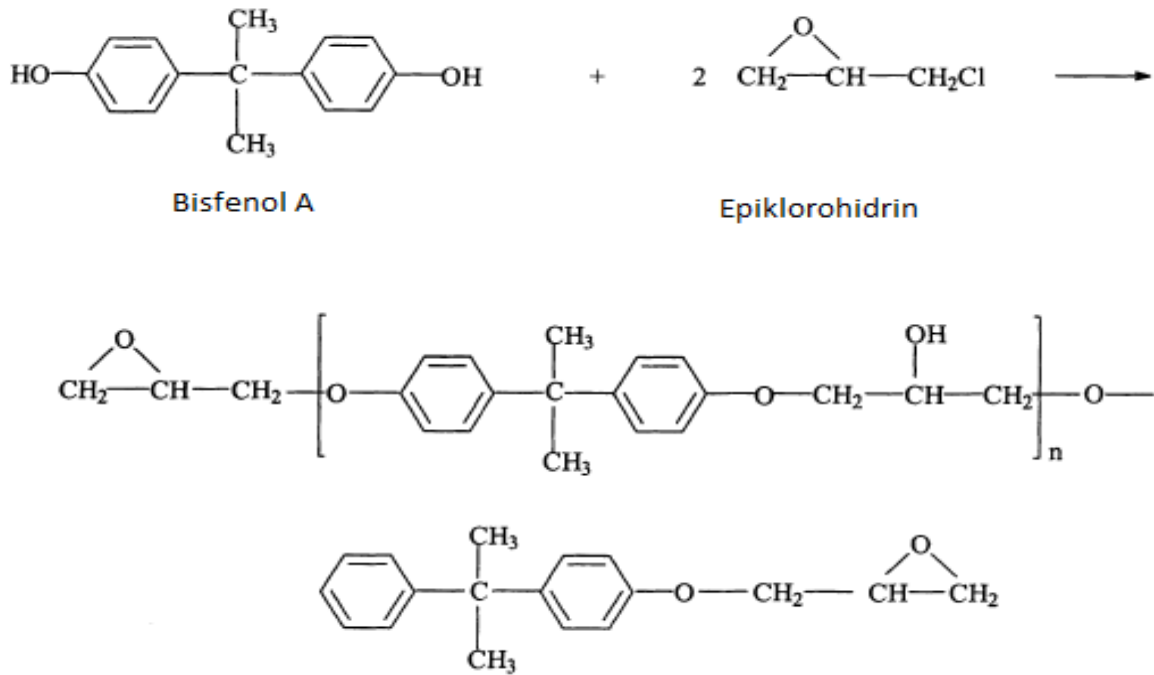
Silikonlar

Moleküler yapısı tekrar eden zincirlerden oluşur. Bu polimer inorganik veya yarı inorganiktir. Kompozisyondaki değişiklikler sonucunda 3 farklı formda üretilebilirler. (1) sıvı (2) elastomer (3) reçine. Kaplama malzemeleri, boyalar, vernikler ve baskı devre kartları içinde katmanlama amaçlı kullanılırlar.

Epoksiler

Epoksi reçineler moleküllerinde oksijen içeren epoksit grupları olarak adlandıran en az iki halkalı (kimyasal yapısında halka formundaki formüller) üç birimli halka yapısına sahip sıklık (karbon atomlarının oksijene komşu olacak şekilde oluşturduğu halkalı form) eterlerdir. Eterler genellikle reaktif (reaksiyondan ürün üretmeye yarayan bileşikler) değildir, iyi çözücülerdir ancak bu yapı eterlerin özel bir halidir ve epoksi olarak adlandırılırlar. Epoksiler eterlerin aksine çok reaktiflerdir yani neredeyse hiç kararlı değildir. (Kinloch, Shaw, Tod, Hunston, 1983).

Epiklorohidrin (en az bir klor atomu bağlı olan organik bir bileşiktir ve epoksittir) ve bisfenol A (sentetik organik bir bileşiktir, BPA olarak da bilinen bu bileşik renksizdir) bileşiklerinin reaksiyonu sonucunda ilk ticari bisfenol A diglisidil eteri yani epoksi reçine elde edilmiştir. Şekil 2’de moleküler yapısı verilmiştir.



Şekil 2. Bisfenol A'nın diglisidil eteri (BADGE), epoksi reçinenin bir örnek moleküler yapısı (Kanerva, Elsner, Wahlberg, Maibach, 2013).

Belirli bir uygulama için seçilen reçine veya reçine karışımı, istenen özellik dengesine bağlıdır. Örneğin, bromlu epoksi reçineleri yarı katıdır ve tutuşmaya karşı dirençlidir ya da bisfenol F'nin diglisidil eterine dayanan epoksi reçineleri, Bisfenol A'nın diglisidil eteri epoksi reçinelerinden daha az viskozdur ve daha iyi kimyasal direnç sergiler (Kanerva ve diğerleri, 2013).

Yüksek çapraz bağlama yoğunluğu, epoksi reçineyi, mühendislik termoplastiklerinden yaklaşık iki kat daha düşük ve metallerden üç kat daha düşük kırılma enerjisi değerlerine sahip kırılğan bir malzeme yapar. Epoksinin özellikleri çapraz bağlanma miktarına bağlıdır. Çapraz bağlayıcıların uygun stokiyometrik (kimyasal tepkimeye girip çıkan maddeler arasındaki kütle değişimi) değerlerinin hesaplanabilmesi için epoksi reçinesinin epoksi içeriğinin iyi bilinmesi gerekir. Daha düşük çapraz bağlantı yoğunluğu, bozulmadan önce daha fazla uzamaya izin vererek tokluğu artırır. Öte yandan, daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu, kimyasal saldırıya karşı geliştirilmiş bir direnç sağlar (Jojibabu ve diğerleri, 2020).

Epoksi reçinelerin ticari yağ asitleri ile esterleştirilmesi, uzun yıllardır endüstriyel kaplamalarda kullanılan, iyi bilinen bir işlemdir. Karboksilik (organik asit) asitler, polimer

zincirindeki terminal epoksi grupları veya asılı hidroksiller (oksijen ve hidrojen atomunun kovalent bağ ile bağlanması sonucu oluşur) ile esterleştirilir. (Allaoui, Bai S., Cheng, Bai J., 2002).

Başarılı bir termoset formülasyonu aynı zamanda uygun reaktivite, akış ve performansa sahip olmalıdır. Reçine özellikleri formülatörler tarafından talep edilir ve reçine üreticileri tarafından sağlanır. A-glikol içeriği ve klorür türleri ve seviyeleri gibi reçine bileşenlerinin, bazik katalizörler (üçüncül aminler) veya amin (amonyaktaki hidrojenin yerine tek değerli karbon köklerinin geçmesidir) kürlleme maddeleri gibi sistem bileşimi ile etkileşimlerine bağlı olarak formülasyon reaktivitesini etkilediği bilinmektedir. Klorür türlerini ve seviyelerini bilmek, formüle edenlere, uygun reaktivite ve akış için formülasyonlarının ayarlanmasında rehberlik eder. İyonik hidrolize edilebilir (elektrik yüklü) klorürlerin ve toplam klorürlerin varlığının, yarı iletken kapsüllemeye kullanılan epoksi kalıplama bileşiklerinin elektriksel özelliklerini etkilediği gösterilmiştir (Gojny, Wichmann, Fiedler, Schulte, 2005).

Bu uygulamalar için üreticiler, düşük iyonik değere sahip, hidrolize edilebilir ve gereken klorür içeriğine sahip yüksek saflıkta epoksi reçineler sunarlar. Epoksi reçinelerin viskozitesi, formülasyonların işlenmesini ve uygulanmasını etkileyen önemli bir özelliktir. Örneğin, yüksek viskoziteli BADGE, kürlleme maddeleriyle iyi karışmayı engelleyerek homojen olmayan karışımlara, eksik ağ oluşumuna ve düşük performansa neden olur. Öte yandan, çok düşük viskozite, kaplama ve görünüm gibi uygulama özelliklerini etkileyecektir (Pham, Mark, 2005).

Hem epoksi reçinelerinin kimyası hem de onu üretmek için gereken reaktanlar göz önüne alındığında, reçinede safsızlıklar, reaksiyona girmemiş ham maddeler, katalizör ve diğer monomerik türlerin düşük seviyelerde (yani <100 ppm) bulunması beklenebilir. Hem kürlleme sırasında hem de kürlleme sonrasında arayüzeyde etkili olan mekanik, termal ve kimyasal stres seviyeleri altında, bu türlerin arayüzdeki konsantrasyonu oldukça yüksek olabilir ve bu da yığılma ilgisi olmayan bir arayüz yapısına yol açabilir (Drzal, 2005). Hızlandırıcılar (kobalt veya amin bazlı), kürlenmeyi hızlandırmak için yaygın olarak epoksi sistemlere eklenir. Hidroksil grupları gibi hidrojen donörleri, hidrojen bağı veya epoksit halkası üzerindeki oksijenle reaksiyon yoluyla epoksinin reaksiyonlarını kolaylaştırır.

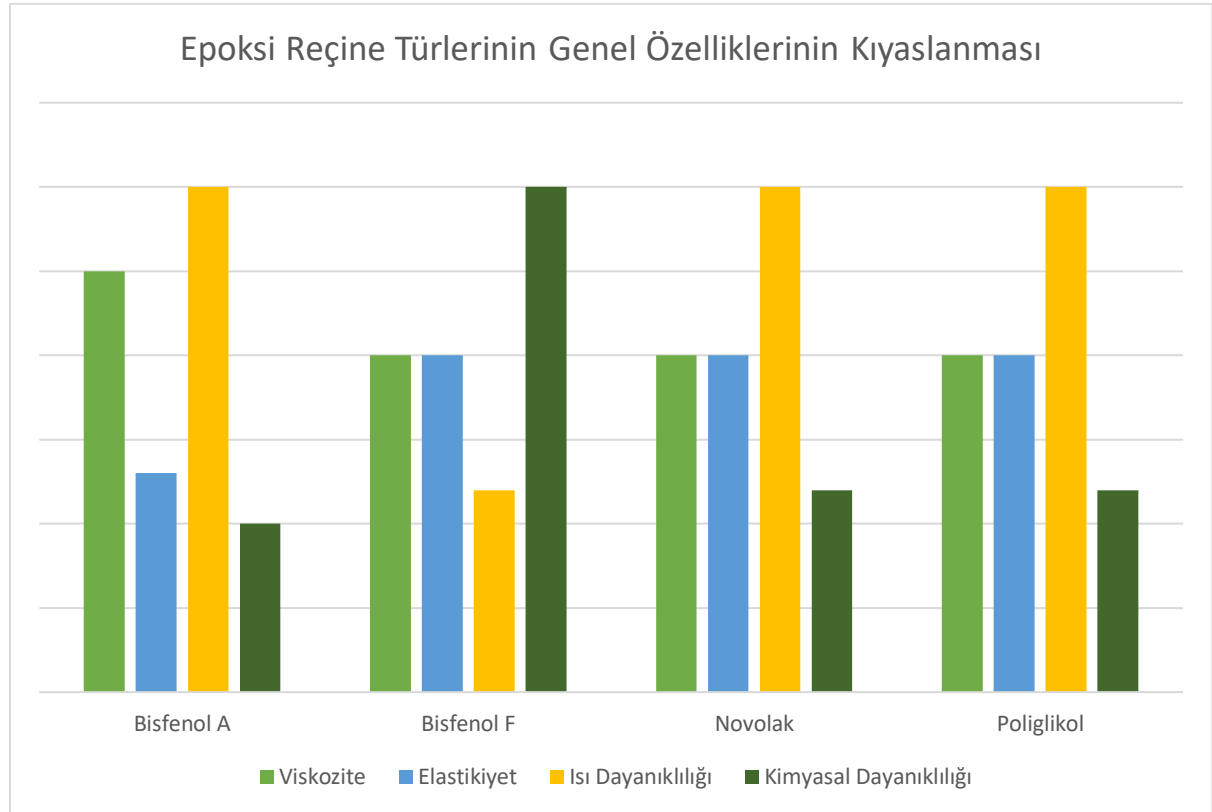
Epoksi kürleme işlemi, kürlenmiş epoksi performansını etkileyen önemli bir faktördür. Sonuç olarak, optimum ağ yapısını ve performansını elde etmek, uygun sertleştirme programını tasarlamak için sertleştirme sürecini ve kinetiğini anlamak zorunludur. Stokiyometrik oranlarda belirli bir sertleştirme maddesi kullanılarak aynı derecede sertleştirildiklerinde, iki işlevli epoksi reçinelere kıyasla daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu, daha yüksek cam geçiş sıcaklığı ve daha iyi termal ve kimyasal direnç üretirler (Pham ve diğerleri, 2005).

Hemen hemen tüm epoksi reçineleri, çapraz bağlayıcılarla kürlenerek kullanımları için katı, kaynaşmaz ve çözünmez üç boyutlu termoset ağlara dönüştürülür. Optimum performans özellikleri, doğru epoksi reçinelerin, genellikle sertleştiriciler veya sertleştirici maddeler olarak adlandırılan uygun çapraz bağlayıcılarla çapraz bağlanmasıyla elde edilir. Uygun kürleme maddesinin seçilmesi, uygulama proses tekniklerinin gereksinimlerine, kap ömrüne, kür koşullarına ve nihai fiziksel özelliklere bağlıdır. Optimum işlenebilirlik ve performans sağlayacak başarılı bir epoksi formülasyonu tasarlamak için aşağıdaki faktörler dikkatlice düşünülmelidir:

1. Epoksi reçine(ler) ve sertleştirici madde(ler) yapılarının uygun kombinasyonunun seçimi
2. Epoksi/Kürleme ajanı stokiyometrik oranı
3. Katalizör/hızlandırıcı seçimi
4. Kürleme/son kürleme süreçleri ve koşulları
5. Dolgu maddeleri, seyrelticiler, sertleştirme maddeleri vb. gibi formülasyon değiştiriciler
6. Sistem kimyası, yapışma, reoloji, morfoloji ve performans üzerinde formülasyon bileşenleri ve kompozit malzemeler (lifler, metaller vb.) arasındaki etkileşimler (Pham ve diğerleri, 2005).

Çok çeşitli yapı ve işlevsellik sunan çok sayıda epoksi reçinesi ve sertleştirme maddesi seçeneği vardır. Çizelge 3'te yaygın epoksi reçine türlerinin genel özelliklerinin kıyaslanması gösterilmektedir.

Çizelge 3. Epoksi reçine türlerinin genel özelliklerinin kıyaslanması (Pham ve diğerleri, 2005).



Çizelge 3'te verilen ve daha birçok epoksi çeşidinin günlük hayatta istenilen özelliklerine göre seçilimi gerçekleştirilmektedir. Geçmişte bazı solvent (çözücü) bazlı sistemler kaplama olarak kullanılmaktaydı ancak sağlık açısından tehlikeli olması nedenleriyle büyük ölçüde ortadan kaldırıldılar. Yüzey kaplama örnekleri, çelik yapıların korozyon koruması için denizcilik ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılan iki parçalı epoksi sistemlerdir.

Günümüzde artan elektrikli cihaz kullanımları epoksi için geniş bir kullanım alanı yaratmıştır. Elektrik motorları, şarj aletleri, jeneratörler vb. uygulamalarda yalıtkan sargıların izolasyonu için kullanılmaktadır. Kapsülleme işlemleri içinse baskı devre kartları ve elektronik bileşenlerde kullanımı mevcuttur.

Rüzgâr enerjisinden faydalanmak için gittikçe yaygınlaşan rüzgâr türbinlerinin kanatları için kullanılan kompozitlerin matriksi olarak epoksi reçineler kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitler maliyet olarak karbon fiber elyaf takviyeli kompozitlere göre daha uygun olduğu için daha çok tercih edilmektedir. Resim 5'te bir rüzgâr türbini kanadının iç yapısı verilmiştir.



Resim 5. Rüzgâr türbini bıçağında kullanılan fiberglas ve reçine (Murray ve diğerleri, 2020).

Yapı malzemelerinin içeriğinde de kullanılan epoksi reçineler genellikle onarımı zor olan yapı malzemelerinde kullanılmaktadır. Yüksek maliyeti nedeni ile tüm yapının içeriğinde kullanılması pek mümkün olmamaktadır. Bazense yapıların yeniden yapılması yerine onarımında da kullanılmaktadır. Mükemmel yapışma özelliği nedeni ile yapıştırıcı olarak kullanımı da oldukça fazladır. İçeriğinde uçucu çözücülerin bulunmaması, yüksek kohezyon özelliği, sertleşme sırasında düşük büzülme özelliği, düşük sürünme özelliği gibi özelliklerinden ötürü formülasyon çeşitliliği sayesinde yapıştırıcı olarak kullanımını arttırmaktadır. Boya ve kaplamalar, elektrik uygulamaları, rüzgâr enerjisi, yapı malzemeleri ve yapıştırıcı olarak kullanıldığı gibi başka alanlarda da kullanılmaktadır. Bu alanların yüzdesel grafiği yaklaşık olarak Çizelge 5'te verilmiştir. Epoksi reçinelerin reaktif özelliği elyaf malzemelerle kuvvetli bir bağ kurması sebebi ile kompozit malzeme alanında geniş kombinasyonlu kullanımı sahiptir.

Kompozit uygulamalarında iki farklı işlem türüne sahip epoksi reçinelerin bazı kompozit uygulamaları bu işlemlerle birlikte Çizelge 4’te verilmiştir. Bu işlemler yaş reçine işlemleri ve önceden emdirmiş işlemleridir.

Çizelge 4. Kompozit Ürünlerin Üretim Süreçleri (Gibson, 2017).

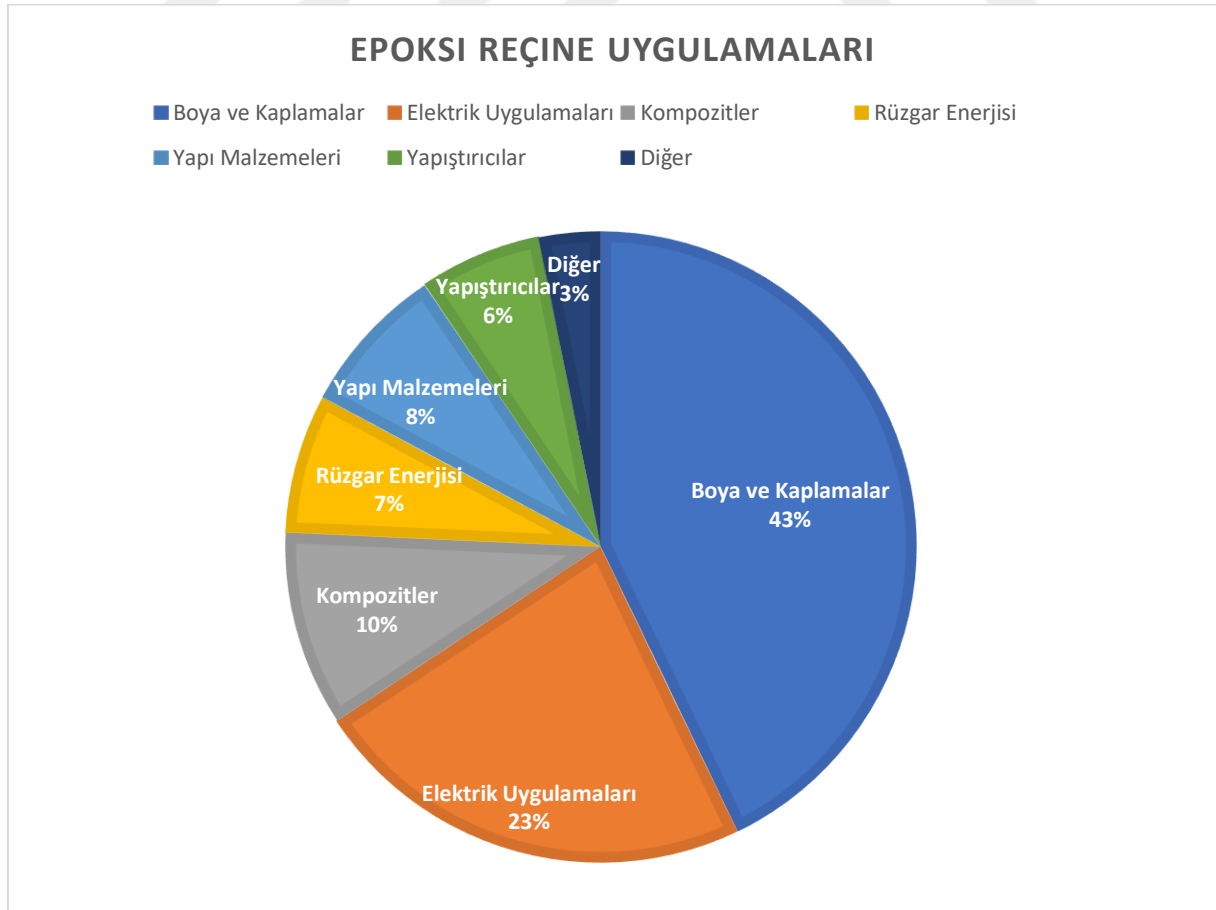
İşlem	Ürün Tipi
Yaş Reçine İşlemleri	
Kontak kalıplama (elle yatırma)	Tekneler, sörf tahtaları, banyolar, genel amaçlı pervazlar
Reçine transfer kalıplama	Tekneler, genel amaçlı pervazlar
Reçine infüzyonu	Tekneler, rüzgâr türbini kanatları
Filament sarma	Borular ve basınçlı kaplar
Önceden Emdirmiş İşlemleri	
Pres kalıplama	Baskılı devre kartı
Vakum torbalı fırın işleme	Otomotiv kompozitleri rüzgâr türbini kanatları
Vakum torbalı otoklav işleme	Havacılık kompozitleri

Daha hafif, daha sert ve daha ucuz olan bu grup yeni nesil teknolojilerde daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Resim 6’da yaş reçine işlemlerinden olan filament sarma metodu ile üretilmekte olan Resim 3’te ki boru, bu kompozit malzeme üretme yöntemleri ve ürünlerine birer örnek olarak gösterilmiştir. Çizelge 4’de verilen reçine infüzyonu (çözücü içerisinde uzun süre bekletme) işlemi ile üretilen rüzgâr türbini kanatları (bu yöntem malzemenin içerisinde hiçbir hava kabarcığı kalmasına müsaade etmeyen ve sonuç olarak ortaya yüksek mukavemetli ve düşük maliyetli bir üretim çıkartır, ayrıca fl araçlarının kaportasında ve yat endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır) ve pres kalıplama işlemi ile üretilen baskılı devre kartları elektrik uygulamaları Çizelge 5’te kompozitler diliminden ayrı olarak verilmiştir. Bu uygulamaları de ekleyecek olursak kompozit uygulamaları epoksi reçineleri için en yüksek uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır.



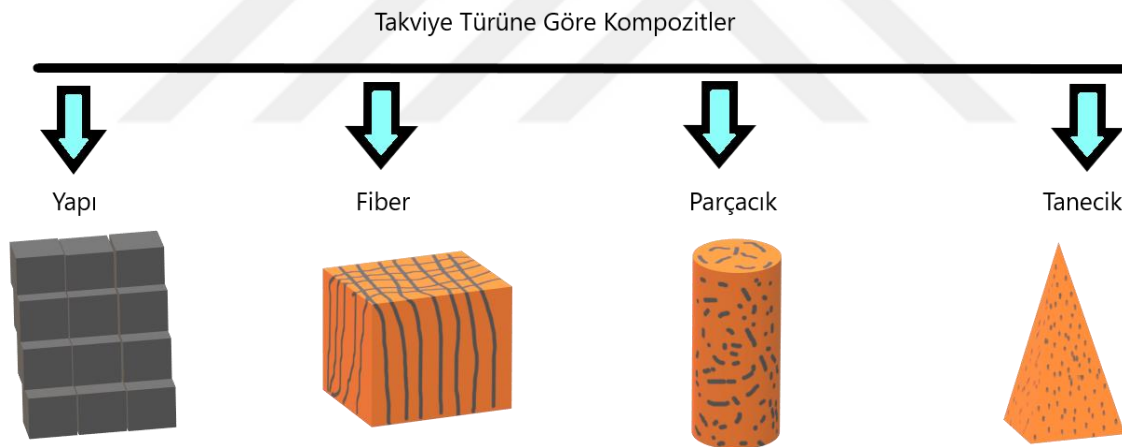
Resim 6. Filament sarma metodu ve üretilmekte olan fiber takviyeli epoksi reçine boru (Erarslan ve diğerleri, 2017).

Çizelge 5. Epoksi reçinenin dünya pazarlarında değere göre karşılaştırılması (Gibson G. 2017).



1.1.2. Takviye türüne göre kompozitler

Kompozitlerin takviye türleri 4 ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar yapı, fiber, parçacık ve tanecik takviyeli kompozitlerdir. Yapı takviyeli kompozitler fiber (sıkıştırılmış elyaf) malzemelerin bir araya gelerek oluşturduğu yapıların kompozit içerisinde takviye malzemesi olarak kullanılması ile oluşur. Yapı takviyeli kompozitler kendi içinde üçe ayrılmaktadır. Bunlar kiriş yapılı, plaka yapılı ve kabuk yapılı kompozitlerdir. Fiber takviyeli kompozitler, elde edilmek istenen kompozitin yapısına göre şekil verilerek (yapı takviyeli) takviye edilebildiği gibi direkte ipliksi olarak da takviye edilebilmektedirler. Parçacık takviyeli kompozitler mikroskobik büyüklükten makroskobik büyüklüğe kadar değişen boyutlarda parçacıklara sahip kompozitlerdir. Tanecik takviyeli kompozitlerin parçacık takviyeli kompozitlerden farkı ise daha küçük boyutlarda (mikro ya da nano) takviye edilmeleridir. Takviye türüne göre kompozitlerin temsili olarak görsel anlatımı Şekil 3'te gösterilmiştir (Lindgaard, Lund, 2011; Narita, Turvey, 2004).



Şekil 3. Takviye türüne göre kompozitlerin temsili görsel anlatımı; gri renkli olan çizimler takviye, turuncu renkli olan çizimler matriks olarak nitelendirilmektedir.

Yapı takviyeli kompozitler

Kompozit malzemeler ileri teknoloji ürünlerin mekanik yapılarında ileri seviyede gelişme sağlamıştır. Hafif ve güçlü olması sebebiyle bu malzeme çeşitli endüstrilerde mükemmel şekilde uygunluk sağlamıştır. Bu malzemeler, her bir bileşeni ayrı ayrı olmak üzere kendi içinde gelişmiş özelliklere sahiptirler. Lif takviyeli kompozitleri örnek verecek olursak, liflerin birbirine tutunmasını sağlayan ve çevre koşullarından etkilenmesine engel olan matrikse gömülü yüksek mukavemetli bir malzemedir.

Birçok tasarımsal çalışma da fiberlerin rotasyon açıları ve katman kalınlığı değişken olarak kullanılmıştır. Bu tasarımlar üzerinde en sık yapılan deneysel çalışmalar burkulma yükü, yük taşıma kapasitesi, sehim (yapının yük altında açılı bir şekilde eğilme göstermesi) ve gerilmeleri içerir. Yapısal kompozitler üç tiptir; kiriş yapılı, plaka yapılı ve kabuk yapılı (Nikbakt, Kamarian, Shakeri, 2018).

Kiriş yapılı kompozitler

Kirişler üç boyutlu yapılardır. Kinematik yasalarla ilgili formülleri basitleştirmek için genellikle tek boyutlu yapılar olarak kabul edilir böylece malzemelerin mekanik özelliklerinin hesaplamaları daha kolay yapılır. Endüstrilerde çok çeşitli uygulamalara sahip kiriş yapılı kompozitler çok katmanlıdırlar. Kırılmaya, çatlamaya korozyona vb. karşı iyi direnç gösteren kompozit kirişler köprü ve inşaat sektörlerinde çok kullanılmaktadır. Kiriş yapılı kompozitleri lamine kiriş, kutu kiriş ve tampon kiriş kompozitleri olarak üç kategoriye ayırabiliriz. İnce tabakalardan oluşan lamine (laminat demirine benzer yapıda) adı verilen Resim 7’de ki gibi birbirine yapışan kompozitlere lamine kiriş kompozit adı verilir. Kompozit tabakaların mekanik davranışı üzerinde en etkili parametre kat açıları olduğundan, bu kompozit yapıları için çok fazla yapısal özelliğe ulaşılabilir. İstifleme sırası lamine kompozitler de optimizasyon açısından en önemli değişken olarak kabul edilir.



Resim 7. Lamine karbon fiber malzeme.

Kutu kiriş (profile benzer yapıda) kompozitleri Resim 8’de gösterildiği gibi aerodinamik ve aeroelastisite özelliklerin stabilitesi bakımından helikopter, füze, roket ve uçak sistemlerinin tasarımında en uygulanabilir yapılar arasındadır.



Resim 8. Kutu kiriş karbon fiber malzeme.

Çarpma esnasında oluşan enerjiyi absorbe eden ve yolcuları minimum hasar alarak kurtaran araçlarda tamponların kirişlerinin hafif olması istenmektedir. Bu yüzden tampon kiriş kompozitleri tasarlanmaktadır. Hem hafif olmaları hem de çarpışma durumlarında maksimum esneme sağlayarak hasarı minimuma indirebilme özellikleri nedeni ile kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır (Nikbakt ve diğerleri, 2018).

Plaka yapılı kompozitler

Kompozit levha olarak da adlandırılan plaka yapılı kompozitler birçok alanda metallerin yerini almıştır. Çoğunluğu birkaç lamineden oluşan kompozit levhalar hafif ve dayanıklı olmaları nedeniyle gövde malzemesi olarak (özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde) kullanılmaktadır. Matrikse gömülü fiberlerin uygulaması değişken sertlikte kompozit plakaların ortaya çıkmasını ve bu plakaların yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırmasını sağlamıştır.

Plaka yapılı kompozit çeşitleri; konvansiyonel (proje tipine göre) lamine kompozit levhalar, akıllı kompozit levhalar, delikli kompozit levhalar, eğimli kompozit levhalar, sertleştirilmiş kompozit levhalar, yama tamiri yapılmış kompozit levhalar, değişken sertlikte kompozit levhalardır. Bu çeşitler arasında üzerinde en çok çalışma yapılan çeşit konvansiyonel lamine kompozit levhalardır. Bu çalışmalar arasında burkulma yükünü maksimize etme, karakteristik titreşimsel geliştirme, ağırlığı minimize etme, mukavemet ve sertlik arttırma, sapma ve stresi minimize etme vardır (Nikbakt ve diğerleri, 2018).

Kabuk yapılı kompozitler

Eğrilikleri sayesinde üzerine uygulanan yükleri etkileyici bir şekilde taşıyabilen kabuk yapılı kompozitler yapı elamanı olarak mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Silindirik kabuklar, konik kabuklar, küresel kabuklar, sertleştirilmiş kabuklar ve genel şekilli kabuklar gibi gruplara ayrılır. Bu kabukların bazı uygulama alanları: Havacılık, denizcilik ve inşaat gibi uygulama alanlarında aktif rol oynayan silindirik kabuklar genellikle minimum ağırlık tasarımına ihtiyaç duyulan roketler ve füzelerin gövdeleri için yük taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Konik kabuk yapılı kompozitlere müzik kutularındaki hoparlör örneği verilebilir. Bu kompozitlere bir örnek daha vermek gerekirse; farklı çaplardaki iki silindir yapının birleştirilmesi için de kullanılmaktadır. Küresel kabuk yapılı kompozitler basınçlı kapların kubbe kaplamaları için uygulandığı gibi gemilerde, uçaklarda, stadyumlarda ve sergi salonlarında da uygulanmaktadır. Sertleştirilmiş ve genel şekilli kabuklar yukarıdaki tüm alanlarda kullanıldığı gibi ihtiyaca göre kullanımı artmakta veya azalmaktadır (Nikbakt ve diğerleri, 2018).

Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler günümüzde en yaygın kullanılan kompozitlerdir. Düşük bakım maliyeti, yüksek mukavemet ve hafiflik, hava koşullarına karşı mükemmel dayanım gibi özellikleri fiber takviyeli kompozitleri cazip kılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler, bileşenin mekanik davranışını belirli bir yönde geliştirmek için belirli bir yönde lifleri düzenleyerek malzemeyi tasarlama imkânı veren yüksek özgül sertliğe sahip hafif

malzemelerdir. Modern havacılık ve otomotiv üreticileri, metalik ve kompozit malzemeleri içeren yüksek sertlikteki yapıları hedefleyerek, sürekli olarak ağırlığı azaltmaya çalıştılar.

Çelik ve kompozitler (yani hibrit çözüm) kullanılarak üretilen otomobil gövdesi kabuğunun, alüminyum otomobil gövdesi kabuğuna kıyasla yaklaşık %12 ila %24 arasında bir kütle kazancına ve yaklaşık %20'lik bir maliyet kazancına yol açan en iyi performansı verdiği gösterilmiştir (Jaafar ve diğerleri, 2019).

Günümüzde çevre bilincinin artması ile kompozit takviyelerinin doğal liflerden seçilmesi ve oluşan kompozitlerin araştırılıp üzerinde deneysel çalışmalar yapılması oldukça artmıştır. Kullanım alanlarına göre birincil ve ikincil olarak sınıflandırılan doğal lif üreten bitkiler doğada bulunduğu gibi insanlar tarafından da yetiştirilebilmektedir.

Birincil bitkiler lif hammaddesi için üretilen, ikincil bitkiler ise lif hammaddelerinin yan ürünü olarak üretilen bitkilerdir. Altı temel doğal lif türü vardır. Bunlar şu şekilde sınıflandırılır: Sak lifleri (jüt, keten, kenevir, rami ve kenaf), yaprak lifleri (abaca, sisal ve ananas), tohum lifleri (hindistan cevizi, pamuk ve kapok), çekirdek lifleri (kenaf, kenevir ve jüt), çim ve kamış lifleri (buğday, mısır ve pirinç) ve diğer tüm türleri (odun ve kökler) (Omar Faruk ve diğerleri, 2012).

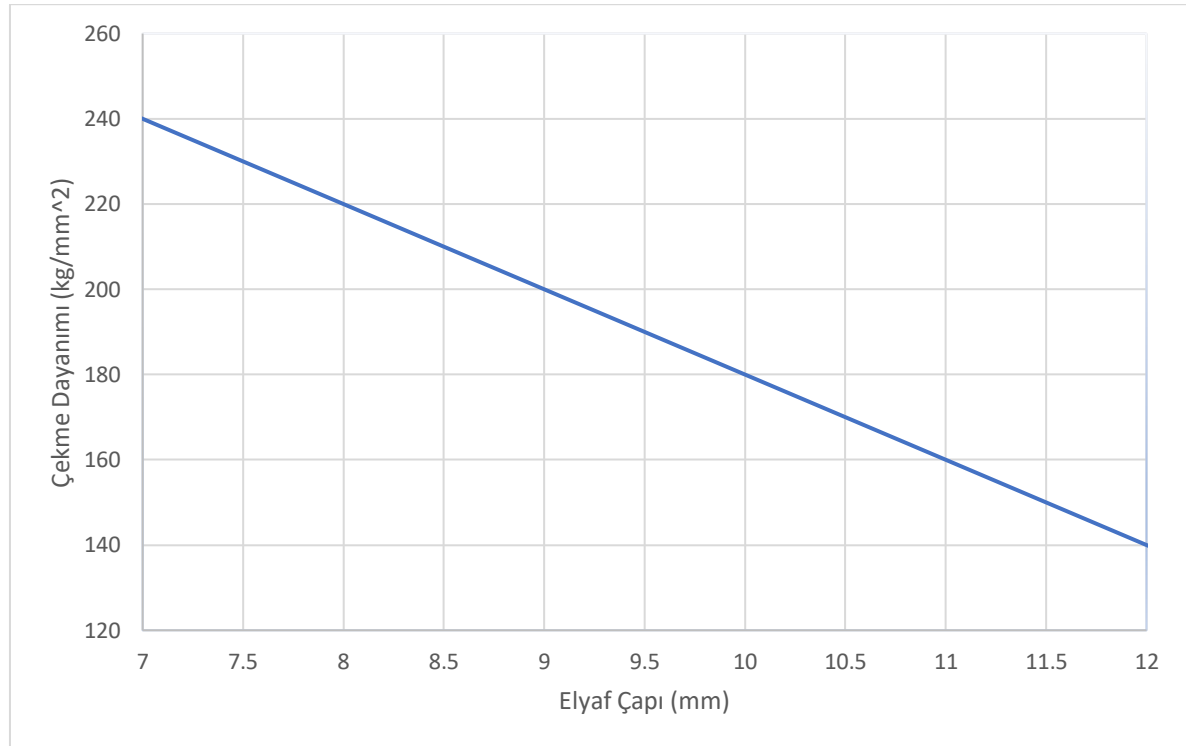
Yukarıda bazı sürdürülebilir organik kompozit üretimi için kullanılan bitki çeşitleri verilmiştir. Bu bitkiler ve benzer bitkilerin lif uzunluğu ve genişliği hakkında bilgi sahibi olmak farklı türdeki doğal lifleri karşılaştırmak için önemlidir.

Selüloz bazlı fiber kompozitlerde yüksek bir en-boy oranı (uzunluk/genişlik), olası mukavemet özelliklerinin bir göstergesi olduğu için çok önemlidir. Lif gücü, belirli bir uygulama için belirli bir doğal lifin seçilmesinde önemli bir faktör olabilir. Fiziksel özelliklerdeki değişiklikler, lif morfolojisindeki farklılıklardan kaynaklanabilir. Yoğunluk, hücre cidarı kalınlığı, uzunluk ve özellikle çap (Çizelge 6'da etkisinin önemine dikkat çekmek istenmiştir) gibi yapıdaki büyük farklılıklar, fiziksel özelliklerde farklılıklara neden olur. Organik ya da sentetik fark etmeksizin fiber takviyeli kompozitlerin ortak özelliği ürünün ağırlığını azaltıp mukavemetini arttırmasıdır (Omar Faruk ve diğerleri, 2012).

Kompozitlerde kullanılan elyaflar kesikli ya da sürekli olabilir. Sürekli elyaf formu gerçekte ulaşılması pek mümkün olmayan bir formdur. Kesikli elyaflar sürekli elyafların

kesilmiş formlarıdır. Genellikle boy/çap oranı 100'e eşit olur. Örneğin saç kılına benzeyen 0,001 mm çapında olan tek parça kristaller verilebilir.

Çizelge 6. Karbon elyafının çapı ve çekme dayanımı arasındaki ilişkisi (De Lamotte, Perry, 1970).



Parçacık takviyeli kompozitler

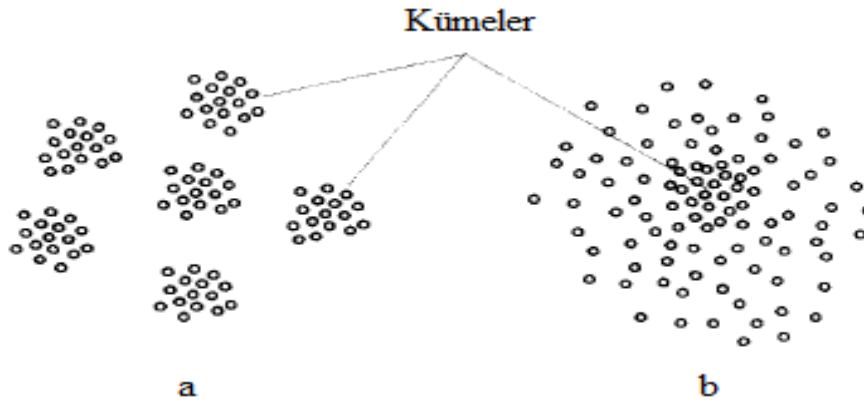
Her takviyeli üretimde olduğu gibi amaç yine malzemenin ağırlığını azaltıp mukavemetini arttırmaktır. Mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler için ara yüzeylerindeki parçacık ve matriks arasındaki yük transfer mekanizmalarının önemli hale geldiği iyi bilinmektedir. Malzemenin mukavemeti ve sertliği, bu ara yüzlerin özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Mahfuz, Adnan, Rangari, Jeelani, Jang, 2004). Örneğin lif parçacıkları ile takviye edilmiş bir alüminyum alaşımı, düzgün lif hizalaması yapıldığı takdirde aynı boyutlardaki takviyesiz alüminyum alaşımından daha hafif ve daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir. Parçacık hizalaması genellikle hizalamada daralan veya genişleyen akış kullanılarak yapılır (Tvergaard, 1990; Krause, Park, Straup, 1989). Bu kompozitler paketleme, kaplama, elektronik, otomotiv ve havacılık endüstrileri dahil olmak üzere geniş bir uygulama

yelpazesine sahiptirler (Mahfuz ve diğ erleri, 2004). Buharla büyütülen karbon fiberler, geleneksel dolgu maddelerinden çok daha küçük boyutlarla piyasaya sürülmektedir.

Buharla büyütülmüş karbon fiber parçacık takviyeli epoksi kompozitlerinin özellikleri analiz edilmiş ve bu analizler sonucu buharla büyütülen karbon fiber parçacığı takviyeli kompozitlerin, geleneksel kısa karbon fiber lifi takviyeli kompozitlerden oldukça fazla üstün olduğu gösterilmiştir (Kuriger, Alam, Anderson, Jacobsen, 2002), (Xu, Smith, Simon, 2004).

Tanecik takviyeli kompozitler

Tanecik; maddesel cisimlerin çok küçük boyutlu olmasıdır. Epoksi reçinelerde nano boyutta tanecik takviyeleri kullanımı hakkındaki çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Bu doğrultuda hem sert inorganik malzemelerin özellikleri hem de plastik malzemelerin performans özellikleri birleştirilmektedir. Başta mekanik özellikleri olmak üzere kimyasal direnç, yüksek sıcaklık dayanımı ve elektriksel özelliklerindeki değişim tanecik takviyeli kompozitleri çekici kılmaktadır. Bu malzemelerin yüzeyi uygun gruplarla uygun şekilde i levselle tirildiğinde, nano materyal ve reçine arasında fiziksel ve kimyasal bağlar desteklenebilir. Takviye yüzeyinden etkilenen reçine hacminin dolgunun hacmine kıyasla küçük olduğu geleneksel kompozitlerin aksine, nanomalzemeler bir reçine hacminin özelliklerini hareketsizle tirme veya değiştirme yeteneğine sahiptir (Gibson, 2017; Kim, Park, 2008; Basara, Yilmazer, Bayram, 2005). Tanecik takviyesi kompozitlerde hassas bir takviye türüdür. Takviye esnasında kümelenme durumları ortaya çıkmaktadır. Literatürde iki tip kümelenme şekli vardır. Bu tipler  ekil 4'te temsili olarak gösterilmiştir. Birincisinde tanecikler yarı rasgele şekilde dağılım gösterirken ikincisinde bazı bölgelerdeki taneciklerin ortalama yakınlıkları tüm taneciklerin ortalama yakınlık derecesinden daha yüksektir (Tszeng, 1998; Zhai, Ling, Li, Wang, 2006; Zhao, Li, 2008).



Şekil 4. Tanecik kümelenme şekilleri; a birinci tip, b ikinci tip kümelenme şeklidir (Tszeng, 1998).

Taneciklerin ikinci tipteki gibi homojene yakın bir dağılım göstermesi malzemenin özelliklerine olan pozitif etkiyi malzemenin her bölgesine eşite yakın dağılmasını sağlar. Fakat bu taneciklerin homojen dağılımını sağlamak oldukça zordur. Tanecikler arasındaki kuvvetler oldukça zayıftır. Homojen dağılımı sağlamak için manyetik karıştırma, sonikasyon, kayma karıştırma, bilyalı frezeleme, kalenderleme, ekstrüzyon ve karıştırma gibi dispersiyon (bir maddenin başka bir madde içinde tanecikler halinde eşit bir şekilde dağılması) işlemleri geliştirilmiştir (Chan, Lau, Wong, Ho, Hui, 2011).

Tanecik takviyesinde epoksiler moleküler yapısından dolayı istenilen özelliğin arttırılmasına en yatkın reçine grubudur. Günümüzde epoksilerle yaygın bir şekilde çalışmaların gerçekleştirildiği tanecik takviyesi, takviye işlemi sırasında tek bir dispersiyon yöntemi kullanıldığı gibi birden fazla da yöntem kullanılabilir. Ortak hedef homojen dağılımın gerçekleştirilmesidir (Zhou ve diğerleri, 2016; Saraç, Adin, Temiz, 2018).

Epoksi reçineleri kürleme esnasında uçucu kimyasal ürünler açığa çıkarmaması ve düşük büzüşme özelliği hem kompozitlerin hem de metallerin birleştirilmesi için en uygun reçinelerdir. Epoksi yapıştırıcılar, alüminyum alaşımlı yüzeyler ve yüzey hazırlığı sırasında üretilen oksit tabakaları için iyi bir afiniteye (son katmandaki elektroların kararlı bir şekilde birbirine bağlanması) sahiptir. Bu yüzden epoksi reçinelerin matriks olarak seçildiği çalışmalarda birçok partikül çeşidi takviye olarak kullanılmaktadır. Silisyum, alüminyum, titanyum, grafen gibi malzemeler başlıca örnekleridir (Kahraman, Sunar, Yilbas, 2008; Nachikethas, Manoj, 2013).

Takviye türüne göre kompozitlerden olan tanecik takviyeli kompozitler literatürde geniş bir çalışma alanına sahiptir. Bu kompozitlerden en yaygın kullanılanı epoksi malzemesidir ve en etkili kullanılan yöntemse tanecik takviye yöntemidir. Biz de bu çalışmada farklı tanecik boyutlarına sahip silisyum dioksit tanecikleri ile takviye edilmiş epoksinin mekanik özelliklerini inceleyip tanecik boyutları ve miktarlarının üzerindeki etkisini gözlemledik (García, Prolongo, Salom, Sánchez-Cabezudo, Masegosa, 2014).

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyaller

Bu tezde yapılan çalışma gereği kullanılan malzemeler; deney malzemeleri ve kalıp malzemeleri olmak üzere 2'ye ayrılır.

Deney malzemeleri; çift bileşenli epoksi reçine, 5-20 nm'lik silisyum dioksit, 80 nm'lik silisyum dioksit.

Kalıp malzemeleri; pleksiglas, sunta, yapıştırıcı ve banttan oluşmaktadır. Kalıbı oluşturan ana bileşenler bunlardır. Pleksiglas malzemesi saydam görünümlü plastik bir cam malzemedir. Hammaddesi akriliktir (akrilik asit polimerlerinin oluşturduğu isim). Bu malzeme altlık olarak kullanılmıştır. Bunun sebebi reaktif malzemelere karşı direnci yüksek bir malzeme oluşudur. Sunta malzemesi kalıbın cidarlarını oluşturmak için kullanılmıştır. Kalıp cidarları yine pleksiglas malzemesi ile oluşturulabilirken kesimi ve sökümü daha kolay olan sunta tercih edilmiştir. Fakat sunta tek başına yetersizdir. Çünkü pleksiglas malzemesindeki reaktif malzemelere karşı kimyasal direnç sunta malzemesinde yoktur. Bu yüzden suntalar bant kullanılarak kaplanmıştır. Bant bir yüzü yapışkan diğer yüzü yapışkan olmayan arasında ayırıcı maddesi olan bir malzemedir. Son olarak yapıştırıcı, kalıp cidarlarının pleksiglas altlığa ve birbirlerine sabitlenmesi için kullanılmıştır.

2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Metot

Numunelerin hazırlanma süreci 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar kalıpların hazırlanması, numune karışımlarının hazırlanması ve dökümleri, son olarak da kürlenme süreci ve kalıptan çıkarılması.

2.2.1. Kalıpların hazırlanması

Döküm yapılacak kalıpların hazırlanma işlemi ilk olarak pleksiglas altlığının üstüne yerleştirilecek sunta kalıp cidarlarının 10 mm genişlikte 5 mm yükseklikte 2 adet 30 mm, 2 adet 100 mm (1 kalıp için gerekli kesim ölçüleri) kesilmesi ile başlar (Resim 14). Bu ölçüler uzun kenarlara yaklaşık +5 mm tolerans verilerek hesaplanmıştır. Bunun sebebi iç hacmi oluşturan dökümün yapılacağı bölümün uzun kenarı 80-85mm olmasıdır. Ayrıca kısa kenarların toleransı ± 1 mm olarak hesaplanmıştır. Böylece iç hacim her kalıpta yaklaşık eşit olacak şekilde kısa kenarların bazıları kalıplarda daha içeride bazıları ise daha dışarıda kalmaktadır. Bu durum Resim 13'te gözlemlenebilmektedir.

Daha sonra istenilen ölçülerde kesilen kalıp cidarları tesviye edilir. Tesviye işlemi cidarların kaplanması esnasında kolaylık sağladığı için ve tabi ki de döküm yapılacak kısmın pleksiglas altlık kadar pürüzsüz olması gerektiği için yapılır. Tesviye işleminden sonra kalıp cidarları bant ile kaplanır. Kaplama işlemi cidarların içe bakan yarısını (Resim15) kaplayacak şekilde yapılır çünkü bandın ters yüzü yapışmayan bir malzeme olduğu için cidarların tamamının kaplanması durumunda zemine yapıştırılması mümkün olmayacaktır. Aynı zamanda cidarların birbirine temas edecekleri kısımlarda da kaplama olamaması gerekmektedir. Son olarak bu cidarlar pleksiglas altlığın üzerine yapıştırıcı ile yapıştırılır.

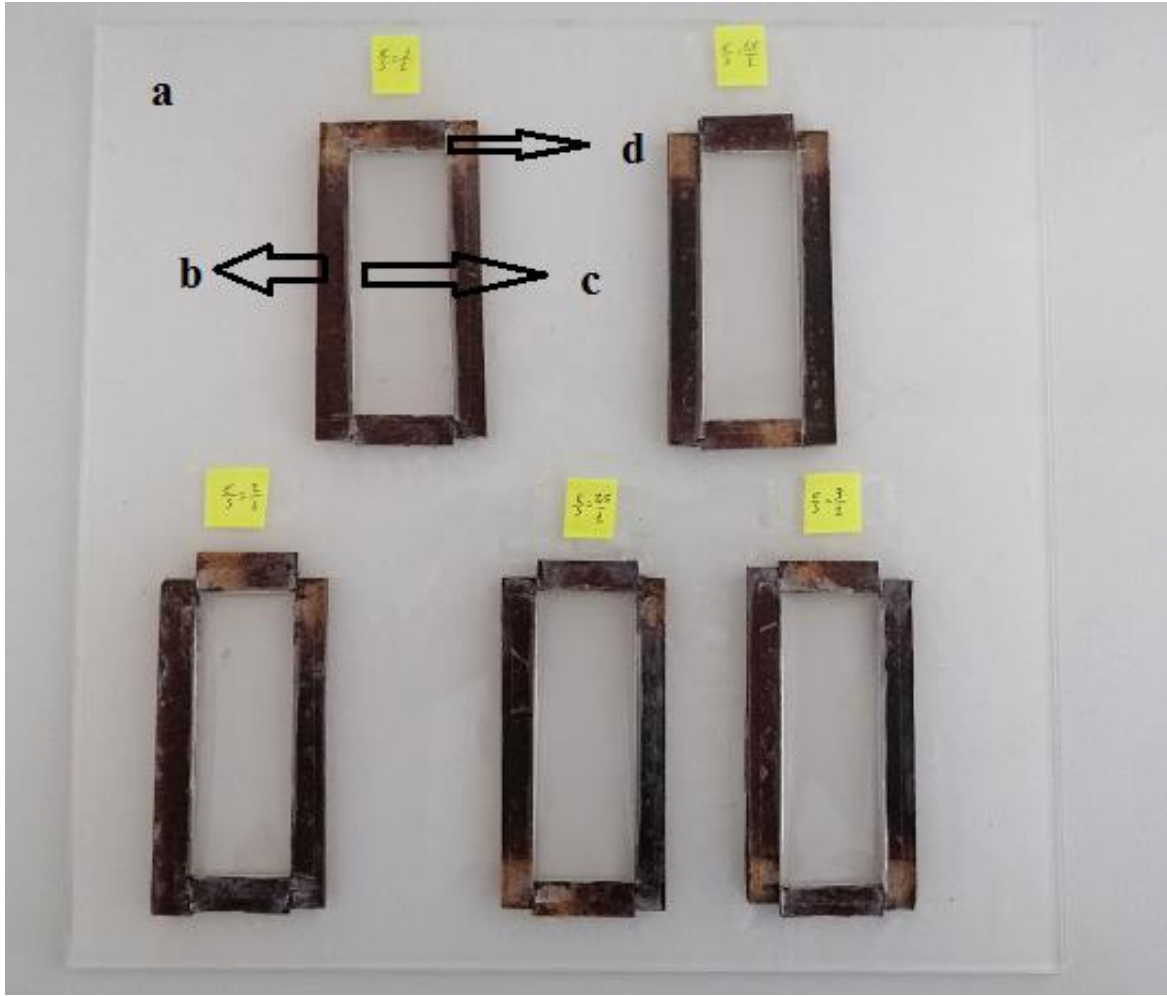
Bu işlem kaplama yapılmayan cidar kısımlarına sürülen yapıştırıcı ile yapılır. Yapıştırıcı hızlı kürleşen bir yapıya sahip olduğu için yapıştırma sıralaması bir uzun iki kısa ve bir uzun kenar olmalıdır. Yapılan yapıştırma işleminin sağlamlığını arttırmak için dökümden 6 saat önce kalıp cidarlarının dışından pleksiglas altlık ile kesişen kısımlarına ve cidarların birbirleri ile kesişen kısımlarına yeniden yapıştırıcı dökülmesi gerekmektedir.



Resim 9. Kalıp cidarlarının kesim aşaması



Resim 10. Yarıısı bant ile kaplanmış kısa kenar cidarı örneği



Resim 11. Kalıbı oluşturan ana bileşenler, a: pleksiglas altlık, b: sunta cedar, c: bant, d: yapıştırıcı

2.2.2. Numunelerin hazırlanması

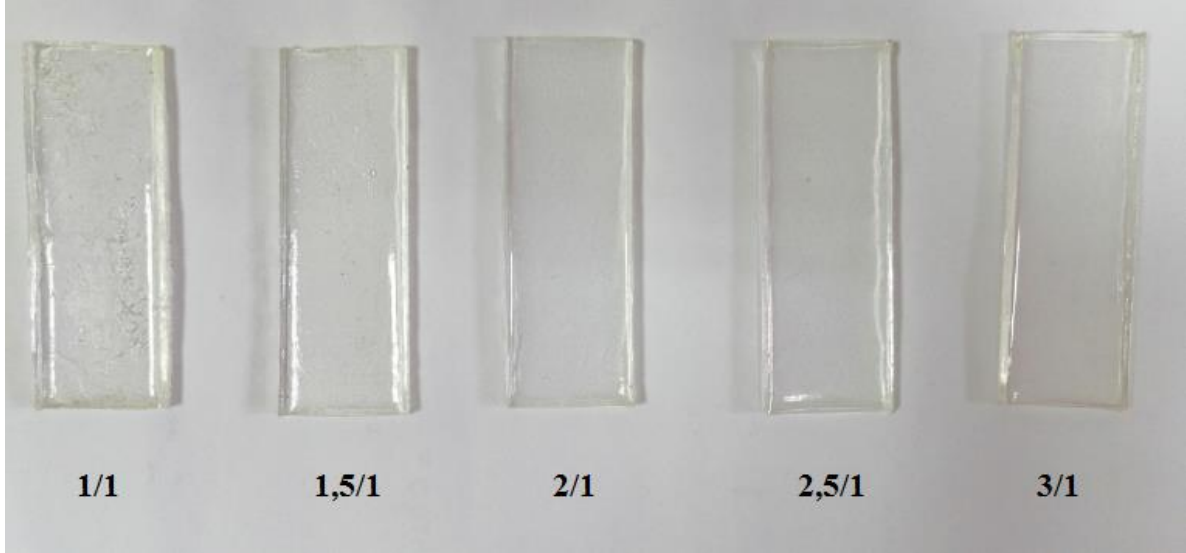
Bu çalışmada 3 farklı numune çeşidi hazırlanmıştır. Bunlardan ilki çift bileşenli saf epoksi, ikincisi 80 nm'lik silisyum dioksit katkılı epoksi üçüncüsü 5-20 nm'lik silisyum dioksit katkılı epoksidir.

Çift bileşenli saf epoksi numunelerinin hazırlanması

İlk numuneler hazırlanırken farklı epoksi ve sertleştirici oranları kullanılmıştır. Bunun sebebi, çift bileşenli epoksinin optimum epoksi/sertleştirici (Ep/Se) oranının hesaplanması hedeflenmiştir. Kalıpların iç hacmi yapılacak olan çekme testlerinde sabit hacim referansı için hepsinde aynıdır ($12000 \text{ mm}^3 = 12 \text{ ml}$). Bu yüzden ilk beş kalıba sırası ile Çizelge 7'deki oranlar ve miktarlar hazırlanmıştır.

Çizelge 7. Optimum Epoksi/Sertleştirici oranını hesaplamak için hazırlanacak numunelerin Ep/Se oranları

Ep/Se	1/1	1,5/1	2/1	2,5/1	3/1
Ep ml/Se ml	6/6	7,2/4,8	8/4	8,575/3,430	9/3



Resim 12. Verilen Ep/Se oranları ile hazırlanmış saf epoksi numuneleri

Silisyum dioksit katkılı epoksi numunelerinin hazırlanması

Literatürdeki ağırlıkça katkılama yüzdeleri göz önünde bulundurularak silisyum dioksit taneciklerinin ağırlıkları gram cinsinden hesaplanmıştır. Çizelge 8’de katkılama yüzdeleri ve ağırlıkları verilmiştir. Hesaplanan bu ağırlıklar sırası ile aynı ölçüdeki (10 ml) epoksilerin doldurulduğu beherlerin içine eklenmiştir. Çift bileşenli epoksinin sertleştirici bileşeni karışıma ilave edilmeden önce katkılanan malzeme homojen olarak dağıtılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için önce karışımın ilk hali ağzı kapalı bir şekilde mekanik karıştırıcıda 1 dakika 250 rpm’de, 29 dakika 750 rpm’de karıştırılmıştır. Daha sonra 5 dakikalık bir sonikasyon işlemi için sonikatör cihazına yerleştirilmiştir. Ardından 5 dakika daha mekanik karıştırıcı ve son olarak 5 dakika daha sonikatör kullanılmıştır. Bu aşamalardan sonra artık çift bileşenli epoksinin sertleştirici bileşeni (5ml) karışımlara ilave edilmiştir (beherlerin ağzı yeniden kapatılmıştır) ve eklenen sertleştirici bileşeninin de homojen dağılımı için 2 dakika mekanik karıştırıcı, 2 dakika sonikatör ve son olarak 1 dakika mekanik karıştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 8. Silisyum dioksit taneciklerinin kütlece yüzdesi ve katkılanma ağırlıkları.

Kütlece Yüzdesi (%)	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	80 nm boyutlarındaki silisyum dioksit
Ağırlık (g)	0,0408	0,0802	0,1613	0,3259	0,6654	
Kütlece Yüzdesi (%)	0,10	0,50	0,75			5-20 nm boyutlarındaki silisyum dioksit
Ağırlık (g)	0,0163	0,0819	0,1232			

Döküm

Numunelerin hazırlanması esnasında kalıbın alabileceği hacimden daha fazla epoksi ve sertleştirici kullanılmıştır (10 ml + 5 ml) çünkü aktarımlar esnasında olabilecek kayıplar göz önünde bulundurulmuştur. Fakat döküm esnasında yine aynı miktar olan 12 ml dökülmüştür. Oranlar değişmediği için aradaki 3 ml’lik fark bir önem arz etmemektedir. Kurudukları zaman kolaylıkla düzenlenebildikleri için döküm yaparken oluşan taşma durumlarına müdahale edilmedi; Resim 13’te ki kütlece yüzde 4’lük numune gibi. Numuneler kalıp duvarları kırılarak yerinden çıkartıldı. Taşma olan numunelerin çıkıntıları tesviye edildi ve hepsi çekme testi için hazırlandı.

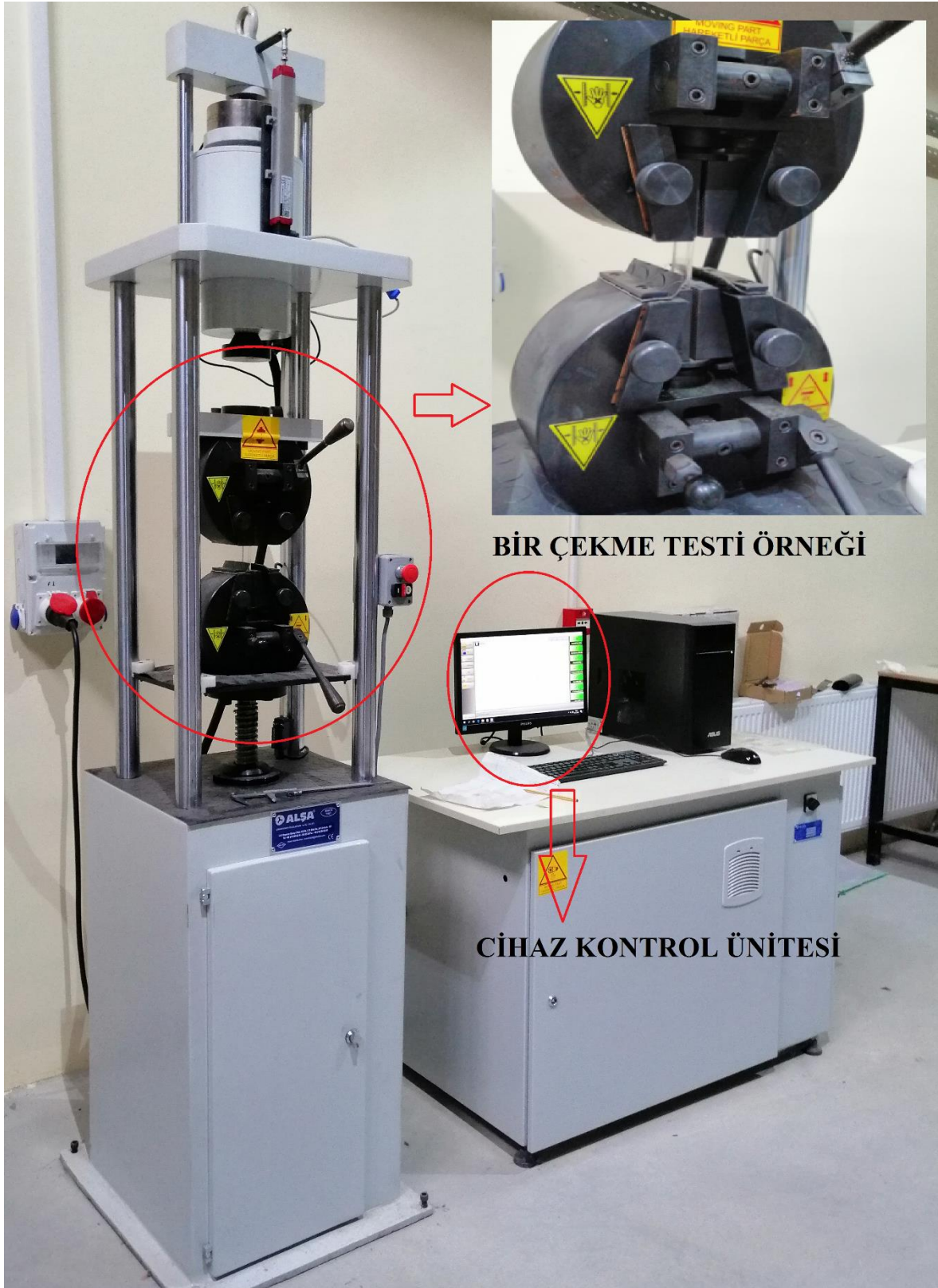


Resim 13. Kütlece %0,5- %1- %2 ve %4 miktarında 80 nm boyutlarındaki silisyum dioksit tanecikleri ile katkılanmış epoksi (Ep/Se = 2/1) numunelerinin dökümü (kütlece %0,25 daha sonra yeniden dökülmüştür)

2.2.3. Çekme testleri

Çekme testi malzemelerin durağan bir yük altında elastik ve plastik şekil değiştirme özelliklerini tespit etmek için yapılan bir testtir. Bu testi yapmak için çekme testi makineleri (Resim 14) kullanılmaktadır. Malzemenin boyutları ve makinenin çekme hızı girildikten sonra makineye verilen çekme komutu bize malzemenin maksimum çekme kuvveti dayanımını ve elastisite (birim kesit alanını bir birim arttırmak için uygulanması gereken birim kuvvet) modülünü verir. Çekme testi makinesi bu verileri hesaplarken bize gerilme-birim şekil değiştirme grafiği çizmektedir. Bu sonuçlar sayesinde hangi malzeme diğerlerinden daha dayanıklı ve hangi malzeme diğerlerinden daha sünek bilgisine erişilebilir.

Çekme testleri Beta Alşa Laboratuvar Cihazları Limitet Şirketinin üretimi olan çekme testi makinesi tarafından yapılmıştır. Tüm testler için sabit 90 000 mm² kesit alanı ve dakikada 10 mm çekme hızı uygulanmıştır.



Resim 14. Çekme testi makinesi

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

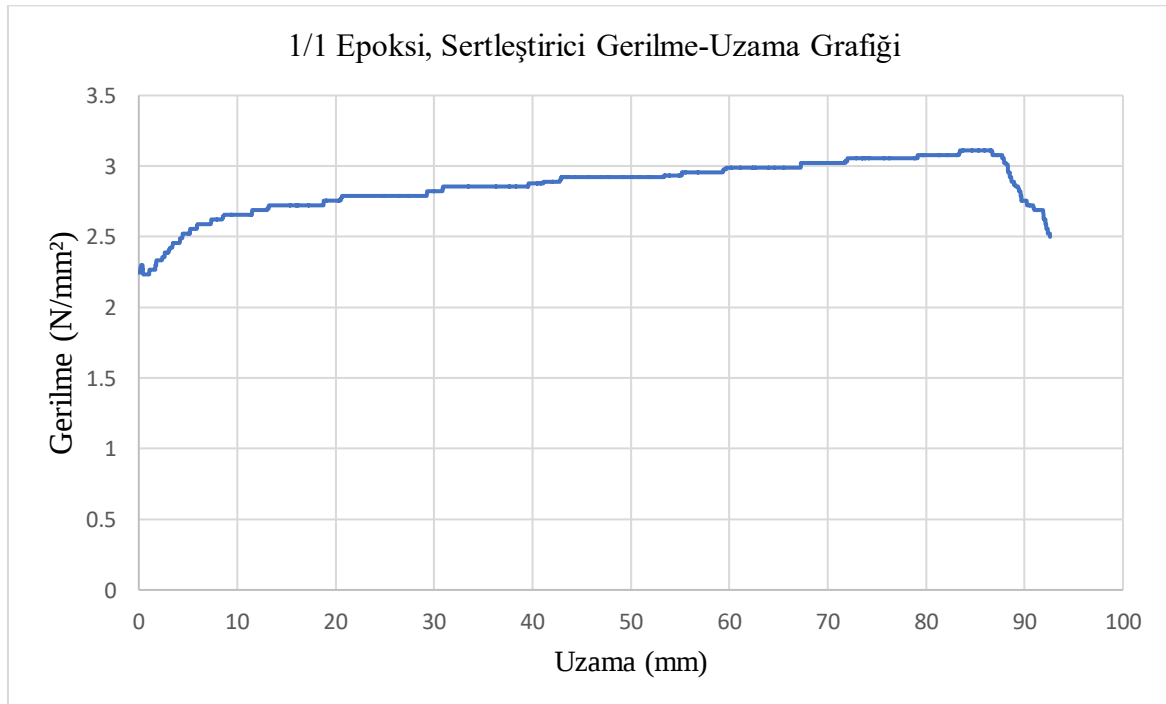
3.1. Epoksi Sertleştirici Oranının Bulunması

3.1.1. 1/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu



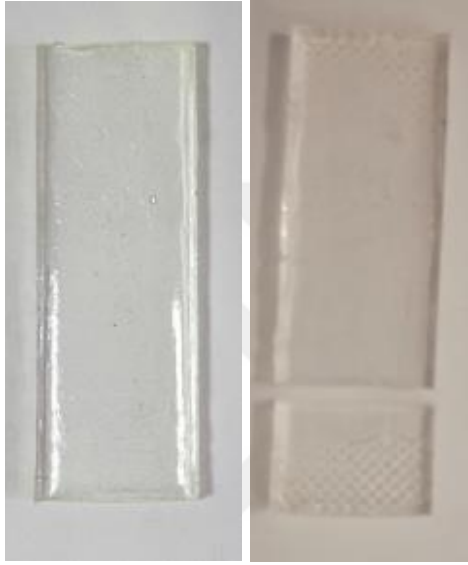
Resim 15. 1/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 9. 1/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu



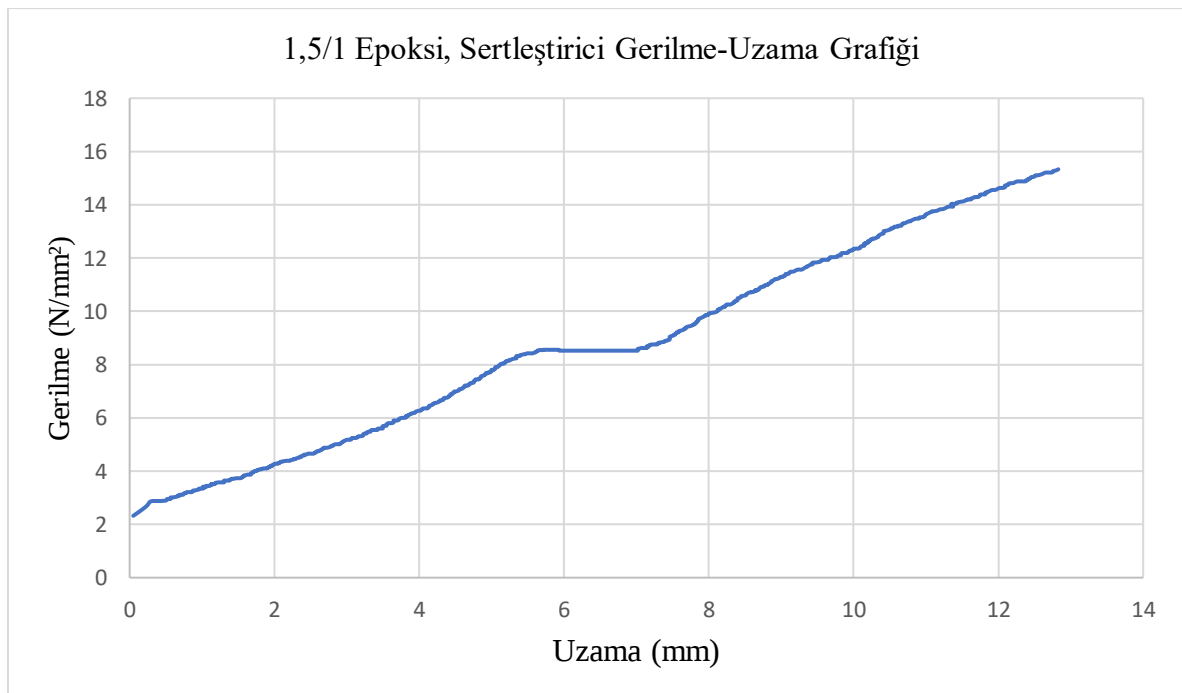
Epoksi ve sertleştirici karışımlarının oranlanması sürecinde 1/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2,3 N/mm² gerilme ile 3,1 N/mm²'lik gerilme arasında 85 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.1.2. 1,5/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu



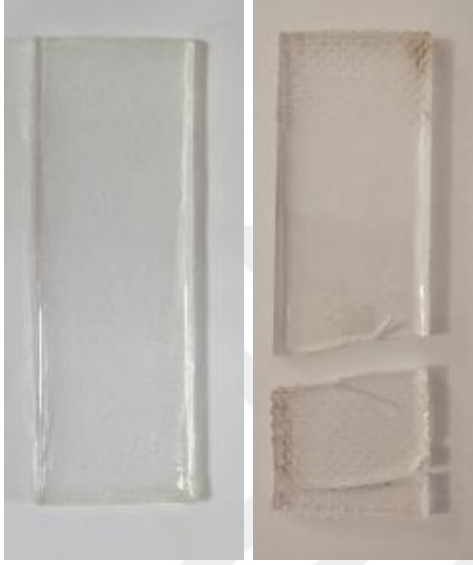
Resim 16. 1,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 10. 1,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu



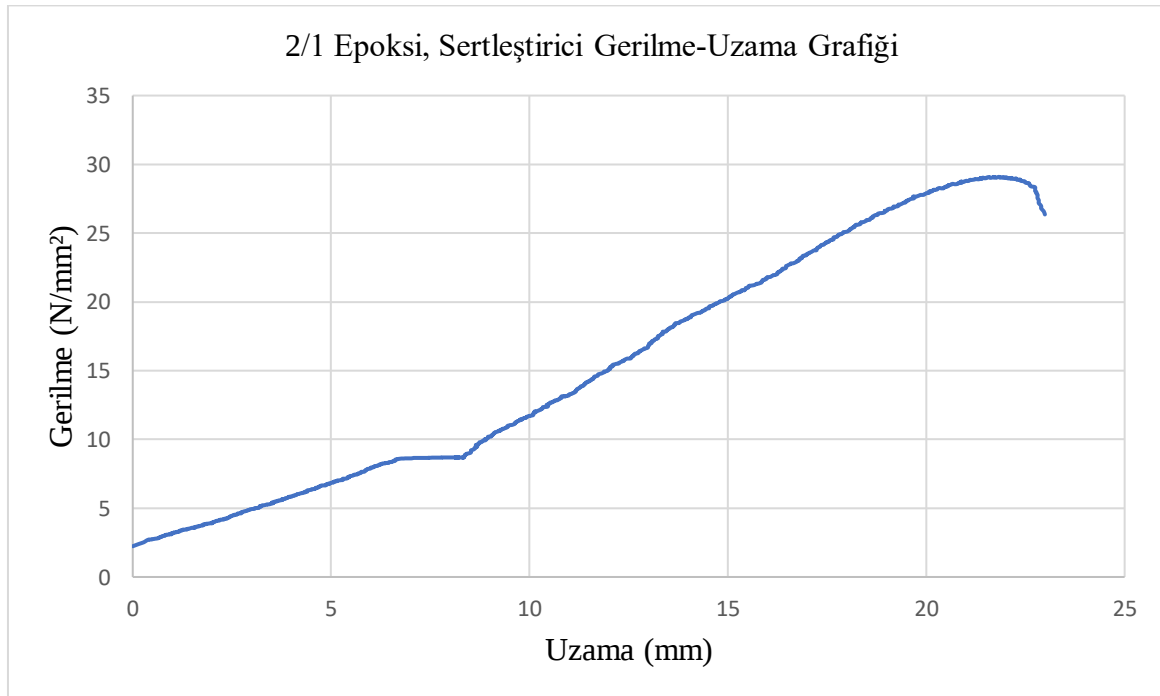
1,5/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2 N/mm² gerilme ile 15 N/mm²'lik gerilme arasında 13 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.1.3. 2/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu



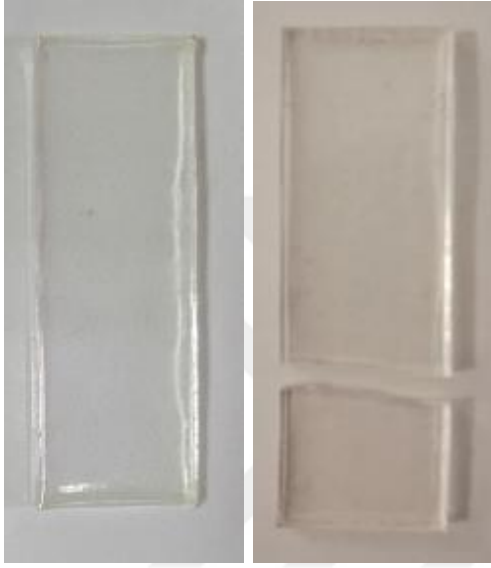
Resim 17. 2/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 11. 2/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu



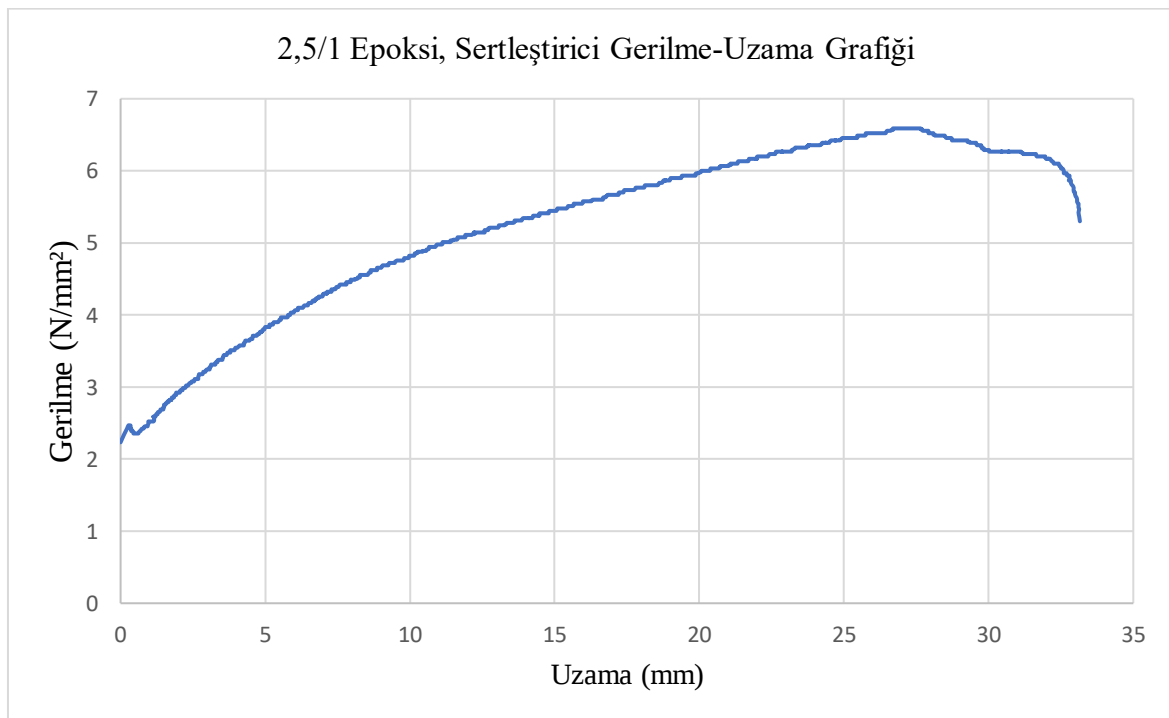
2 /1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2 N/mm² gerilme ile 28 N/mm²'lik gerilme arasında 22 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.1.4. 2,5/1 Epoksi/Sertleştirici oranının çekme testi sonucu



Resim 18. 2,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 12. 2,5/1 oranında Epoksi/Sertleştirici numunesinin çekme testi sonucu



2,5/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2 N/mm² gerilme ile 6,5 N/mm²'lik gerilme arasında 27 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Saf epoksi reçine numuneleri Çizelge 7'de ki epoksi sertleştirici oranlarına göre eşit hacimde ve ebatlarda elde edildikten sonra sırasıyla çekme testine sokulmuştur ve gerilme/uzama grafikleri incelendiğinde optimum değerlere sahip olan epoksi sertleştirici oranı olarak daha yüksek gerilme altında daha düşük uzama gösteren 2/1 oranı kabul edilmiştir. 3/1 oranındaki numune diğer numunelere nazaran çok daha fazla sünek olduğu için çekme testine ihtiyaç duyulmamıştır.

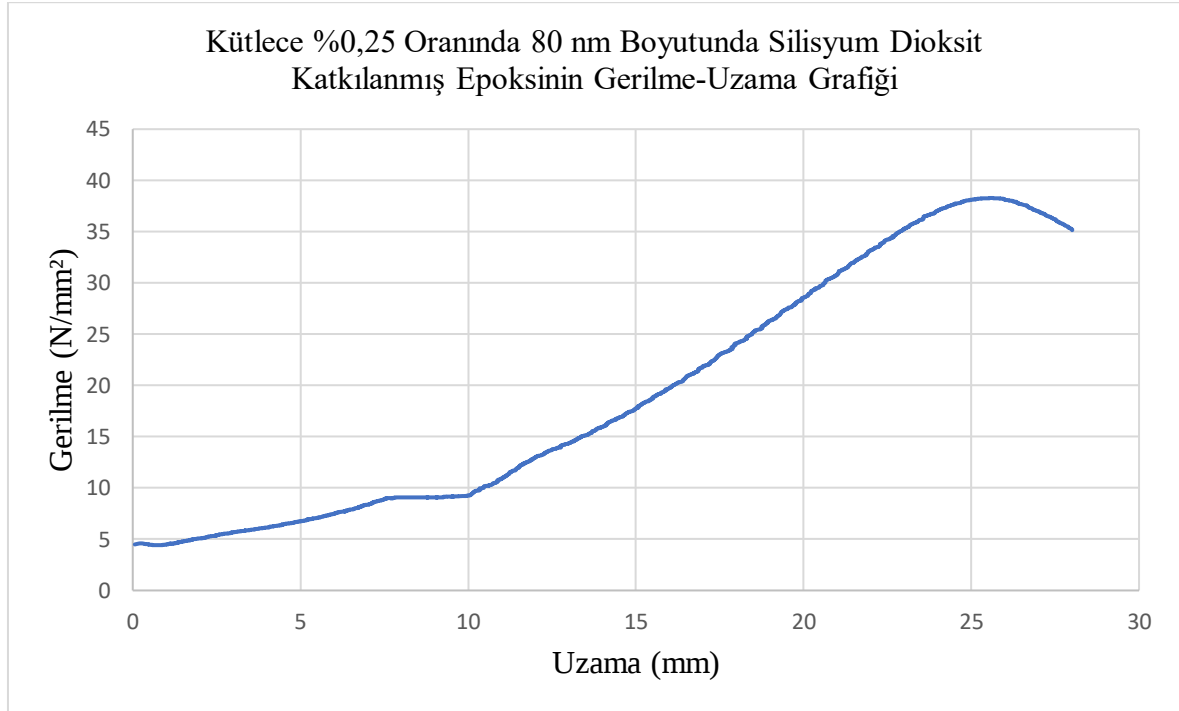
3.2. Kütlece Yüzde Farklı Miktarlarda ve Boyutlarda Silisyum Dioksit Katkılanmış Epoksilerin Çekme Testi Sonuçları

3.2.1. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



Resim 19. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 13. Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



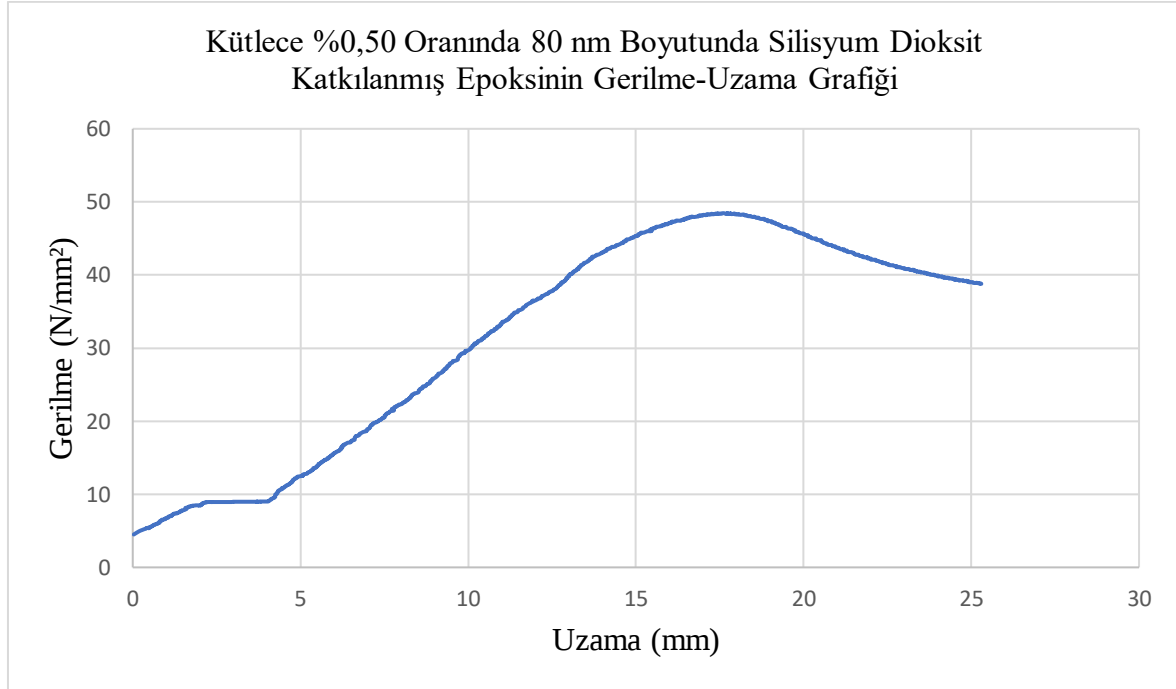
Kütlece %0,25 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 38 N/mm² gerilme arasında 26 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.2. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



Resim 20. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 14. Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



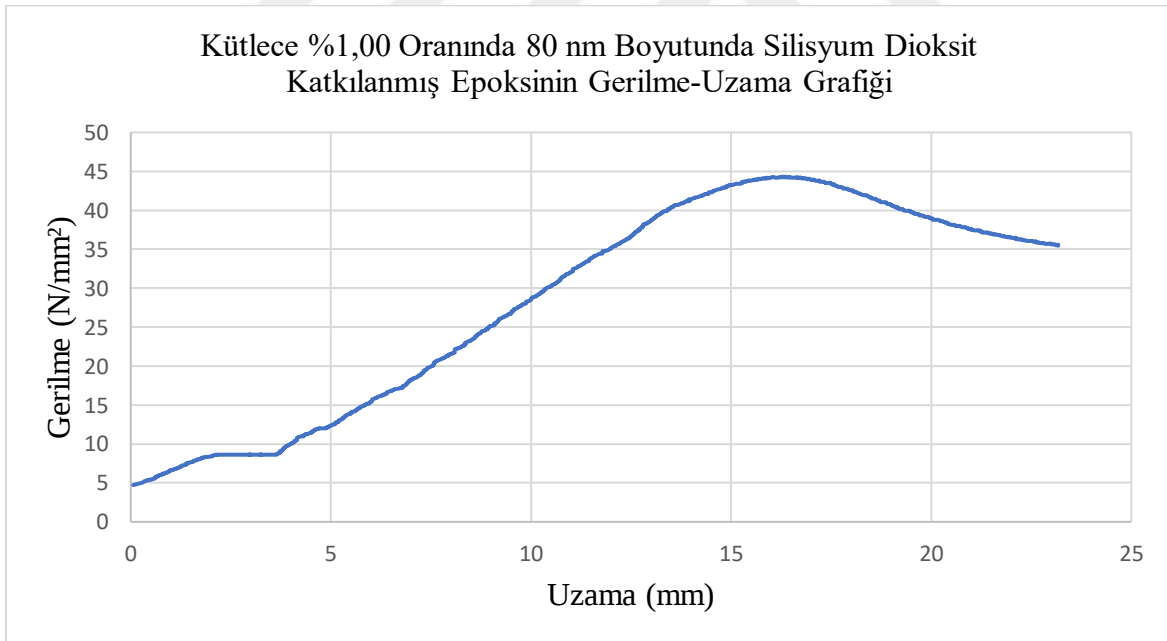
Kütlece %0,50 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 49 N/mm² gerilme arasında 18 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.3. Kütlece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



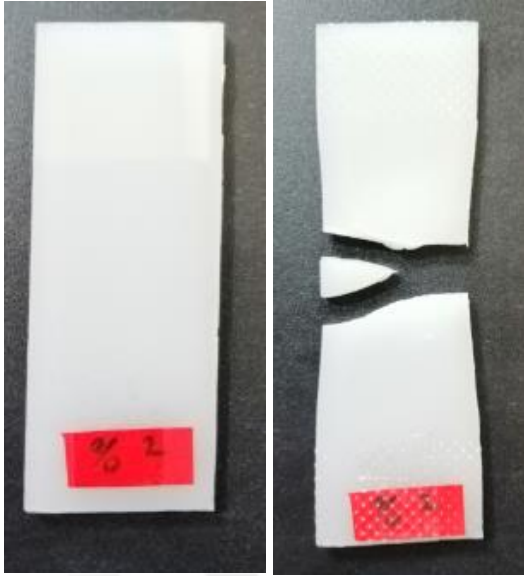
Resim 21. Küttelece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 15. Küttelece %1,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



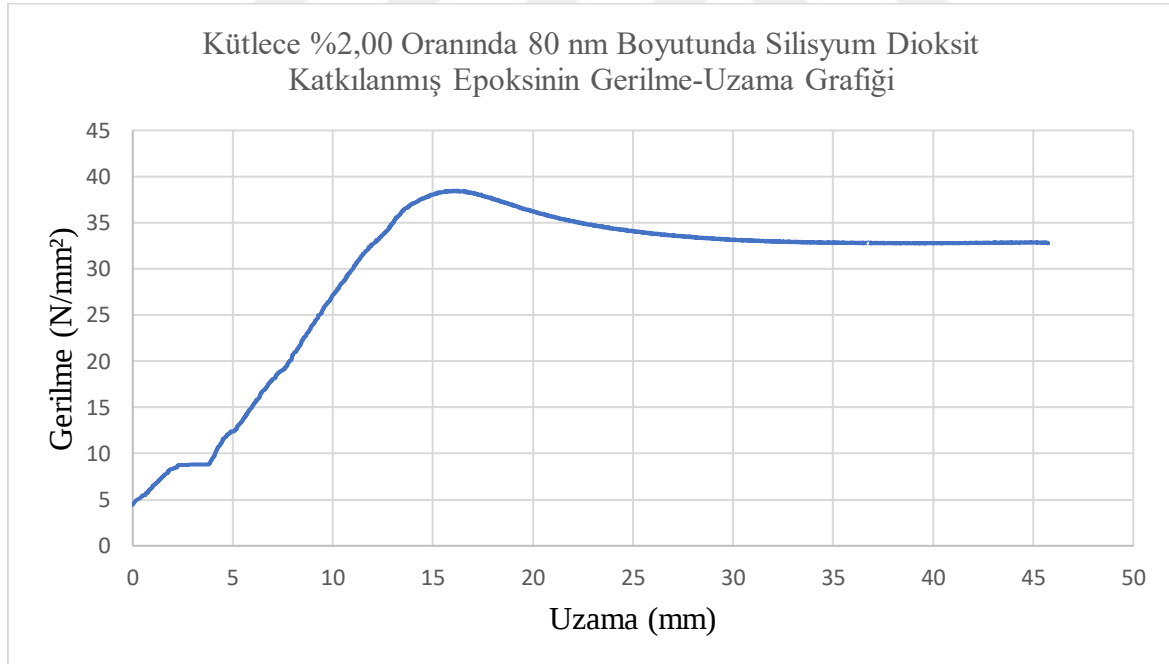
Küttelece %1,00 oranında boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 44 N/mm² gerilme arasında 16 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.4. Küttelece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



Resim 22. Küttelece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 16. Küttelece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



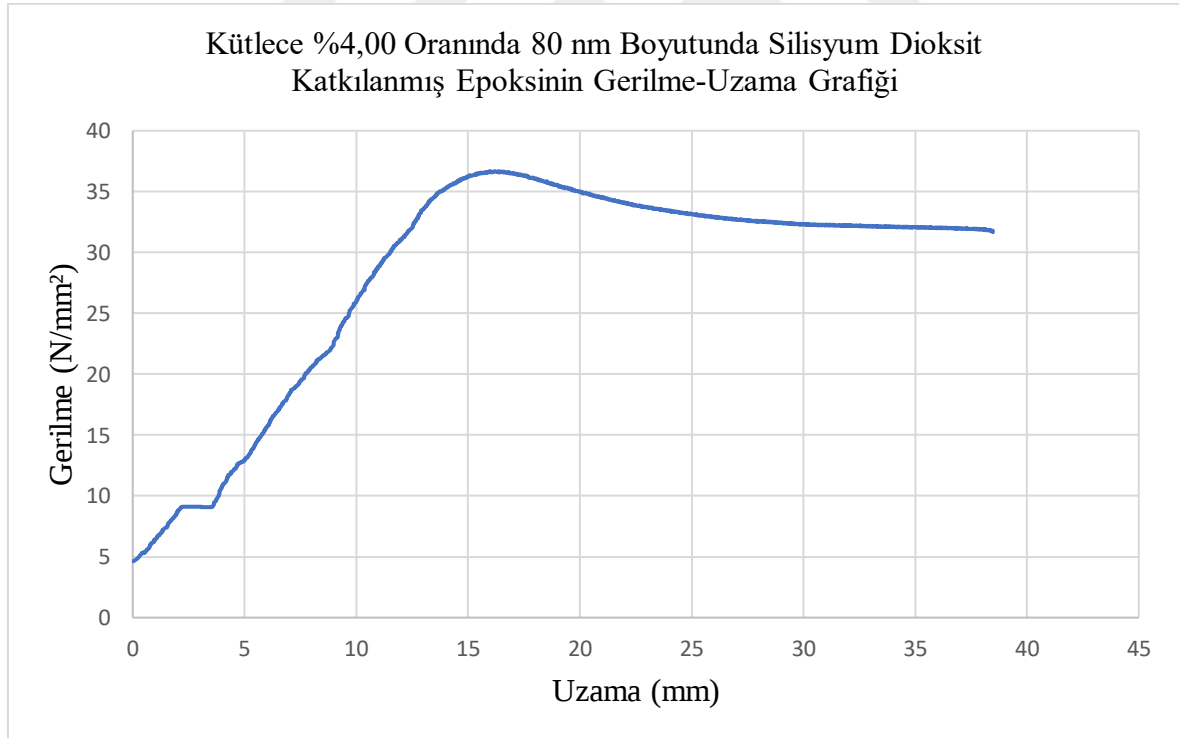
Küttelece %2,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 38 N/mm² gerilme arasında 16 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.5. Küttelece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



Resim 23. Küttelece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

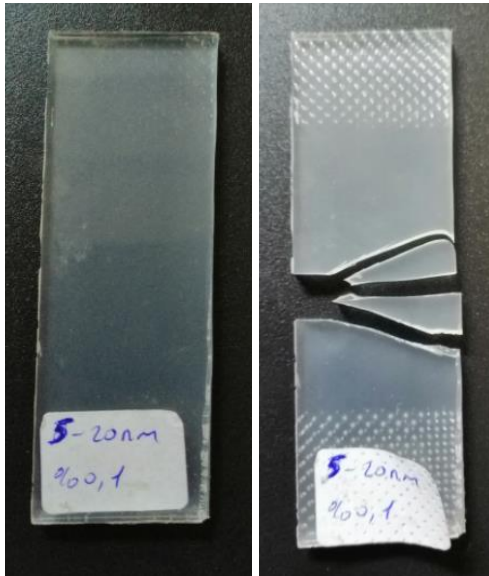
Çizelge 17. Küttelece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



Küttelece %4,00 oranında 80 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 37 N/mm² gerilme arasında 16 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

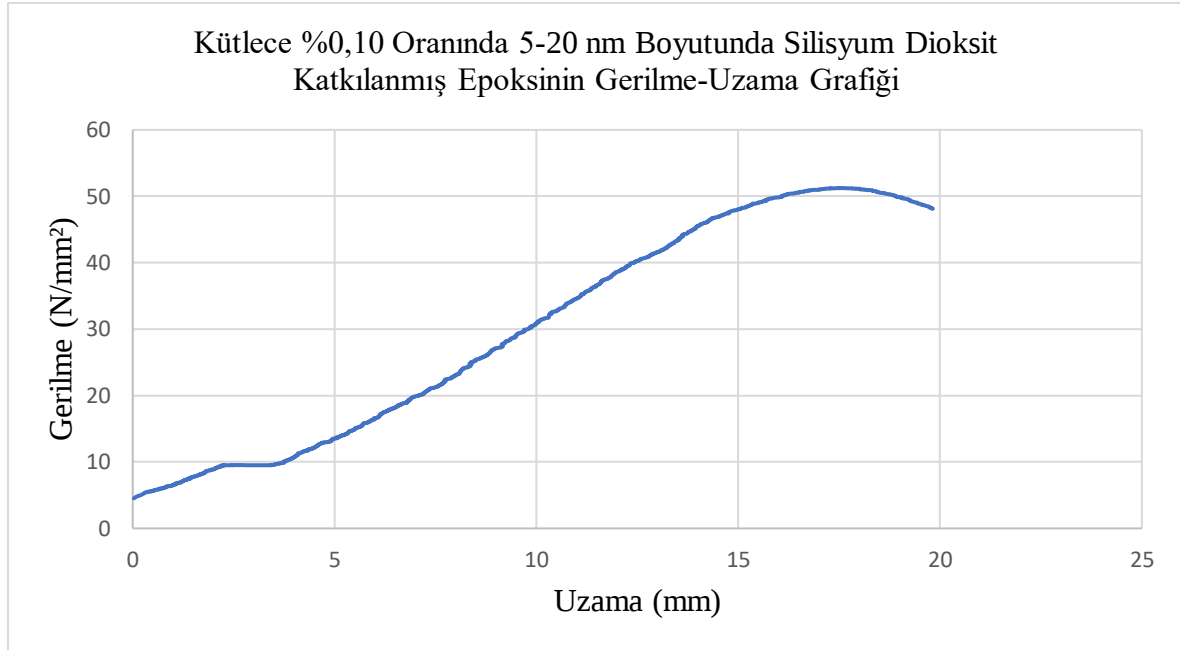
Kütlece %0,25- %0,5- %1- %2- %4 oranında 80 nm SiO₂ ile katkılanan 2/1 oranında epoksi reçine numuneleri sırası ile çekme testine sokuldu ve gerilme-uzama grafikleri incelendi. Sonuçlar karşılaştırıldığında kütlece %0,5'lik katkımanın daha yüksek gerilme altında daha düşük uzama göstererek en iyi sonucu verdiği görüldü.

3.2.6. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



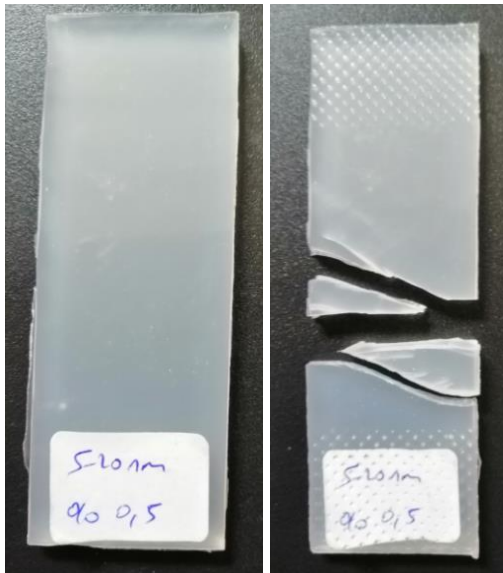
Resim 24. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 18. Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



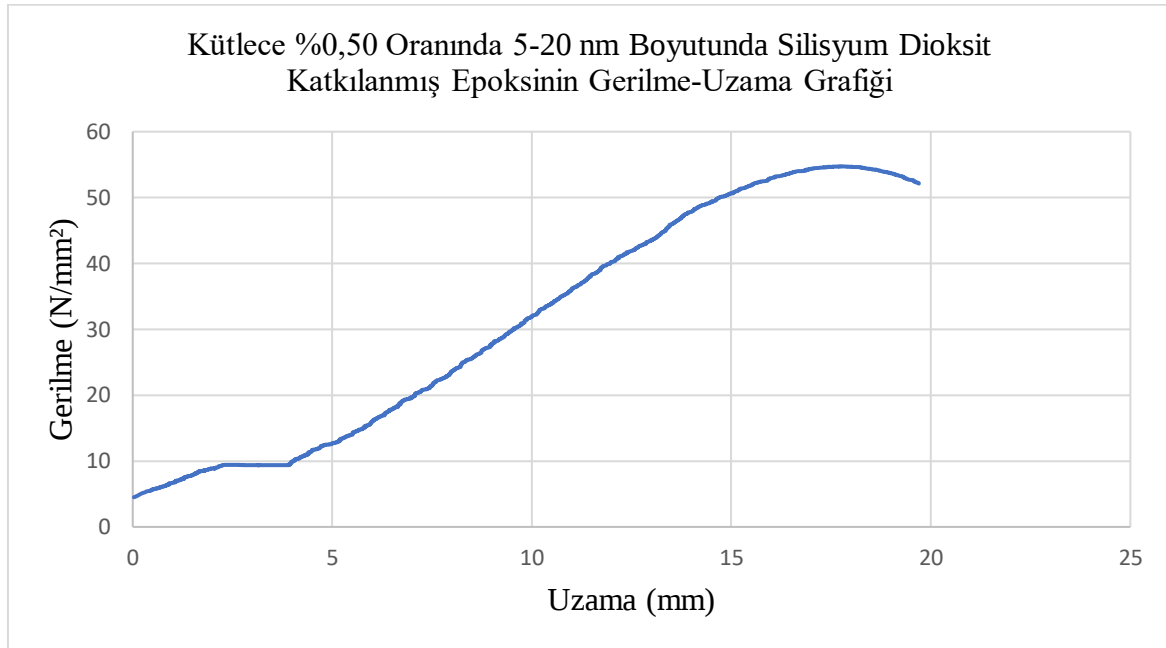
Kütlece %0,10 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 51 N/mm² gerilme arasında 18 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.7. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



Resim 25. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 19. Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu



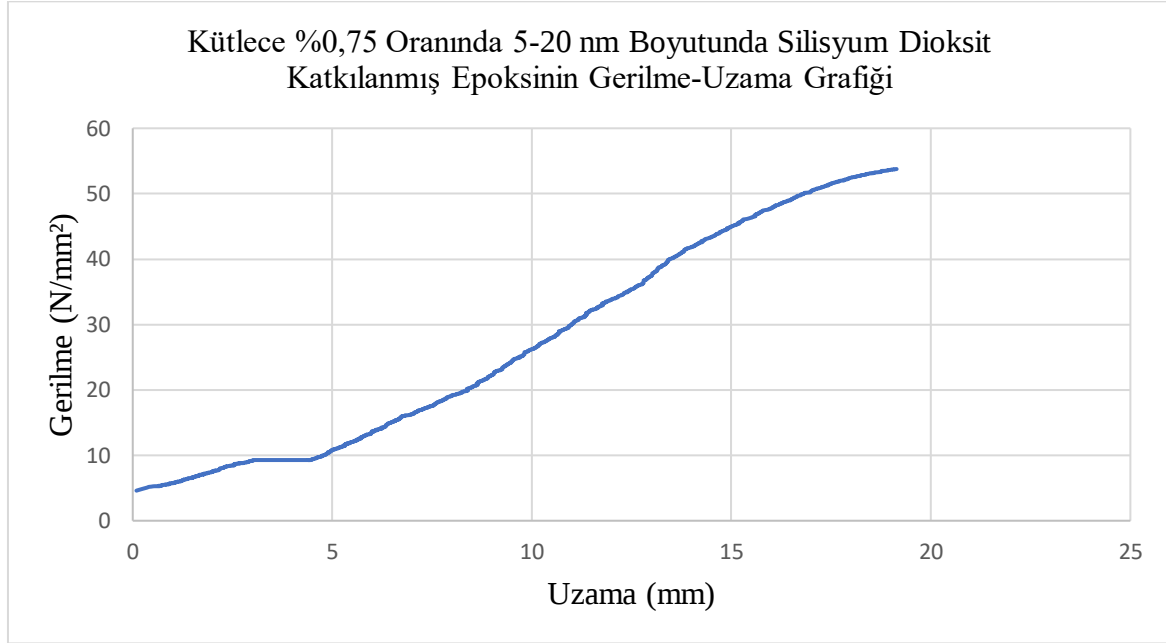
Kütlece %0,50 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 55 N/mm² gerilme arasında 18 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2.8. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksi



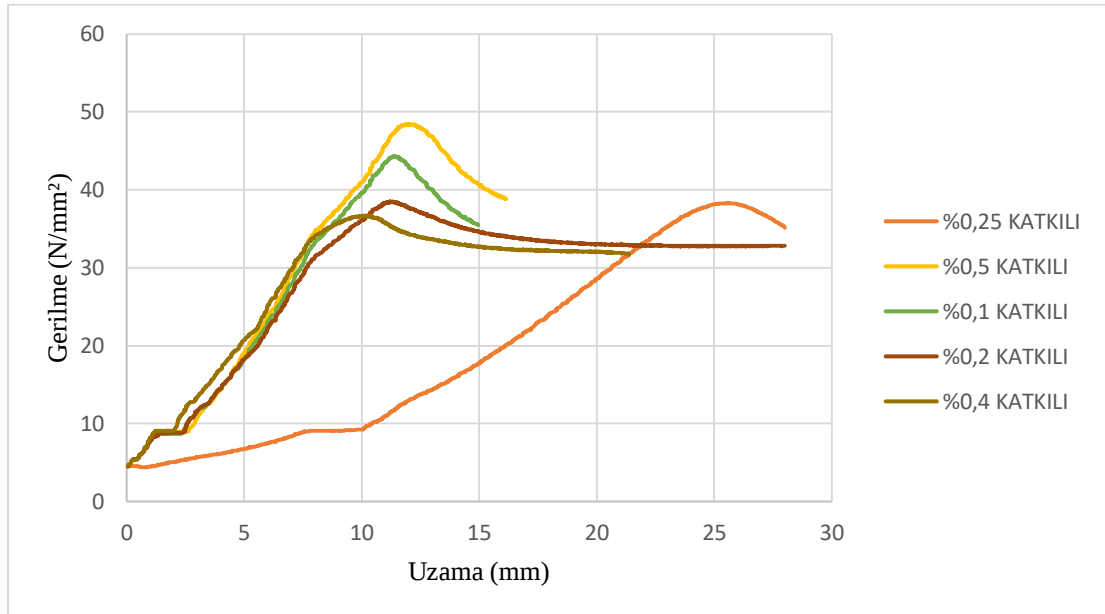
Resim 26. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi öncesi ve sonrası

Çizelge 20. Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucu

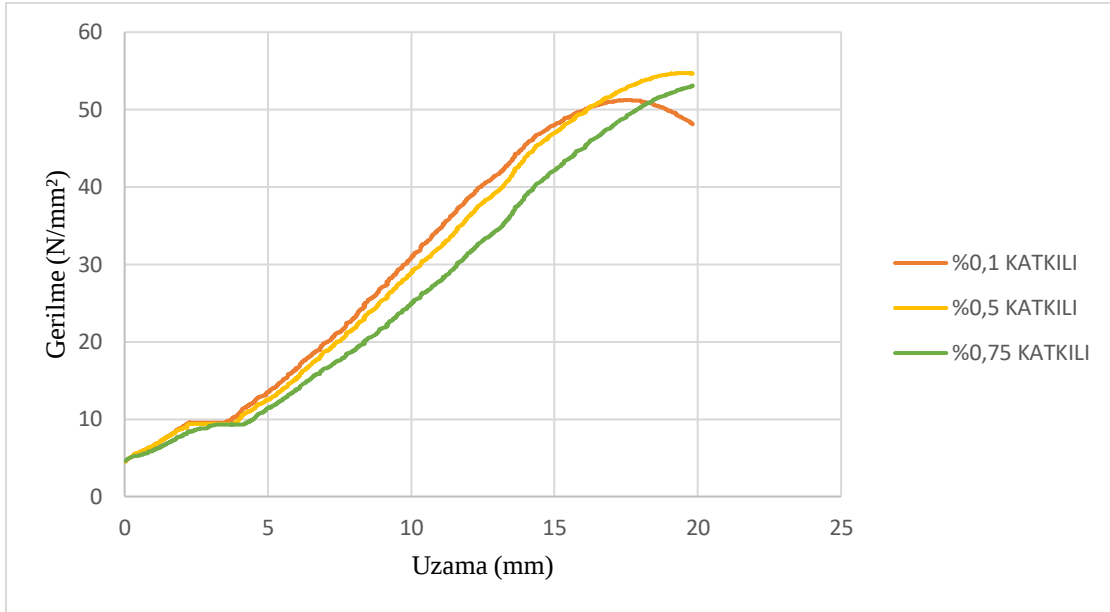


Kütlece %0,75 oranında 5-20 nm boyutunda silisyum dioksit katkılanmış epoksinin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 5 N/mm² gerilme ile 53 N/mm² gerilme arasında 19 mm’lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 21. 80 nm SiO₂ Katkılı Epoksi Malzemelerinin Gerilme/Uzama Grafiği



Çizelge 22. 5-20 nm SiO₂ Katkılı Epoksi Malzemelerinin Gerilme/Uzama Grafiği



Silisyum dioksit katkısı sonucunda epoksi malzemesinin mukavemet değerlerindeki değişimin incelenmesi üzerine yapılan bu çalışmada ilk etapta epoksi/sertleştirici oranlarının çekme testi sonuçlarına göre:

- 1/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2,3 N/mm² gerilme ile 3,1 N/mm²'lik gerilme arasında 85 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- 1,5/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2 N/mm² gerilme ile 15 N/mm²'lik gerilme arasında 13 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- 2/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık

2 N/mm² gerilme ile 28 N/mm²'lik gerilme arasında 22 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

- 2,5/1 oranında epoksi sertleştirici karışımından elde edilen numunenin çekme testi sonucunda kopma noktası referans alınarak gerilme/uzama grafiğine göre yaklaşık 2 N/mm² gerilme ile 6,5 N/mm²'lik gerilme arasında 27 mm'lik uzama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- 3/1 oranında epoksi sertleştirici karışımı çekme testi yapılamayacak kadar sünek bir durumda olduğu için yapılmasına gerek duyulmamıştır.

İkinci etapta 80 nm boyutunda kütlece yüzde 0,25- 0,50- 1- 2- 4 silisyum dioksit katkılanan 2/1 oranında epoksi/sertleştirici malzemelerinin ve 5-20 nm boyutunda kütlece yüzde 0,10- 0,50- 0,75 oranında silisyum dioksit katkılanan 2/1 oranında epoksi/sertleştirici malzemelerinin Çizelge 21 ve Çizelge 22'deki çekme dayanımları incelendiğinde elde edilen verilere göre:

- SiO₂ ile katkılanan epoksiler de hem de 5-20 nm boyutunda SiO₂ ile katkılanan epoksiler de kütlece %0,5 oranındaki katkılama miktarı gerilme-uzama grafiklerine bakılarak diğer katkılama oranlarına göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca boyutu 5-20 nm boyutundaki SiO₂ tanecikleri ile katkılanan epoksi reçinelerinin 80 nm boyutundaki SiO₂ tanecikleri ile katkılanan epoksi reçinelerine göre daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H.-M., Bai, J., (2002). Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite, *Composites Science and Technology*, 62, 1993-8.
- Baillie, C, (2004). *Green composites: polymer composites and the environment*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 308.
- Basara, C., Yilmazer, U., Bayram, G., (2005). Synthesis and characterization of epoxy based nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 98, 1081-6.
- Chan M.-l., Lau K.-t., Wong T.-t., Ho M.-p., Hui, D., (2011). Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite, *Composites Part B: Engineering*, 42, 1708-12.
- Chawla, K.K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* Springer Science & Business Media New York, 32, 348-363.
- Drzal, L.T. (2005). *The interphase in epoxy composites*, Department of Chemical Engineering, Center for Composite Materials and Structures, Michigan State

University. Epoxy Resins and Composites II 1-32.

Erarslan, M.K., Cankurt, T., Sunar, M.F., Çoban, Ş., İnci, Ü., Aras, İ., Sarı, K.C., Büyük, E.,

Damyan, B. (2017). Karbon Fiber Kompozit Tüplerin Tasarımı, İmalatı ve Enerji Sönümleme Performanslarının Karşılaştırılması. Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi.

García, del Cid M., Prolongo, M., Salom, C., Sánchez-Cabezudo, M., Masegosa, R., (2014). Influence of different organoclays on the curing, morphology, and dynamic mechanical properties of an epoxy adhesive, *The Journal of Adhesion*, 90, 817-34.

Gibson, G. (2017), *Epoxy Resins*, *Brydson's Plastics Materials*, 8, 773-797.

Groover, M. P. (2019). *Modern İmalatın Prensipleri*. M. Yurdakul, Y.T. İç, (çev.). Ankara: NOBEL Akademik Yayıncılık.

Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Fiedler, B., Schulte, K., (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, *Composites Science and Technology*, 65, 2300–2313.

Jaafar, J., Siregar, J.P., Salleh, S.M., Hamdan, M.H.M., Cionita, T., Rihayat, T., (2019). Important Considerations in Manufacturing of Natural Fiber Composites: A Review, *Korean Society for Precision Engineering. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6, 647–664.

Jojibabu, P., Zhang, YX. and Prusty BG. (2020). A review of research advances in epoxy based nanocomposites as adhesive materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 96, 102454.

Kahraman, R., Sunar, M., Yilbas, B., (2008). Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive, *Journal of Materials Processing, Technology* 205, 183-189.

Kanerva, R. L., Elsner, P., Wahlberg, J.E., Maibach, H.I. (2013). *Epoksi Resins, Handbook of Occupational Dermatology*, Springer Science & Business Media, 32.

Kim, B.C., Park, S.W., (2008). Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite, *Composite structures*, 86, 69-77.

Kinloch, A., Shaw, S., Tod, D., Hunston, D., (1983). Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 1. Microstructure and fracture studies, *Polymer*, 24, 1341-54.

Krause, W.R., Park, S.H., Straup, R.A., (1989). Mechanical-properties of bis-GMA resin short glass–fiber composites. *Journal of Biomedical Materials Research*, 23, 1195–211.

Kuriger, R., Alam, M.K., Anderson, D.P., Jacobsen, R.L., (2002). Processing and

- characterization of aligned vapor grown carbon fiber reinforced polypropylene, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 53-62.
- Lamotte, E.D. And Perry, A.J. (1970). Diameter And Strain-Rate Dependence Of The Ultimate Tensile Strength And Young's Modulus Of Carbon Fibres, *Brown Boveri Research Center, Fibre Science and Technology*, 3, 157-166.
- Lindgaard, E., Lund, E., (2011). Optimization formulations for the maximum nonlinear buckling load of composite structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(5), 631-646.
- Mahfuz, H., Adnan, A., Rangari, V.K., Jeelani, S., Jang, B.Z., (2004). Carbon nanoparticles/whiskers reinforced composites and their tensile response, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 519-527.
- Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T., (2005). *Naturalfibers, biopolymers, and biocomposites*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 896.
- Murray, R.E., Beach, R., Barnes, D., Snowberg, D., Berry, D., Rooney, S., Jenks, M., Gage, B., Boro, T., Wallen, S., Hughes, S. (2020). Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade, *Journal Pre-proof*, 164, 1100-1107.
- Nachikethas, K., Manoj, P., (2013). Mechanical and Adhesive Performance of Nanoclay Reinforced Epoxy Resin, *ICMF*.
- Narita, Y., Turvey, G.J., (2004). Maximizing the buckling loads of symmetrically laminated composite rectangular plates using a layerwise optimization approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(7), 681-691.
- Nikbakt, S., Kamarian, S., Shakeri, M., 2018. A Review on Optimization of Composite Structures Part I: Laminated Composites, *Accepted Manuscript*, 195, 158-185.
- Oksman, K., (2000). Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic. *Applied Composite Materials*, 7, 403–14.
- Omar Faruk, Andrzej, K., Bledzki, Fink, H.P. and Sain M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers, *Progress in Polymer Science*, 37, 1552-1596.
- Pham, H.Q., Mark, M.J. (2005). Epoksi Resins, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley Online Library, 156-244.
- Prewo, K.M., (1986). Tailoring multiphase and composite ceramics, *Materials science research*, 20, 529.
- Saraç, İ., Adin, H., Temiz, Ş., (2018). Experimental determination of the static and fatigue

- strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles, *Composites Part B: Engineering*, 155, 92-103.
- Tszeng, T.C., (1998). The effects of particle clustering on the mechanical behavior of particle reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, 29, 299-308.
- Tvergaard, V., (1990). Analysis Of Tensile Properties For A Whisker-Reinforced Metal-Matrix Composite, Department Of Solid Mechanics, *Acta Metallurgica et Materialia*, 38, 185-194.
- Zhai, L., Ling, G., Li, J., Wang, Y., (2006). The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive, *Materials Letters*, 60, 3031-3.
- Zhao, H., Li, R.K., (2008). Effect of water absorption on the mechanical and dielectric properties of nano-alumina filled epoxy nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 602-11.
- Zhou, H., Liu, H.-Y., Zhou, H., Zhang, Y., Gao, X., Mai, Y.-W., (2016). On adhesive properties of nano-silica/epoxy bonded single-lap joints, *Materials & Design*, 95, 212-8.
- Weissenbek, E., Bohm, H.J., Rammerstorfer, F.G., (1994). Micromechanical investigations of arrangement effects in particle reinforced metal matrix composites. *Comput. Mater. Sci.* 3, 263–278.
- Xu, H.H.K., Smith, D.T., Simon, C.G., (2004). Strong and bioactive composites containing nano-silica-fused whiskers for bone repair. *Biomaterials*, 25, 4615–26.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Muhammet Kerim Erarslan

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

- 1-) Hidrojen Gaz Kaynağı Makinesi Projesi. Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
- 2-) Rampadan Elektrik Enerjisi Üretimi Projesi. Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.

3-) 3 Boyutlu Yazıcı Yapımı Projesi. Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.

4-) Erarslan, M.K., Cankurt, T., Sunar, M.F., Çoban, Ş., İnci, Ü., Aras, İ., Sarı, K.C., Büyük, E., Damyan, B. (2017). Karbon Fiber Kompozit Tüplerin Tasarımı, İmalatı ve Enerji Sönümlene Performanslarının Karşılaştırılması. Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi.

5-) Erarslan, M. K., & Semiz, L. (2022). Tensile Strength Enhancement of An Epoxy System by SiO₂ Addition. Journal of Engineering Research and Applied Science, 11(1), 2008-2014.

