



**POLİMER MATRİS KOMPOZİT MALZEMELERDE ÇEŞİTLİ BOR
BİLEŞİKLERİNİN KATKISININ MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLER
ÜZERİNE ETKİSİ**

Merve BİLGE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi 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 kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Merve BİLGE

12/07/2023

POLİMER MATRİS KOMPOZİT MALZEMELERDE ÇEŞİTLİ BOR BİLEŞİKLERİNİN KATKISININ MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Merve BİLGE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Bu çalışmada karbon fiber kompozit malzemelerin mekanik dayanıklılığını ve termal özelliklerini iyileştirmek amacıyla hegzagonal bor nitrür ve çinko borat bileşikler farklı oranlarda (%0,5 , %1 , %1,5) kullanılarak hazırlanan termoset epoksi reçine vakum infüzyon yöntemi ile karbon fiber kumaşlara emdirilmiştir. Kurlenme sonrası elde edilen karbon fiber kompozit plakalardan CNC tezgahı ile çekme testi için ASTM 3039, eğme testi için ASTM D790 standartlarına göre numuneler hazırlanmıştır. Yapılan çekme, eğme testi sonuçlarına göre katkısız kompozit plakada ortalama çekme gerilmesi 628,75 iken %1,5 çinko borat katkılı plakada 748,84MPa iken %1,5 hBN katkılı plakada ise 872,41MPa sonucu elde edilmiştir. Eğme gerilmesi değeri katkısız numunede 686,51MPa iken %1,5 çinko borat katkılı plakada 708,42MPa, %1,5hBN katkılı plakada ise 911,93MPa değerine ulaşılmıştır. Borlu bileşikler kıyaslandığı zaman mekanik dayanım değeri hBN de daha yüksek olduğu görülmektedir. hBN mekanik özellikler doğrultusunda daha etkili olmuştur. XRD sonuçlarına bakıldığında bor bileşiklerin katkı oranlarına bağlı olarak kristal çinko borat ve hegzagonal bor nitrür piklerinin olduğu görülmektedir. Diferansiyel termal analiz testinde (DTA-TG) sonuçlara bakıldığında kütle değişim oranlarının katkı oranları ile tersine özellik göstermektedir. Referans numunede kütle kaybı %47,8 iken %1,5 hBN katkısı ile kütle kaybı ise %38,7 , %1,5 çinko borat katkısı ile kütle kaybı %36,4 olarak ölçülmüştür. Limit oksijen indeks (LOI) testinde çinko borat katkısında katkı oranı arttıkça LOI değerinde de artış görülmüştür. Referans numune LOI değeri %25,6 iken %1,5 çinko borat katkısı ile LOI değeri %26,6 değerinde ölçülmüştür. Yapılan tüm çalışmalar sonucunda hegzagonal bor nitrür ve çinko borat katkısının mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Termal özelliklerine bakıldığında çinko borat katkısının LOI değerinde katkı oranına bağlı olarak artış sağlamış, DTA-TG sonuçlarında bor katkısına bağlı olarak ters orantılı bir değişim görülmüştür.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : Bor, vakum infüzyon, epoksi, karbon fiber kompozit, termal
Sayfa Adedi : 59
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK

THE EFFECT OF ADDITIVES OF VARIOUS BORON COMPOUNDS ON
MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF POLYMER MATRIX
COMPOSITE MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Merve BİLGE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

In this study, in order to improve the mechanical strength and thermal properties of carbon fiber composite materials, hexagonal boron nitride and zinc borate compounds were used in different ratios (0,5%, 1%, 1.5%), and thermoset epoxy resin was impregnated into carbon fiber fabrics by vacuum infusion method. From the carbon fiber composite plates obtained after curing, samples were prepared by CNC machine according to ASTM 3039 for tensile test and ASTM D790 for bending test. According to the results of the tensile and bending test, the average tensile stress was 628.75 in the undoped composite plate, while it was 748.84MPa in the 1.5% zinc borate added plate, while it was 872.41MPa in the 1.5% hBN added plate. While the bending stress value was 686.51MPa in the undoped sample, it was 708.42MPa in the 1.5% zinc borate added plate and 911.93MPa in the 1.5%hBN added plate. When the boron compounds are compared, it is seen that the mechanical strength value is higher in hBN. hBN was more effective in terms of mechanical properties. When the XRD results are examined, it is seen that crystalline zinc borate and hexagonal boron nitride peaks are formed depending on the additive ratios of the boron compounds. When the results of the differential thermal analysis test (DTA-TG) are examined, the mass change ratios show the opposite feature with the contribution ratios. While the mass loss in the reference sample was 47.8%, the mass loss was 38.7% with the 1.5% hBN additive, and 36.4% with the 1.5% zinc borate additive. In the limit oxygen index (LOI) test, an increase was observed in the LOI value as the additive ratio increased in the zinc borate additive. While the LOI value of the reference sample was 25.6%, the LOI value was measured at 26.6% with the addition of 1.5% zinc borate. As a result of all the studies, it was seen that the hexagonal boron nitride and zinc borate additives improved the mechanical properties. Considering its thermal properties, the LOI value of the zinc borate additive increased depending on the additive ratio, and an inversely proportional change was observed in the DTA-TG results depending on the boron additive.

Science Code : 91512

Key Words : Boron, vacuum infusion, epoxy, carbon fiber composite, thermal

Page Number : 59

Supervisor : Asst. Prof. Ali ÖZGEDİK

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimimin her aşamasında desteğini benden esirgemeyen, tecrübesi, bilgi birikimi ve kıymetli zamanını benimle paylaşan, tezin düzenlenmesinde ve değerlendirilmesinde her türlü katkıda bulunan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK'e teşekkür ederim. Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmaları bünyesinde yürüttüğüm, gerekli malzemelerin tedarikini ve analizlerin yapılmasını sağlayan Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Bor Araştırma Enstitüsü'ne teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, hayatımın her döneminde yanımda olan ve benimle daima gurur duyan tüm aile üyelerime, çok sevdiğim babama, anneme ve ablama gösterdikleri sabır, sevgi, özveri ve anlayış için teşekkür ediyor, bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1. Kompozit Malzemelerin Matris Fazına Göre Sınıflandırılması.....	6
2.1.1. Seramik matrisli kompozitler (SMK)	7
2.1.2. Metal matrisli kompozitler (MMK).....	7
2.1.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK).....	7
2.2. Kompozit Malzemelerin Takviye Fazına Göre Sınıflandırılması	12
2.2.1. Karbon elyaf	12
2.2.2. Cam elyaf.....	13
2.2.3 Aramid elyaf	14
2.2.4. Bor elyaf	15
2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	16
2.3.1. El yatırma yöntemi	16
2.3.2. Püskürtme yöntemi	16
2.3.3. Filament sarım yöntemi	17
2.3.4. Reçine transfer kalıplama	18

	Sayfa
2.3.5. Vakum infüzyon yöntemi	19
2.3.6. Enjeksiyon kalıplama yöntemi	20
2.3.7. Otoklav yöntemi	21
2.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanları	22
3. BOR	23
3.1. Bor Nedir?	23
3.2. Borun Kullanım Alanları.....	23
3.3. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN).....	23
3.4. Çinko Borat	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
4.1. Kullanılan Malzemeler	25
4.2. Yöntem.....	25
4.2.1. Reçine içerisine partikül takviyesi.....	25
4.2.2. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi	26
4.2.3. Plakaların test ve karakterizasyon için hazırlanması ve sonuçların değerlendirilmesi.....	29
4.3. Karakterizasyon İşleminde Kullanılan Testler ve Ölçümler	31
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	35
5.1. Bor Bileşiklerinin Tane Boyutu Analizi	35
5.2. Çekme ve Eğme Test Analizi.....	37
5.3. Limit Oksijen İndeksi (LOI)	46
5.4. X-Işını Kırınım Spektroskopisi (XRD).....	48
5.5. Diferansiyel Termal Analiz (DTA-TG)	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
Çizelge 2.2. Termoset ve termoplastik polimer özellikleri.....	12
Çizelge 4.1.Partikül takviyesi olarak kullanılan bor oranları	25
Çizelge 4.2. Reçine hesaplama parametresi.....	26
Çizelge 5.1. Bor katkısız kompozit numune çekme testi sonuçları	37
Çizelge 5.2. %0,5 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları	38
Çizelge 5.3. %1 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları	38
Çizelge 5.4. %1,5 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları	38
Çizelge 5.5. %0,5 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi.....	39
Çizelge 5.6. %1 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi.....	40
Çizelge 5.7. %1,5 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi.....	40
Çizelge 5.8. Bor katkısız kompozit numune eğme testi sonuçları	42
Çizelge 5.9. %0,5 hegzagonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi	42
Çizelge 5.10. %1 hegzagonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi	43
Çizelge 5.11. %1,5 hegzagonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi	43
Çizelge 5.12. %0,5 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi	44
Çizelge 5.13. %1 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi	44
Çizelge 5.14. %1,5 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi	45
Çizelge 5.15. LOI'ye göre alev geciktirici malzemelerin sınıflandırılması.....	46
Çizelge 5.16. Çinko borat katkılı plaka LOI sonucu	47
Çizelge 5.17. Kompozit plakalar DTA-TG analiz sonucu.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit malzemeler fiber matris gösterimi	5
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerinin sınıflandırılması	6
Şekil 2.3. Polimerizasyon işlem şeması	9
Şekil 2.4. (a) lineer, (b) dallanmış, (c) çapraz bağlı, (d) ağ şeklinde	10
Şekil 2.5. El ile yatırma yöntemi ile kompozit üretimi	16
Şekil 2.6. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi	17
Şekil 2.7. Filament sarma yöntemi ile kompozit üretimi	18
Şekil 2.8. RTM ile kompozit üretimi	19
Şekil 2.9. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi	20
Şekil 2.10. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi	21
Şekil 2.11. Otoklav yöntemi ile kompozit üretimi	22
Şekil 4.1. Plaka boyut gösterimi	26
Şekil 4.2. Vakum infüzyon üretim uygulaması	28
Şekil 5.1. hBN tane boyutu analizi	35
Şekil 5.2. Çinko borat tane boyutu analizi	36
Şekil 5.3. ASTM D3039 Çekme testi numunesi	37
Şekil 5.4. hBN Çekme testi sonucu	39
Şekil 5.5. Çinko borat çekme testi sonucu	41
Şekil 5.6. ASTM D790 Eğme test numunesi	42
Şekil 5.7. hBN Eğme testi sonucu	44
Şekil 5.8. Çinko borat eğme testi sonucu	45
Şekil 5.9. LOI testinin şematik gösterimi	46
Şekil 5.10. Çinko borat limit oksijen indeksi	47
Şekil 5.11. Çinko borat katkılı plakaya ait XRD deseni	48
Şekil 5.12. hBN katkılı plakaya ait XRD deseni	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Bor katkılı plakalara ait DTA-TG sonucu	50
Şekil 5.14. Bor katkı oranlarına bağlı referans kütle değerleri	51

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kompozit malzeme uygulama alanları	22
Resim 3.1. Hegzagonal Bor Nitrür	24
Resim 3.2. Çinko Borat.....	24
Resim. 4.1. Reçine hazırlık aşaması	26
Resim 4.2. Vakum infüzyon yöntemi	27
Resim 4.3. Fibermak vakum infüzyon cihazı	28
Resim 4.4. Vakum infüzyon ile üretilen plakalar	29
Resim 4.5. CNC Router cihazı.....	29
Resim 4.6. Çekme test numunesi.....	30
Resim 4.7. Eğme test numunesi.....	30
Resim 4.8. LOI test numunesi.....	30
Resim 4.9. Instron marka 100kN çekme ve eğme test cihazı	31
Resim 4.10. LOI cihazı	32
Resim 4.11. Malvern/Mastersizer 3000 Marka lazerli tane boyutu cihazı	32
Resim 4.12. Malvern Panalytical Empyrean marka XRD cihazı.....	33
Resim 4.13. Termogravimetrik analiz (TGA) cihazı	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m²	Metrekare
°C	Santigrat Derece
mm	Milimetre
µm	Mikrometre (mikron)
g	Gram
dk	Dakika
GPa	Giga Paskal
MPa	Mega Paskal
kN	Kilonewton
kV	Kilovolt
mA	Miliamper

Kısaltmalar

Açıklamalar

APK	Ahşap Polimer Kompozitler
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BN	Bor Nitrür
BNF	Bor Nitrür Fiber
BNNT	Bor Nitrür Nanotabaka
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
E	E-Cam
GNT	Grafen Nanoplaka
hBN	Hegzagonal Bor Nitrür
LOI	Limit Oksijen İndeksi

Kısaltmalar**Açıklamalar****MMK**

Metal Matris Kompozitler

PAN

Poliakrilonitril

PLA

Polilaktik Asit

PMK

Polimer Matris Kompozitler

PP

Polipropilen

PTFE

Politetrafloroetilen (Teflon)

PVDF

Poliviniliden Florür

S

S-Camı

SMK

Seramik Matris Kompozitler

XRD

X Işını Difraktometresi

YYPE

Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ZB

Çinko Borat

1. GİRİŞ

Dünyada ve Türkiye’de kompozit malzemeler hafiflik, yüksek özgül mukavemet, korozyona dayanım gibi rekabetçi özellikler neticesinde diğer malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle havacılık, savunma, ulaşım gibi alanlarda kullanımı artmaktadır. Dünya da temiz enerjiye verilen önemin artması ile kompozit malzeme kullanımı enerji sektöründe de yer almaya başlamıştır. Tercih edilen sektör kollarındaki artış sebebiyle malzeme türlerinde çeşitlilik ve kullanımda artış göstermektedir. Ülkemizde yıllardır cam elyaf ve dokuma imalatı yapılmakta olup, son yıllar içerisinde ihtiyaçların artışı ile karbon elyaf üretimi de yapılmaktadır.

Son yıllara ait çalışmalara bakıldığında, bor katkılı kompozitlerde kullanılan malzeme çeşitliliklerine bağlı üretim yöntemleri, termal iletkenlik özelliği yönündeki araştırmalara, ara yüzey iyileştirilmesi ile ilgili araştırmalarda delemineasyona bağlı olumsuzlukların giderilmesi konularına değinilmiş ve bu özelliklerin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır. Birçok kullanım alanına sahip olan kompozit malzemeler, hem günümüzde hem de gelecekte en kritik konulardan biri olmaya devam etmektedir.

Kompozit malzeme teknolojileri, özellikle ileri teknoloji potansiyeline sahip söz konusu sektörlerde yüksek mukavemet özelliğine sahip hafif malzemeler sağlamaktadır. Kompozit malzemeler şekillendirme, mukavemet, korozyon dayanımı vb. daha pek çok avantajlı özellikleri ile tasarım, yenileme gibi endüstrinin her aşamasında daha hafif parça kullanımını mümkün hale getirmektedir.

Bor ve bileşiklerinin, kompozit malzemelerde polimer reçine veya takviye malzeme içerisinde kullanılarak uygun parametrelerin belirlenmesi ve bu şekilde elde edilen kompozitlerin; uygun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin ortaya konulması sonucunda özellikle havacılık, savunma ve otomotiv gibi kritik sektörleri hedefleyen yüksek katma değerli ürünlerin geliştirilmesi sağlanmakta ve bu da ülkemiz için önem arz etmektedir.

Literatür araştırması göstermiştir ki; bor bileşikleri katkılı karbon fiber kompozit malzemeleri konusunda yapılacak bir çalışmayla savunma, otomotiv, havacılık, uzay gibi alanlara katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada çeşitli uygulama alanlarında yapısal elemanların

üretiminde düşünölen parçaların geliştirilmesi, vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmesi, mekanik ve termal özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmış ve test ölçümleri yapılmıştır.

Wang ve diğ., elektronik alanında artan termal özellikte malzeme ihtiyaçları nedeniyle yüksek termal iletken polimer kompozitler giderek daha fazla talep edilmiştir. Bor nitrür nanotabaka (BNNT), erimiş hidro-hegzagonal bor nitrür (h-BN) tozunun sıvı pul pul dökölmesi ve termal olarak iletken dolgu maddesi olarak kullanımı sağlanmışır. Polimer filmler (viniliden florür) (PVDF) / BNNT, çözelti karışımı ve sıcak presleme yoluyla elde edilmiştir. PVDF / BNNT kompozitin düzlem içi ısı iletkenliği % 4 BNNT (ağırlıkça) ile katkısız PVDF'ye kıyasla termal iletkenlik artışı gözlemlenmiştir. Ancak, düzlem içi termal kompozitlerin iletkenliği yalnızca 0.23 W/mK olup, 20'nin üzerinde yüksek termal iletken anizotropi göstermiştir. Isıl iletken anizotropi ve düzlem içi yüksek ısı iletkenlik oluşumuna bağlanmışır. Bu nedenle, BNNT ile güçlendirilmiş PVDF filmler, elektronik soğutma uygulamaları için verimli bir ısı dağıtıcı özelliği göstermiştir [1].

Geng ve diğ., üstün termal ve kimyasal kararlılığı sayesinde termoplastik poliüretanlara bor nitrür nanotabaka katkılandırılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Katkısız poliüretanlar ile karşılaştırması yapılmıştır. Poliüretanlar içerisine dolgu maddesi olarak kullanılan BNNT'lerin katkısı ile katkısız olan poliüretan termoplastik kompozit malzemelere göre daha yüksek ısı iletkenlik sağlamıştır [2].

Altuntaş ve arkadaşları, odun-palstik kompozitleri ile yaptıkları çalışmada, atık lignoselölözük maddelerle ürettikleri odun plastik kompozitlerin termal özelliklerini ve yangına karşı dirençlerini araştırmıştır. Çalışmalarında, lignoselölözük atıklar, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), sodyum borat (boraks) ve borik asit kullanmıştır. Çift vida ekstrüder ile kompozit malzemenin üretimini gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri malzemeyi 175°C'de presleyerek levha haline getirmiştir. Elde ettikleri numunelere yapılan termal gravimetrik analiz ve limit oksijen indeks testleri sonuçlarında borlu bileşiklerin oranı arttıkça kompozit malzemedeki bulunan lignoselölözüklerin ve plastik malzemenin yanma derecelerinin yükseldiği sonucuna varmıştır [3].

Kartal ve Boztoprak, çalışmalarında, bor nitrür partiköl takviyeli vinil ester kompozit malzemeler üretilmiştir. Farklı oranlarda üretilen bor nitrür takviyeli vinil ester kompozit

numunelerinin çekme, eğilme, darbe, aşınma dayanımı ve sertlik özelliklerini incelemiştir. Elde ettikleri kompozit malzemenin darbe ve sertlik değerlerinde artış olurken, çekme, % uzama ve eğilme özelliklerinde azalma gözlemlenmiştir. Aşınma miktarında ise azalma, dolayısıyla aşınma dayanımında artış olduğunu saptamıştır [4].

Schwartz'lar, çalışmasında kimyasal buhar biriktirme işlemi ile hazırlanan bor elyaf takviyeli plastik kompozitleri halka ve düz panel formunda üretmiştir. Bor elyaf takviyeli kompozitlerin elastisite modülü ve mukavemetleri iyiyken, çekme ve laminar kesme değerleri istenilen değerlerden az çıkmıştır [5].

Wootthikanokkhan ve ark., çalışmalarında üç farklı katkı maddesi (kenaf lifi, nanokil, hegzagonal bor nitrür) içeren poli (laktik asit) (PLA) kompozitlerinin termomekanik ve kristalizasyon özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitleri, çift vidalı ekstrüder kullanarak hazırlanmışlardır. Matrise eklenen bor nitrürün, mekanik özellikleri, çekme dayanımı, Young modülü ve kopma uzama miktarı gibi özellikleri iyileştirdiğini saptamışlardır [6].

Brack ve ark. çalışmalarında plazma ve organosilan ile işlenmiş bor elyaflarının yüzey kimyasını, bor elyafı ve epoksi matris arasındaki yapışma özelliklerini iyileştirme amacı ile araştırmıştır. Bor liflerinin yüzey kimyası, X-ışını fotoelektron spektroskopisi ve uçuş zamanı ikincil iyon kütle spektrometresi kombinasyonu kullanılarak izlenmiştir. Alınan bor elyafları ile karşılaştırıldığında, organosilan ile muamele edilmiş elyaflar için görünen ara yüzey kesme mukavemetinde 6 kat bir gelişme sağlandığını saptamışlardır [7].

Uygunoğlu ve ark. yaptıkları çalışmada bor atığı içeren polimer kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Polimer kompozitler, epoksi esaslı reçine ve atıklarla mineral katkı maddesi olarak üretilmiştir. Polimer kompozit numunelerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci, su emme ve yoğunluk testleri yapılmıştır. Sonuç olarak bor içeren atıkların eklenmesi polimer kompozitlerin basınç dayanımını artırmış; bununla birlikte, kompozitleri düşük eğilme mukavemeti ile daha kırılgan bir malzeme yapmıştır [8].

Xu ve ark. grafen nanotabaka (GNT) ve bor nitrür fiber (BNF) takviyeli polipropilen (PP) matrisli kompozitleri çift vidalı ekstrüder kullanarak hazırlamışlardır. PP, ağırlıkça% 9 GNT ve ağırlıkça% 30 kısa BNF ile doldurulduğunda, en yüksek ısı iletkenlik elde

edilmiştir, bu da PP'nin değerinden yaklaşık altı kat daha yüksektir. Çalışma, termal yöntem malzemelerinde uygulanan yüksek termal olarak iletken ancak elektriksel olarak yalıtkan kompozitleri tasarlamak ve imal etmek için kolay bir yöntem sağlamıştır [9].

Zeng ve diğ. buzla temellenmiş yaklaşım kullanarak 3D bor nitrür nanotabaka (3D-BNNT) ağı oluşturup, epoksi matrise takviye edilmiştir. Elde edilen polimer kompozitler, yüksek termal iletkenlik ($2,85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), düşük termal genleşme katsayısı ($24\text{--}32 \text{ ppm K}^{-1}$) ve nispeten düşük BNNT yüklemesinde (hacimce% 9,29) cam geçiş sıcaklığında artış sergilemiştir. Bu sonuçlar, bu yaklaşımın, yüksek termal iletkenliğe sahip polimer kompozitlerin tasarımı ve hazırlanması için yeni bir yol açtığını göstermiştir [10].

Pan ve ark. yaptıkları çalışmada hegzagonal bor nitrür / PTFE kompozitlerini soğuk presleme ve sinterleme yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu çalışmanın ile, PTFE kompozitlerinin düzlem içi yönlendirilmiş hBN ile düzlemden geçen termal iletkenliğini araştırmıştır. Teorik modeller, kompozitlerin etkili termal iletkenliğini analiz etmek ve tahmin etmek için başarıyla kullanılmıştır; bu, düşük etkili termal iletkenlik geliştirme verimliliğinin, levhacık şeklindeki dolgu maddesinin yüksek düzlem içi yöneliminden kaynaklandığını göstermiştir [11].

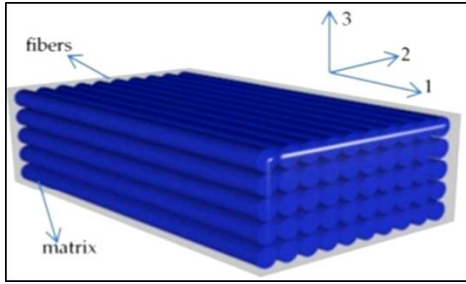
Ayrılmış ve diğ. yaptıkları çalışmada, kavak ağacı unu (ağırlıkça% 50), termoplastikler (yüksek yoğunluklu polietil veya polipropilenden) ve bağlayıcı olarak altıgen bor nitrür (h- BN) kullanılarak hazırlanan enjeksiyonla kalıplanmış ahşap-plastik kompozitlerin (APK'ler) mekanik, termal ve morfolojik özelliklerini incelemiştir. APK'lerin eğilme ve gerilme özellikleri, artan h-BN içeriği ile önemli ölçüde iyileşirken darbe dayanımı, artan h-BN içeriği ile azalmıştır. H-BN içeren APK'ler, h-BN içermeyenlerden daha sert özellik göstermiştir. APK'lerin kırılma değerlerinde gerilme uzaması h-BN ilavesiyle artmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi ile APK'lerin kristallliği, erime entalpisi ve kristalizasyon entalpisi, artan h-BN içeriği ile arttığı saptanmıştır [12].

Wang ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada epoksi/bor nitrür kompozitlerin termal iletkenlik performansını değerlendirmiştir. Ağırlıkça %40 BN dolgulu epoksi kompozitin termal iletkenliği 6 W/mK olarak bulunmuştur. Bu yüksek iletkenlik değeri katkısız epoksinin 14 kat fazlası sonucuna ulaşılmıştır [13].

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, makro ölçüde birbirinden farklı, tek tek bileşenlerin kendi başlarına elde edemeyecekleri özellikleri sağlamak için malzemelerin fiziksel olarak birleştirilmesiyle elde edilirler. İstenilen uygulama özelliklerine göre hazırlanabilen farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerdir. Kompozit malzemeler diğer bileşik malzemelerden farklı olarak iki ve daha fazla bileşen içerebilen, döküm gibi işlemlerle oluşan alaşımlardan ayırt edilmelidir.

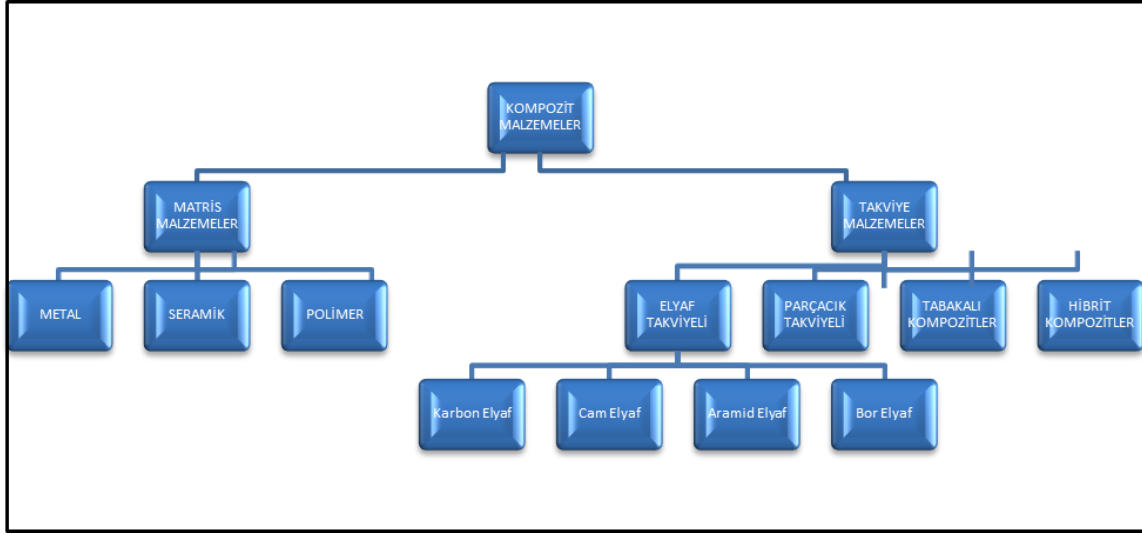
Kompozit malzemeler matris ve fiber malzemeler oluşmaktadır. Matris malzemeler fiber malzemelerin birbiri ile bütün halinde kalmasını sağlamaktadır. Şekil 2.1’ de kompozit malzemelerin matris-fiber şekli örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kompozit malzemeler fiber matris gösterimi [14]

Kompozit malzemeler, bileşenleri, oranları, dağılımları, morfolojileri, kristallik dereceleri, kristalografik dokularının yanı sıra bileşenler arasındaki arayüzün yapısı ve bileşimi uygun bir şekilde seçilerek çeşitli özelliklere göre uyarlanabilir. Bu güçlü uyarlanabilirlik sayesinde, kompozit malzemeler havacılık, otomobil, elektronik, inşaat, enerji, biyomedikal ve diğer endüstrilerle ilgili teknolojilerin ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanabilir. Sonuç olarak, kompozit malzemeler ticari mühendislik malzemelerinin çoğunu oluşturur [15].

Kompozit malzemeler kullanılan takviye ve matris malzemelere göre çeşitlilik göstermektedir. Şekil 2.2’ de kompozit malzemelerin sınıflandırılması yer almaktadır



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerinin sınıflandırılması [16]

Kompozit malzemelerin başlıca özellikleri :

- Yüksek mukavemet,
- Hafiflik,
- Isı ve ateşe dayanıklılık,
- Titreşim sönümlleme,
- Kolay şekillendirilebilme,
- Elektriksel iletkenlik,
- Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık [16]

2.1. Kompozit Malzemelerin Matris Fazına Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemeyi oluşturan iki ana madde vardır: Matris ve Takviye Elemanı. Matris takviyelendirilen malzemedir ve takviye elemanından daha az mukavimdir [17]. Çizelge 2.1’de kompozitlerin sınıfları görülmektedir.

Çizelge 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması [18]

Matriks Malzemeler	Takviye Elemanları
Polimerler	Lif Takviyeli
Metaller	Parçacık Takviyeli
Seramikler	Tabakalı

2.1.1. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona ve bozulmaya doğal olarak dirençlidir. Bu malzemelerden bazıları kırılma olmasalar özellikle otomobil motorları ve uçak gaz türbini motorlarındaki bileşenlerde, yüksek sıcaklık ve şiddetli stres uygulamalarında ideal alternatif olarak kullanılabilir. Yeni nesil seramik-matris kompozitlerinin (SMK'ler) geliştirilmesiyle seramiklerin kırılma tokluğu önemli ölçüde iyileştirilmiştir [19].

Seramik-matris kompozitler, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve sıvı fazlı sinterleme teknikleri kullanılarak imal edilebilir. Uygulamalara göre SiC takviyeli alüminalar, sert metal alaşımlarının işlenmesi için kesici takım uçları olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler için takım ömürleri sinterlenmiş karbürler göre daha fazladır [19].

2.1.2. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Adından da anlaşılacağı gibi metal matrisli kompozitler (MMK) için matris sünek bir metaldir. Bu malzemeler, bazı metal emsallerine göre daha yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilir; ayrıca takviye, spesifik sertliğini, spesifik kuvvetini, aşınma direncini, sünme direncini, termal iletkenliğini ve boyutsal stabiliteyi geliştirebilir. Bu malzemelerin polimer matris kompozitlere göre avantajlarından bazıları daha yüksek çalışma sıcaklıkları, yanmazlık ve organik akışkanlar tarafından bozunmaya karşı daha büyük direnci içerir. Metal matris kompozitler, PMK'lerden çok daha pahalıdır ve bu nedenle MMK kullanımı bir şekilde sınırlıdır [19].

2.1.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer matrisli kompozitler (PMK) kolay işlenebilir ve bulunabilirler. Diğer matris malzemelere göre maliyetleri daha uygundur. Bundan dolayı önemli yapısal mühendislik malzemelerinden biri haline gelmiştir. Polimerlerin mekanik özellikleri tek başına kullanıldığında yetersiz kalabilmektedir. Özellikle sertlik ve mekanik dayanım gibi bazı özellikler de metal ve seramiklerinkinden daha düşüktür. Bu sebeple bu malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için dolgu maddeleri (güçlendirici) kullanılması

önemlidir. Maliyetin düşük olması ve kolay üretim yöntemlerinden dolayı PMK'ler metal ve seramik matris kompozitlere kıyasla daha çok kullanılmaktadır [20].

Genelde polimerik malzemelerin işlenmesi için yüksek sıcaklık veya basınca ihtiyaç duyulmaz. Üretimde oluşabilecek bu farklılıklar kullanım alanlarına göre değişmektedir. Bu nedenle, karmaşık şekilli bileşenlerin üretimi bu malzemelerde daha kolaydır. Ayrıca PMK üretimi için gerekli ekipmanları, diğer matris malzemelerin üretim yöntemlerine göre daha basit ve kolay bulunabilirler. Bu sebeple PMK'teki gelişme çok hızlı olup birçok yapısal uygulama için tercih edilmektedir [20].

Polimer matrisli kompozitlerin kullanım avantajları daha fazladır. Polimer matrisli kompozit malzemeler kullanım alanına göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, darbe dayanımı, dayanıklılık ve buna benzer günlük kullanımda da fayda sağlaması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajların yanında düşük çarpışma enerjisi performansı, geri dönüşüm zorlukları, rekabetçi maliyet baskısı ve endüstrinin malzemeye olan yabancılığı gibi önde gelen bazı olumsuz yönleri de vardır. Polimer matrisli kompozitler iki kategoride incelenebilir:

**** Parçacık dolgulu kompozitler**

**** Sürekli elyaf kompozitler**

Parçacık dolgulu kompozitler, bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir [21].

Sürekli elyaf içeren polimer kompozitler yüksek performans istenilen alanlarda en önemli malzeme seçimlerinin başında yer almaktadır. Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir [21].

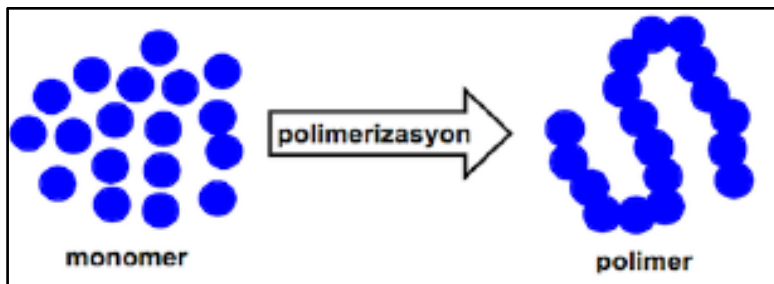
Elyaf lar ile pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptir. Pekiřtirici olarak cam, karbon kevlar ve boron lifleri kullanılır. Günümüzde kompozit yapılar da en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaf lar dır. Bu elyaf lar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar [21].

Yaygın olarak kullanılan sürekli fiber takviyeli polimer matrisler termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır (Çizelge 2.2).

Polimer matrisli kompozitlerin sürekli fiberlerle takviye edilmiş polyester ve epoksi reçine matrisli olanları en önemlileridir. Kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları ise; cam fiber, aramid fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir [21].

Polimerler

Polimerler, monomer denilen küçük moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde bağlanmasıyla oluşan (Şekil 2.3) uzun zincirli moleküllerdir [21]. Çok uzun zincirlere sahip olan polimerlerde son derece büyük moleküler ağırlıklar gözlemlenir. Polimerizasyon işlemi sırasında tüm polimer zincirleri aynı uzunlukta büyümeyeceğ i için bu durum zincir uzunluklarının veya moleküler ağırlıkların dağılımıyla sonuçlanır. Normal olarak, viskozite ve ozmotik basınç gibi çeşitli fiziksel özelliklerin ölçülmesiyle belirlenebilen ortalama bir moleküler ağırlık belirtilir [19].

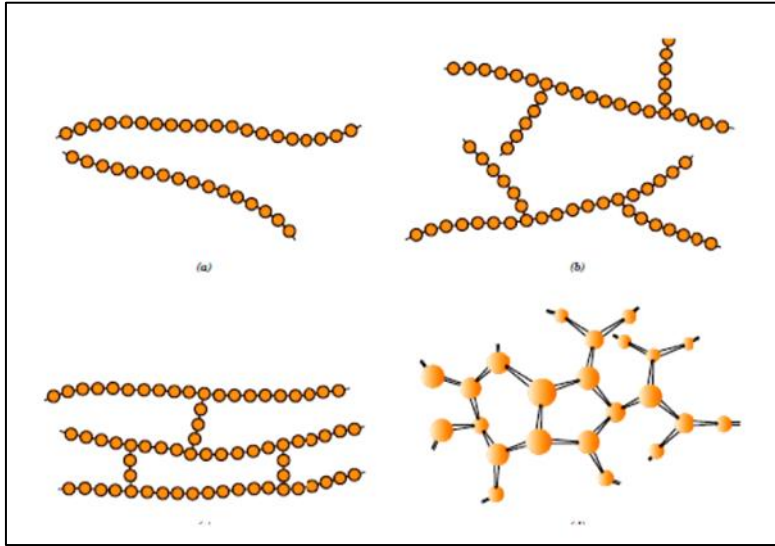


Şekil 2.3. Polimerizasyon işlem şeması [21]

Pek çok polimer özelliğ i, polimer zincirlerinin uzunluğ undan etkilenir. Örneğ in, erime veya yumuşama sıcaklığ ı artan moleküler ağırlık ile artar (yaklaşık 100,000 g / mol'e kadar). Oda sıcaklığ ında, çok kısa zincirlere sahip polimerler (100 g / mol düzeyinde moleküler ağırlıklara sahip) genellikle sıvı olarak var olur. Yaklaşık 1000 g / mol

moleküler ağırlığa sahip olanlar mumsu katılar (parafin mumu gibi) ve yumuşak reçinelerdir. Burada en çok ilgi gören katı polimerler (bazen yüksek polimerler olarak adlandırılır) genellikle 10.000 ila birkaç milyon g / mol arasında değişen moleküler ağırlıklara sahiptir. Bu nedenle aynı polimer malzeme, farklı bir moleküler ağırlık ile üretilirse oldukça farklı özelliklere sahip olabilir. Moleküler ağırlığa bağlı diğer özellikler arasında elastik modül ve mukavemet bulunur [19].

Bir polimerin fiziksel özellikleri, yalnızca moleküler ağırlığına ve şekline değil, aynı zamanda moleküler zincirlerin yapısındaki farklılıklara da bağlıdır. Modern polimer sentez teknikleri çeşitli yapısal olasılıklar üzerinde önemli bir kontrole izin verir. Polimerlerin zincir gösterimi, izomerik konfigürasyonlara ek olarak doğrusal, dallı, çapraz bağlı ve ağ dahil olmak üzere çeşitli moleküler yapıları bulunmaktadır (Şekil 2.4) [19].



Şekil 2.4. (a) lineer, (b) dallanmış, (c) çapraz bağlı, (d) ağ şeklinde [19]

Bir polimerin yüksek sıcaklıklarda mekanik kuvvetlere tepkisi baskın moleküler yapısı ile ilgilidir. Aslında, bu malzemeler için bir sınıflandırma şeması artan sıcaklıktaki davranışa göre yapılır. Termoplastikler (veya termoplastik polimerler) ve termosetler (veya ısıyla sertleşen polimerler) bu bağlamdaki alt gruplardır [19].

Termosetler

Termoset polimerler ağ polimerleridir. Oluşumları sırasında kalıcı olarak sertleşirler ve ısıtıldığında yumuşamazlar. Ağ polimerleri bitişik moleküler zincirler arasında kovalent çapraz bağlara sahiptir. Isıl işlemler sırasında bu bağlar yüksek sıcaklıklarda titreşim ve dönme zincir hareketlerine direnmek için zincirleri birbirine tutturur, böylece malzemeler ısıtıldığında yumuşamaz.

Çapraz bağlanma genellikle kapsamlıdır; çünkü zincir tekrar birimlerinin %10 ila %50'si çapraz bağlıdır. Yalnızca aşırı sıcaklıklara kadar ısıtma bu çapraz bağların kopmasına ve polimer bozulmasına neden olacaktır. Termoset polimerler genellikle termoplastiklerden daha sert ve güçlüdür ve daha iyi boyutsal kararlılığa sahiptir. Vulkanize kauçuklar, epoksiler, fenolikler ve bazı polyester reçineleri içeren çapraz bağlı ve ağ polimerlerinin çoğu ısıyla sertleşir [19]

Termoplastikler

Termoplastikler, ısıtıldığında yumuşar (ve sonunda sıvılaşır) ve soğutulduğunda sertleşir ve ayrıca bu süreç tamamen tersine çevrilebilir. Moleküler düzeyde sıcaklık yükseldikçe ikincil bağlanma kuvvetleri azalır (artan moleküler hareketle), böylece bir stres uygulandığında bitişik zincirlerin nispi hareketi kolaylaştırılır. Geri döndürülemez bozunma erimiş bir termoplastik polimer çok yüksek bir sıcaklığa yükseltildiğinde ortaya çıkar. Buna ek olarak termoplastikler nispeten yumuşaktır.

Doğrusal polimerlerin çoğu ve esnek zincirleri olan bazı dallı yapılara sahip olanlar termoplastiktir. Bu malzemeler normal olarak ısı ve basıncın aynı anda uygulanmasıyla üretilir. Yaygın termoplastik polimerlerin örnekleri arasında polietilen, polistiren, polietilen tereftalat ve polivinil klorür yer alır [19].

Termoset ve termoplastik polimer malzemelerin başlıca özellikleri Çizelge 2.2' de yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Termoset ve termoplastik polimer özellikleri [22]

Termoset	Termoplastik
Ana Karakteristikleri	
Kürlendiğinde kimyasal değişime uğrar	Reaksiyona girmez ve kürlenme ihtiyacı yoktur
İşlem geri döndürülemez	İşlem tersine çevrilebilir
Düşük viskoziteye sahiptir	Yüksek viskozite
Çözücülere karşı dayanıklıdır	Organik çözücülere karşı sınırlı dayanım
Avantajları	
Düşük işlem sıcaklığı	Kısa işlem süreleri
Karmaşık şekillendirilebilme	Geri dönüşüm özelliği
Sünmeye karşı direnç	Soğutmasız ve uzun raf ömrü
Dezavantajları	
Uzun işlem süreleri	Çözücülere karşı düşük direnç
Uzun kürlenme süresi	Yüksek sıcaklık ve basınç işlemleri
Sınırlı depolama raf ömrü	Sünme eğilimi

2.2. Kompozit Malzemelerin Takviye Fazına Göre Sınıflandırılması

2.2.1. Karbon elyaf

Grafit, elmas ve fulleren olmak üzere üç çeşit karbon vardır. Karbon lifleri kristal olmamasına rağmen grafit ailesine aittir. Grafit, üst üste yığılmış karbon tabakaları ile katmanlı bir kristal yapıya sahiptir. Bir karbon fiber, bir polimer fiberden karbon-matris kompozitlerin üretiminde kullanılabilecek benzer yöntemle, polimerin karbona dönüştürülmesiyle elde edilir. Sürekli bir karbon fiberin çapı yaklaşık 7µm'dir [15].

Bir karbon fiber, imalat süreci tarafından kontrol edildiği üzere çeşitli derecelerde kristallığe sahip olabilir. Belirli bir karbon öncüsü, örneğin zift ve poliakrilonitril (PAN) için, ısı işlem sıcaklığı ne kadar yüksekse, kristallik derecesi o kadar yüksek olur (grafitleşme derecesi olarak da bilinir). Karbonizasyondan sonra, bir karbon fiber kristal değildir (amorf) ve turbostratik olduğu söylenir [15].

Karbon fiberleri, polimer ve seramik matrislerin iletken olmayan doğasının aksine, elektriksel ve termal olarak iletkenlerdir. Bu nedenle, karbon lifleri yalnızca bir takviye olarak değil, aynı zamanda elektriksel veya termal iletkenliği artırmak için bir katkı maddesi olarak da hizmet edebilir. Dahası, karbon fiberleri sıfıra yakın bir termal genleşme katsayısına sahiptir, bu nedenle termal genleşmeyi azaltmak için bir katkı maddesi olarak da hizmet edebilirler. Bu yüksek ısı iletkenlik ve düşük ısı genleşme kombinasyonu, karbon fiber kompozitleri elektronik elemanlardaki ısı alıcıları ve boyutsal kararlılık

gerektiren uzay yapıları için kullanışlı hale getirir. Karbon fiberlerin termal iletkenliği grafitleşme derecesi ile arttığından, yüksek termal iletkenlik gerektiren uygulamalarda yüksek modüllü zift bazlı fiberler ve buharla büyütülmüş karbon fiberler gibi grafitik fiberler kullanılmalıdır [15].

Karbon fiberin iletkenliği ve polimer matrisin iletken olmaması, karbon fiber polimer-matris kompozitlerin fonksiyonel özellikler için uygun hale getirilmesini sağlar. Örneğin, bir karbon fiber polimer-matris kompozitin elektriksel direnci, kompozitteki hasara karşı hassastır, böylece kompozitin kendi hasarının bir sensörü olmasına izin verir. Lif kırılması şeklindeki hasar, kompozitin lif yönündeki direnci artırır. Delaminasyon, laminasyon arası lif-lif temasının kapsamını azalttığından, delaminasyon şeklindeki hasar kompozitin kalınlık boyunca direncini artırır. Başka bir deyişle, çatlak veya kırılma sonrası iki tabakanın birbirinden ayrılmasıyla tabakaların birbiri üzerinde teması engellenmiş olur. Kompozit yüzeyinin tutunması, delaminasyon gibi hasarların önlenmesi önemlidir. Yapısal sağlık izleme olarak da bilinen hasar izleme, kompozitlerden yapılan uçakların eskimesi ve bozulması nedeniyle pratikte önemlidir [15].

2.2.2. Cam elyaf

Oksitler ile eritilmiş silika (SiO_2) bazlı cam elyaflar, yüksek mukavemetleri ve düşük maliyetleri nedeniyle PMK'lerin temelini oluşturur. 1960'ların başından beri yüksek mukavemetli cam elyaflar, basınçlı kaplar ve roket kasaları gibi zorlu yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Uçak gövdelerinde yapısal uygulamalar sınırlıdır çünkü cam elyaflar nispeten düşük özgül sertliğe sahiptir. Bununla birlikte, düşük özgül sertliklerinin bir tasarım sınırlaması olmadığı planörlerin ve diğer uçakların uçak gövdelerinde ve nispeten düşük maliyetin (yüksek performanslı liflere kıyasla) çekici olduğu kaporta gibi ikincil yapılarda yaygın olarak kullanımı kabul edilmektedirler. Dielektrik özelliklerinin uygunluğundan ötürü, cam elyaf PMK'ler, radomlar ve hava kapakları dahil olmak üzere elektromanyetik radyasyona şeffaflığın gerekli olduğu uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [22].

Cam, sıralı veya kristal bölgelerin oluşumunu önlemek için yeterince yüksek bir oranda viskoz bir sıvının soğutulmasıyla üretilen amorf bir katıdır. Cam elyafı içinde silikaya ek olarak camı oluşturan bileşikler alüminyum, bor, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve

potasyum oksitlerini içerebilir. Katkı maddeleri, silikanın erime noktasını düşürmek için kullanılır, böylece gerekli viskozite daha düşük bir sıcaklıkta elde edilir. Ayrıca gaz kabarcıklarının giderilmesini kolaylaştırır; mekanik ve nihai ürünün kimyasal özelliklerinde üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler [22].

Yapısal uygulamalar için kullanılan iki tür cam elyafı vardır: "E", bir kalsiyum alümino-borosilikat cam ve "S", bir magnezyum alümino-silikat cam. E, elektriksel sınıf anlamına gelir, çünkü diğer standart cam formlarıyla karşılaştırıldığında elektrik direnci yüksektir ve dielektrik sabiti düşüktür. Bunlar nispeten düşük maliyetleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle yapısal uygulamalarda, özellikle de havacılık dışı alanda en yaygın şekilde yararlanılanlardır [22].

2.2.3. Aramid elyaf

Aramid elyaflar, uçak gövdesi uygulamalarına uygun PMK'lerde kullanım için yeterli sertliğe ve mukavemete sahip ilk organik elyaflardır. Aramid elyaf bazlı PMK'ler 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklar için çekici gerilme özelliklerine sahip olmalarının yanında zayıf sıkıştırma mukavemetine sahiptirler. Bu durum yüksek taşıma mukavemeti gerektiren uygulamalar dahil olmak üzere önemli sıkıştırma yüküne maruz kalan uygulamalar için önemli bir sınırlamadır [22].

Aramid elyafların önemli bir avantajı, kırılma sırasında büyük miktarlarda enerjiyi absorbe etme yetenekleridir. Bu durum, yüksek gerilme-çökme durumlarından, kompresyonda plastik deformasyona uğrama yeteneklerinden ve gerilme kırılması sırasında defibrilasyon kabiliyetlerinden kaynaklanır. Lifler yaklaşık % 0,3 sıkıştırma geriniminde plastik davranış sergiler ve daha büyük gerinimlerde bozulmaya kadar deformasyon doğrusaldır. Bu nedenle aramid PMK'ler balistik koruma ve ayrıca motor muhafaza halkaları için kullanılır. Aramid PMK'lerin havacılıkta en yaygın kullanımı kaportalarda olmuştur, ancak aynı zamanda bal peteği paneller için kaplama veya yüz tabakaları olarak da kullanılmaktadır. Aramid PMK'ler ayrıca radomlarda ve yapısal verimlilik ve uygun dielektrik özellikler gerektiren diğer uygulamalarda kullanılır [22].

2.2.4. Bor elyaf

Bor lifleri, gelişmiş kompozitlerde kullanılabilen ilk yüksek performanslı monofilaman takviyesidir. İlk olarak 1960'ların başında geliştirilen ve piyasaya sürülen bu yüksek mukavemetli, yüksek modüllü elyaflar, ABD Hava Kuvvetleri F-15 ve ABD Donanması F-14 uçaklarındaki kompozit yapısal bileşenlerde uygulama alanı bulmuştur. Bu uçaklar hala hizmette olduğundan ve yüksek değişim maliyetleri kabul edilemez olduğundan, karbon elyaflar artık eşdeğer veya daha iyi özelliklerde önemli ölçüde daha düşük bir fiyata mevcut olsa da, bor elyafları bugün hala kullanılmaktadır. Spor malzemeleri endüstrisinde bor-epoksi kompozitler kullanılmıştır ve MMK'lerde mükemmel mekanik özellikleri, ısıl kararlılıkları ve matrisle (karbon liflerine kıyasla) azaltılmış reaktiviteleri nedeniyle bor lifleri kullanılmıştır [23].

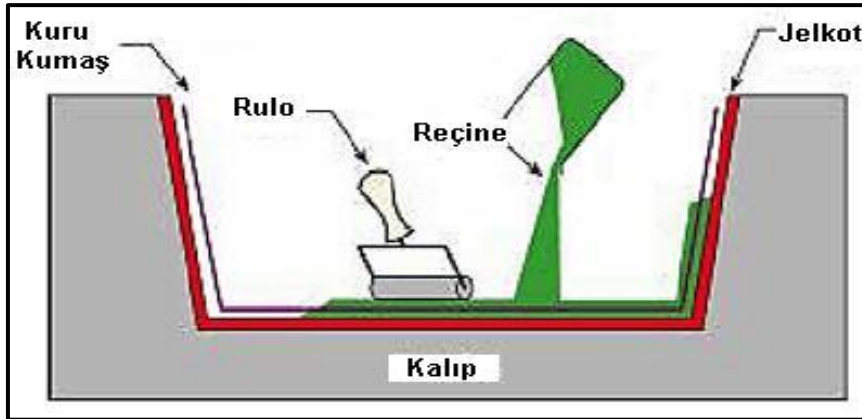
Bor lifleri, bir tungsten veya pirolize karbon substratı üzerine borun kimyasal buhar biriktirilmesi (CVD) ile oldukça büyük bir monofilament fiber veya "tel" (100 ila 200 μm veya 4 ila 8 mil, ϕ) olarak üretilir. Elde edilen lifler mükemmel mukavemete (3450 MPa veya 500 ksi) ve sertliğe (400 GPa veya 58) sahiptir. Geniş elyaf ϕ ları nedeniyle, son derece yüksek basınç dayanımına sahip kompozitler oluştururlar. Bununla birlikte, hem öncül gazlar hem de üretim süreci doğası gereği pahalı olduğu için, bor liflerinin yalnızca maliyet temelinde karbon lifleriyle rekabet etmesi beklenemez. Bor liflerinin kullanımı, son zamanlarda alüminyum uçak yapısında çatlak hasarının kompozit yama onarımlarının kullanımında bir şekilde yeniden canlanmıştır [23].

Bor neredeyse elmas kadar sert olduğu için, bu fibere dayalı PMK'lerin delinmesi ve işlenmesi zordur. Bu nedenle, hem daha ucuz hem de daha işlenebilir ve şekillendirilebilir olan karbon elyaflar havacılık PMK uygulamaları için büyük ölçüde bor elyaflarının yerini almıştır. Bununla birlikte F-14, F-15 ve B-1 gibi yakın tarihli birkaç ABD uçağı bir dizi önemli bor/epoksi bileşeni içerir. Bor ayrıca alüminyum metal matrisli kompozitleri güçlendirmek için de kullanılır [22].

2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

2.3.1. El yatırma yöntemi

Bilinen en basit ve en eski yöntemlerdendir. Kolay uygulanabilir bir üretim yöntemidir. Kalıp üzerine sürülen kalıp ayırıcından sonra elyaf serimi yapılır ve fırça yardımı ile reçine kumaş üzerine sürülür. Tüm kumaş katmanlarında aynı işlem uygulanır. Merdane ya da silindir kumaş üzerinden birkaç kez geçilerek içeride kalan fazla reçine ve hava kabarcıklarının çıkışı sağlanır. Böylelikle daha homojen bir reçine yayılımı sağlanarak kürlleme sonrası meydana gelebilecek delaminasyon gibi hatalar engellenebilir. Kürlleme işlemi oda sıcaklığında ya da belirli yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Malzeme türü olarak herhangi bir fiber (cam, karbon...) ve reçine (vinilester, epoksi, polyester...) türü kullanılabilir. Çok büyük parçalarda ve seri üretim için uygun olmaması bu üretim yönteminin dezavantajıdır. El yatırma yöntemi Şekil 2.5’de gösterilmiştir [24].



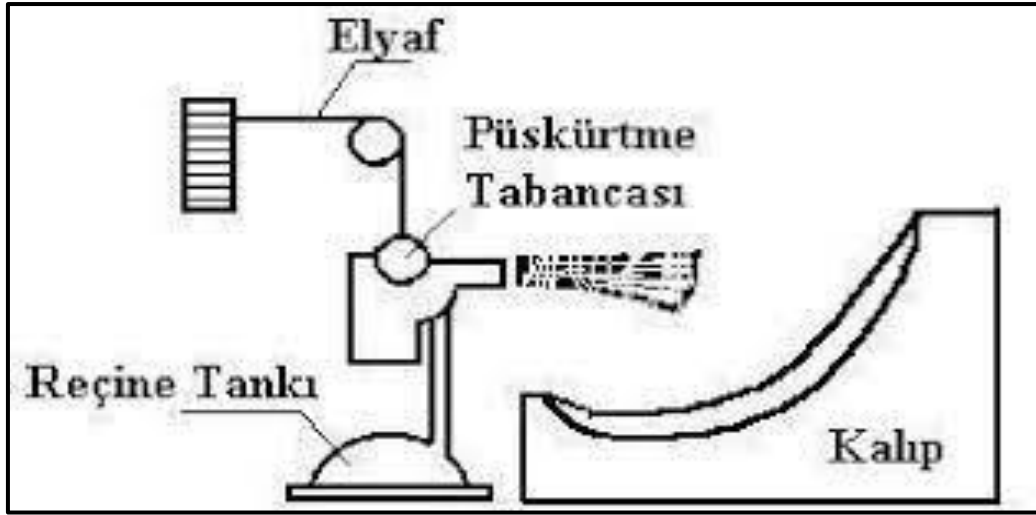
Şekil 2.5. El ile yatırma yöntemi ile kompozit üretimi [25]

2.3.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi bir açık kalıplama yöntemidir. Proses uygulama gösterimi Şekil 2.6’da yer almaktadır. Fiberler el tabancası yardımı ile kesilerek reçine içerisine besleme yapılır. Elde edilen malzeme standart koşullarda kürllemeye bırakılır. Bu yöntem kaplama uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu yöntemin bir diğer uygulama şekli ise direk kumaş üzerine sadece sertleştirici ile karışımı yapılmış olan reçinenin homojen şekilde püskürtülmesi işlemidir. Elde edilen malzemedeki homojen dağılım operatöre göre de

farklılık göstermektedir. Bu nedenle işlem yapılan aynı parçalarda aynı operatör ile devam edilmesi gerekmektedir [24]

Kürleme işlemi oda sıcaklığında ya da belirli bir sıcaklık altında da gerçekleştirilebilir. Genellikle polyester reçine ve cam fiber tercih edilir. Reçinenin ve fiberin kolay emilim ve çöktürülmesi sebebiyle kullanılırlar. Püskürtme yönteminde reçine viskozitesi önemlidir. Düşük viskoziteli olan reçineler tercih edilir. Seri üretim amaçlı yapılan çalışmalarda otomatik sistemler tercih edilmelidir. Zaman ve kalite açısından en uygunu otomatik sistemdir [24].

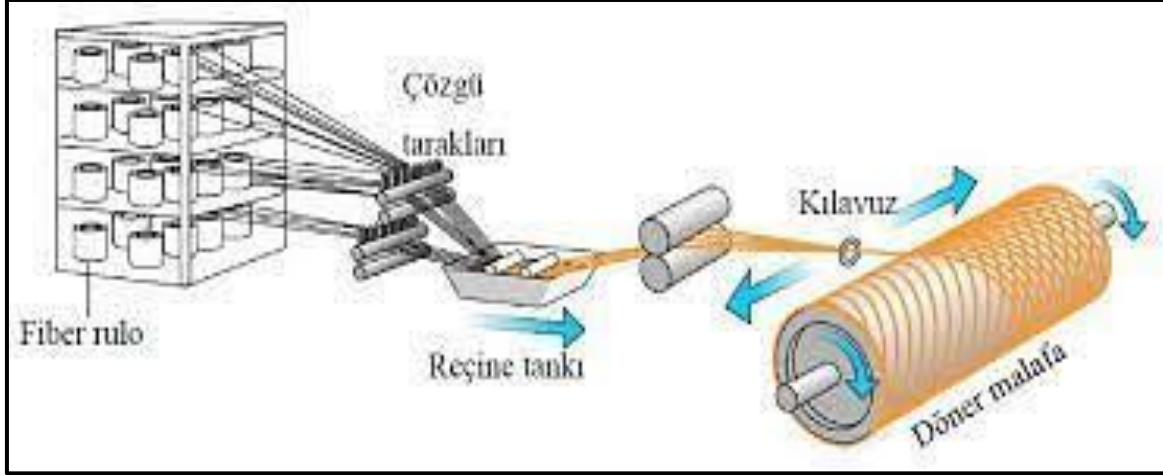


Şekil 2.6. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi [26]

2.3.3. Filament sarım yöntemi

Filament sarım yöntemi yarı otomatik bir sistemdir. Sadece sarım işleminde ya da tasarımı yapılmış olan parçaların (boru, tank, basınçlı tüp, dirsek tip boru...) üretiminde kullanılır. Tüm fiber çeşitleri için uygundur. Uygun viskozitede reçineler tercih edilir. Sarım yapılacak olan kalıp iki ayna arasına yerleştirilir. Kalıp üzerine ayırıcı sıvı uygulandıktan sonra önceden hazırlanmış olan reçine, reçine havuzuna eklenir. Sıyırıcı kontrolü yapıldıktan sonra sarımda kullanılacak olan fiber/fiberlerin gergi kontrolü yapılır. Önceden belirlenen parametrelerle (açı, malzeme türü, fiber sayısı...) tasarımı yapılmış olan malzemenin çizim kodları sisteme yüklenerek sarım işlemi başlatılır. Şekil 2.7’de filament sarım uygulaması yer almaktadır [24].

Sarım işlemi sonrası malzeme oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklık ortamında kürlemeye bırakılır. Kürlenen malzeme kalıptan çıkartılır. Bazı malzeme türlerinde kalıpta sarım içerisinde bırakılmaktadır (Örn: Kapalı basınçlı tüpler). Ekonomik ve hızlı olduğu için seri üretimde de tercih edilen bir yöntemdir [24].

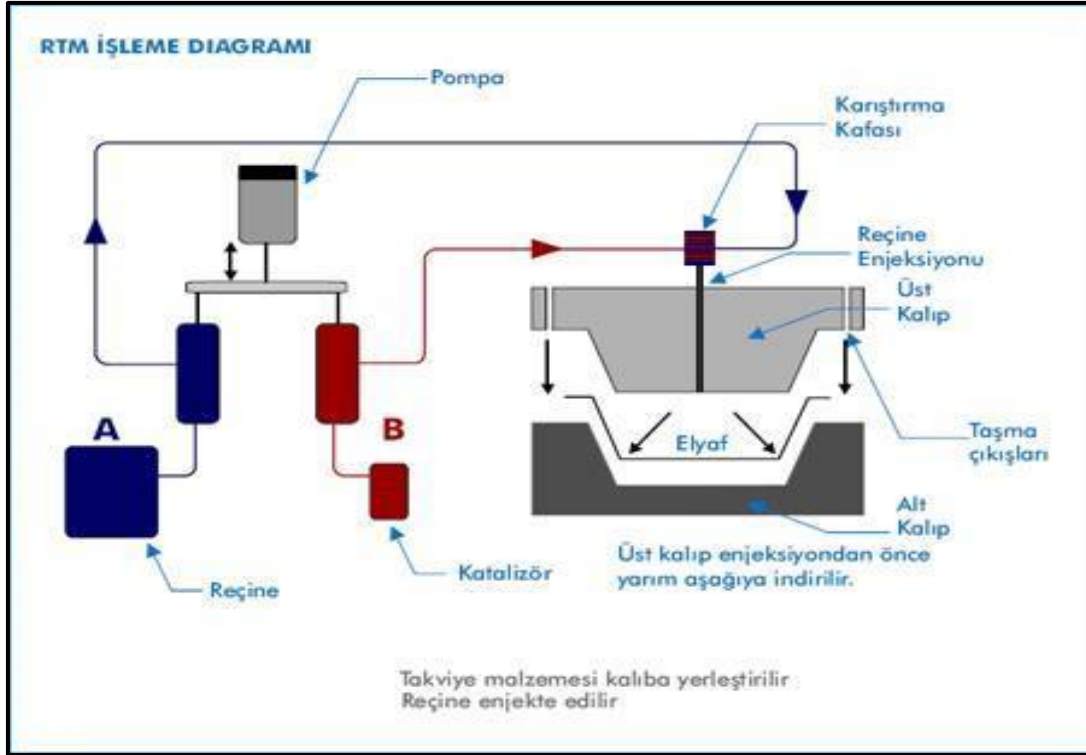


Şekil 2.7. Filament sarma yöntemi ile kompozit üretimi [27]

2.3.4. Reçine transfer kalıplama

Reçine transfer kalıplama yönteminde dişi ve erkek kalıp sistemi bulunmaktadır. Dişi kalıp üzerine önce elyaflar yerleştirilir ve erkek kalıp dediğimiz üst kalıp kapatılır. Kalıplar conta veya klips yardımı ile birbirlerine sabitlenirler. Böylelikle basınç uygulandığı zaman sistemde sızma veya kalıplarda açılma meydana gelmesi engellenir [24].

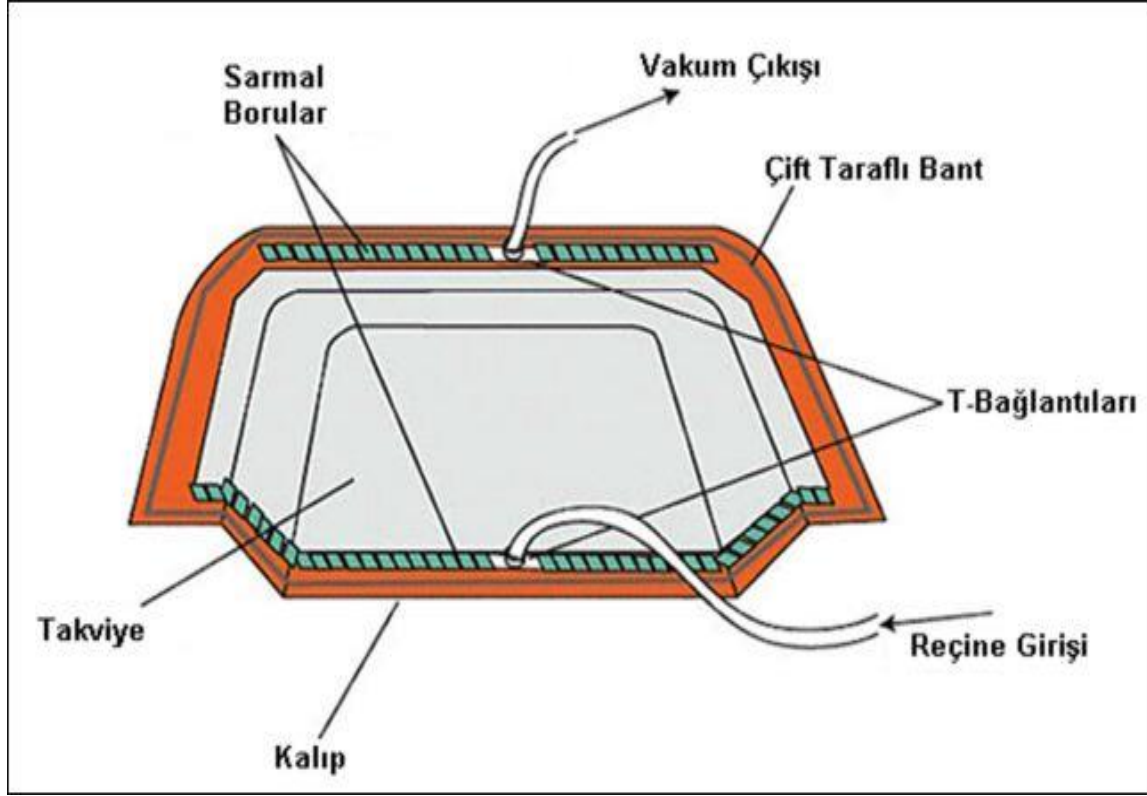
Basınç altına alınan sisteme kanallar yardımı ile reçine akışı sağlanır. Belirli süre sonucunda kürlenen malzeme kalıptan çıkartılır. Maliyeti yüksek bir üretim yöntemidir. Hem kalıplar hem de kullanılan malzemeler açısından pahalı bir yöntem olduğu için seri üretim için tercih edilmemektedir [24].



Şekil 2.8. RTM ile kompozit üretimi [28]

2.3.5. Vakum infüzyon yöntemi

Kompozit üretiminde uygun maliyet ve kolay uygulama açısından tercih edilen bir yöntemdir. Kullanılan kalıp üzerinin temiz olmasına dikkat edilmelidir. Bu durum tüm kompozit üretiminde kullanılan kalıplar için geçerli bir durumdur. Kalıp üzerine kalıp ayırıcı uygulandıktan sonra elyaf serimi yapılır. Daha sonra sırasıyla soyma kumaşı (peel ply), infüzyon filesi ve vakum naylonu serilir. Vakum naylonu çift taraflı bant yardımı ile kalıba sabitlendikten sonra sistem vakum altına alınır. Vakum işleminden sonra diğer kısımdan reçine akışı sağlanır. Malzeme vakum altında reçine akışından sonra kurlmeye bırakılır. Şekil 2.9' da vakum infüzyon yöntemi yer almaktadır. Belirli bir yüksek sıcaklıkta ve oda sıcaklığında kurlenen malzeme kalıptan çıkartılır. İstenilen elyaf ve reçine türü kullanılabilir. Büyük boyutlardaki parçaların üretimi için oldukça uygundur. RTM yöntemine göre maliyeti oldukça düşüktür [24].

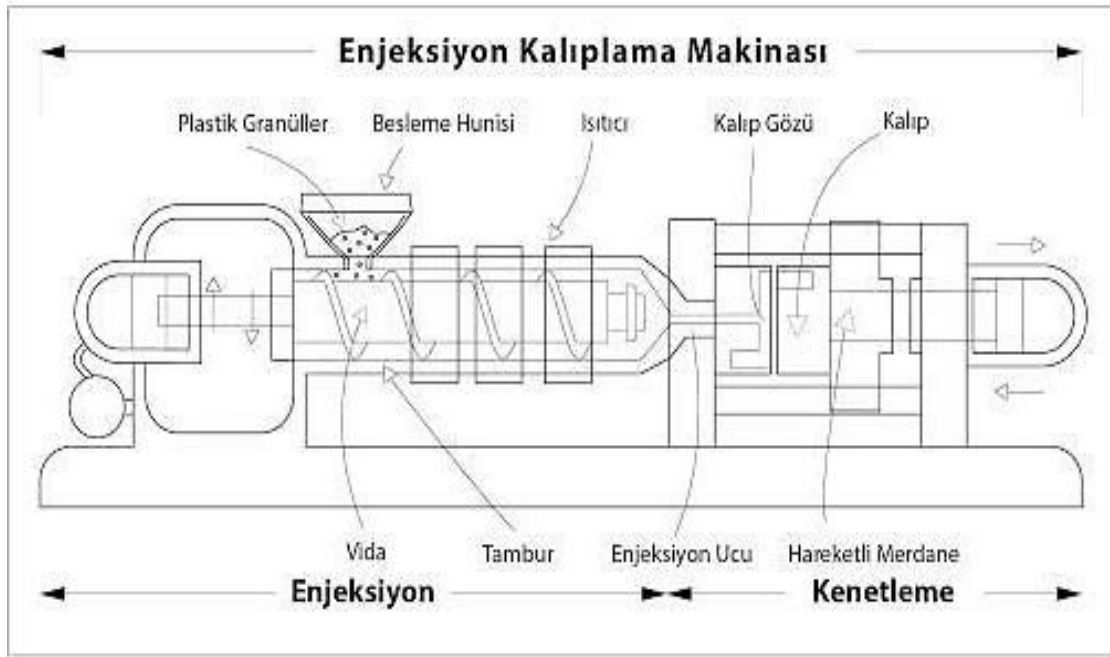


Şekil 2.9. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi [29]

2.3.6. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Termoplastik kompozit malzeme üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Termoplastik malzeme granül ve toz formda huni aracılığı ile makineye gönderilir. Malzemenin vida hattı boyunca belirli sıcaklıklarda ilerlemesi sağlanır. Vida sisteminin olduğu bölümde ısıtıcılar mevcuttur ve kademeli olarak malzemenin belirli sıcaklıklarda erimesi sağlanır.

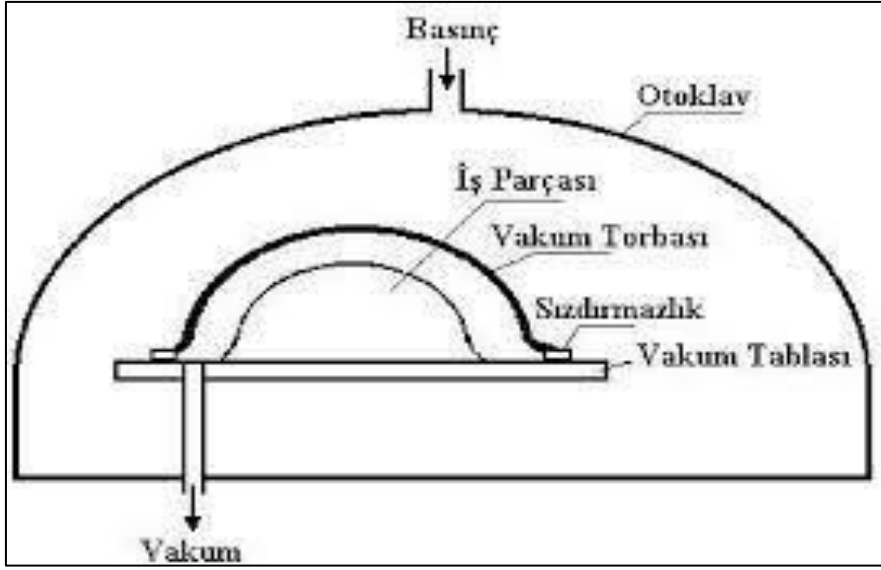
Böylelikle işlem boyunca meydana gelecek donma ve malzemedan kaynaklı tıkanma gibi bazı olumsuz durumlar engellenmiş olur. Şekil 2.10’da enjeksiyon kalıplama yöntemi ve cihaz bölümleri gösterilmiştir. Enjeksiyon sistemleri otomatik çalışan sistemlerdir. Malzeme ergime sıcaklığına ulaştığı zaman kalıplama işlemi yapılır. Kalıba alınan malzeme kalıp içerisinde soğuması beklenir ve kalıptan çıkartılır. Kalıp içerisinde soğuması sayesinde şekil bozuklukları önlenmiş olur [24].



Şekil 2.10. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi [30]

2.3.7. Otoklav yöntemi

Otoklav yöntemi termoplastik kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Uygulama Şekil 2.11’de yer almaktadır. Kalıp üzerine yerleştirilen elyaf kumaşlar veya prepreg kumaşlarının serim işleminden sonra vakum torbası veya membran yardımı ile üst kısım kapatılır. Daha sonra basınç altında kürleme işlemi yapılır. Prepreg kumaşlar önceden reçine emdirilmiş kumaş türleridir. İşlem esnasında ekstra bir reçine ilavesine gerek yoktur. Eğer işlemde elyaf kumaş tercih edilmiş ise vakum işleminden sonra reçine girişi sağlanır ve daha sonra basınç altında kürleme işlemi uygulanır. Sistem sadece termoplastik kompozitler için değil, termoset kompozit malzemeler için de uygundur. Reçine olarak epoksi, yüksek sıcaklık reçineleri ve fenolik reçineler tercih edilmektedir. Sistemin dezavantajı ise maliyetinin yüksek olmasıdır [24].



Şekil 2.11. Otoklav yöntemi ile kompozit üretimi [31]

2.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanları

Polimer matrisli kompozit malzemeler çağımızdaki teknolojik ilerlemeyle birlikte hemen hemen her alandaki birçok parça veya elemanda karşımıza çıkmaktadır. Özellikle ileri teknoloji tasarımların kullanıldığı savunma, ulaşım, havacılık ve uzay sektörlerinde son yıllarda polimer matrisli kompozitlerin kullanımı geliştirilerek artmaktadır [21].



Resim 2.1. Kompozit malzeme uygulama alanları

3. BOR

3.1. Bor Nedir?

Bor, periyodik cetvelde 5. elementtir. 3A grubunda yer almaktadır. Genelde ametal olarak kabul edilse de metalik özellikler de gösterdiği için metaloid olarak da tarif edilmektedir. Bor özellikleri bakımından bulunduğu grubu simgelememektedir. Daha çok, özellik olarak silisyum ve karbon özelliklerini göstermektedir. Bu elementin fiziksel ve kimyasal özellikleri ayrıca oluşturduğu bileşiklerin moleküler yapılarını da etkilemektedir.

Bor ve bor bileşikleri, kimyanın birçok alanında özel bir yer almaktadır; çünkü bor elementinin oluşturduğu olağanüstü molekül şekillerinin incelenmesinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda kimyasal bağ teorisi gelişmiştir [32].

3.2. Borun Kullanım Alanları

Türkiye, Dünya bor rezervlerinin %73'ne sahiptir. Ülkemizdeki rezervler genel olarak Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç, Kütahya-Emet, Bursa-Kestelek'te bulunmaktadır. Rezerv olarak en çok bulunan bor cevherleri Kolemanit ve Tinkal'dir [33].

Bor elementi yüksek sertlik, kimyasal direnç, mekanik dayanım, ısıya dayanıklılığı sayesinde birçok alanda tercih edilmektedir. Bu özellikleri ışığında seramik, metalürji ve malzeme, temizlik, savunma gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur [34].

3.3. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN)

Bor nitrür, doğada direk bulunmadığı için bor ve azot elementlerinin tepkimesinden elde edilmektedir. Bor elementinin oksijene karşı birleşme eğilimi, azota göre daha yüksektir. Bor nitrürün iki önemli yapısı mevcuttur. Hegzagonal ve kübik bor nitrürler endüstriyel ürünlerdir. Üretimi için çeşitli yöntemleri vardır. Grafit yapıya benzer özellik göstermektedir ve tabaka (laminer) şekline sahiptir. Hegzagonal bor nitrür bu tabakalı şekil sayesinde yağlayıcı bir özellik göstermektedir. hBN malzemelere vakum altında işlem yapılabilir. Bu yağlayıcı özelliği sayesinde aynı zamanda yüksek sıcaklığa da dayanıklıdır. Yüksek erime noktası, düşük elektrik iletkenliği, yüksek termal iletkenlik gibi

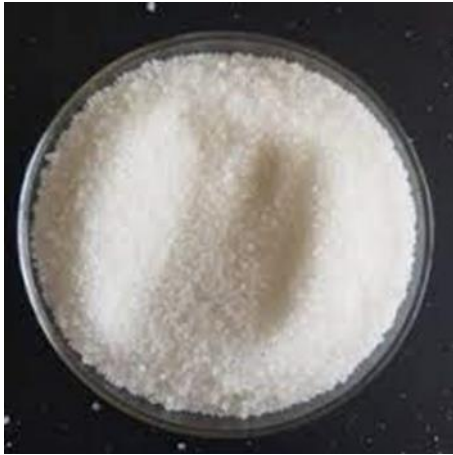
diğer önemli özelliklere sahiptir [32]



Resim 3.1. Hegzagonal Bor Nitrür

3.4. Çinko Borat

Çinko boratlar sodyum ve kalsiyumdan sonra en fazla ticari öneme sahip olan endüstriyel borattır. Alev geciktirici ve duman bastırıcı özellikleri sayesinde hidratlı ürünler geliştirilmiştir. Çinko boratlar amorf veya kristalin maddelerdir. Suda çözünürlükleri düşüktür ve kararlı bileşiklerdir [32]



Resim 3.2. Çinko Borat

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Malzemeler

Kompozit malzemelerin üretiminde Dost Kimya'dan temin edilen düz dokuma karbon elyaf (200g/m^2) kumaş kullanılmıştır. Hexion marka MGS L160 epoksi reçine ve MGS H160 sertleştirici kullanılmıştır. Mekanik ve termal özelliklere olan etkisinin incelenmesi için bor katkısı olmayan kompozit malzemeler ile bor katkısı farklı oranlarda BORTEK firmasından temin edilen hegzagonal bor nitrür (hBN) ve TENMAK-BOREN bünyesinde sentezi yapılan çinko borat (ZB) kullanılmıştır. Reçine içerisine yapılan partikül takviye oranları Çizelge 4.1' de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1.Partikül takviyesi olarak kullanılan bor oranları

Bor Katkısı	Katkı Oranı (Ağırlıkça %)
Hegzagonal Bor Nitrür	0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5
Çinko Borat	0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5

4.2. Yöntem

Bu tez kapsamında karbon fiber kompozit plakalarda bor bileşiklerinin katkısı ile mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalar üç aşamada yapılmıştır.

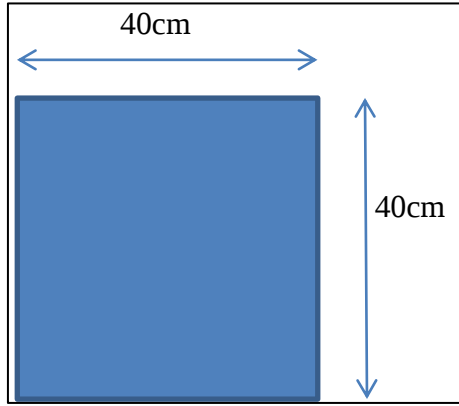
- 1.Aşama: Reçine içerisine partikül takviyesi,
2. Aşama: Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi,
3. Aşama: Plakaların test ve karakterizasyon için hazırlanması ve sonuçların değerlendirilmesi.

4.2.1. Reçine içerisine partikül takviyesi

Karbon fiber plaka için kullanılacak olan reçine katkısı üç çeşit olarak yapılmıştır. İlk olarak katkısız epoksi reçine hazırlanmış ve plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen plaka boyutuna ve istenilen kalınlığa uygun olacak şekilde miktarların hesaplaması yapılmıştır. Üretilen plaka boyutu Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Reçine hesaplama parametresi

Plaka Boyutları	Kumaş Adet	Kumaş m ² Ağırlık
40cm x 40cm	10	200g/m ²



Şekil 4.1. Plaka boyut gösterimi

Yapılan hesaplamalara göre (Çizelge 4.2); 320g epoksi, 80g sertleştirici hassas terazide tartılarak, mekanik karıştırma ile hazırlanmıştır. Partikül takviyeli reçine hazırlık aşamasında epoksi reçine içerisine farklı oranlarda (%0,5 ; 1 ; 1,5) hegzagonal bor nitrür, çinko borat katkısı yapılmıştır. Mekanik karıştırma sonrası ultrasonik homojenizatör ile partiküllerin homojen dağılması sağlanmıştır ve topaklanma önlenmiştir. Resim 4.1’de reçine hazırlık aşamaları yer almaktadır.

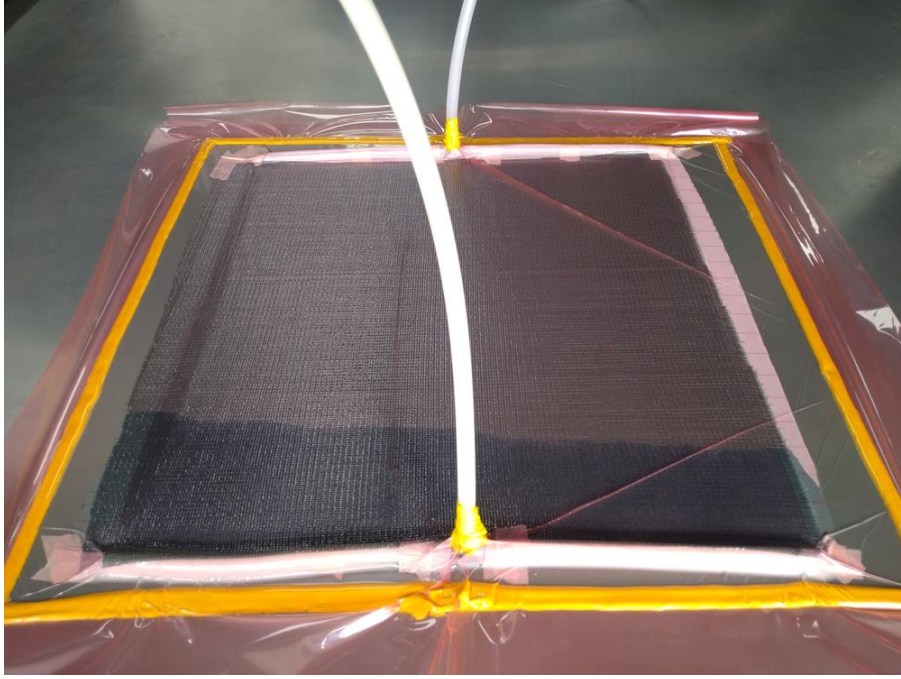


Resim. 4.1. Reçine hazırlık aşaması

4.2.2. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi

Kompozit plaka üretiminde Fibermak firmasından temin edilen alttan ısıtmalı vakum infüzyon cihazı kullanıldı ve sistemde kullanılan sarf malzemeler Dost Kimya’dan temin edilmiştir. Çalışma kapsamında sırasıyla Şekil 4.2’ gösterildiği gibi aşağıdan yukarı doğru

kalıp üzerine vakum macunu (vakum bandı) ve ayırıcı film serildikten sonra üzerine karbon fiber kumaşlar serildi. Daha sonra sırayla kumaş üzerine parçanın kürtleme sonrası düzgün çıkarılması için soyma kumaşı, reçine homojen akış sağlaması için akış filesi ve sistemin vakuma alınabilmesi için vakum torbası serildi.

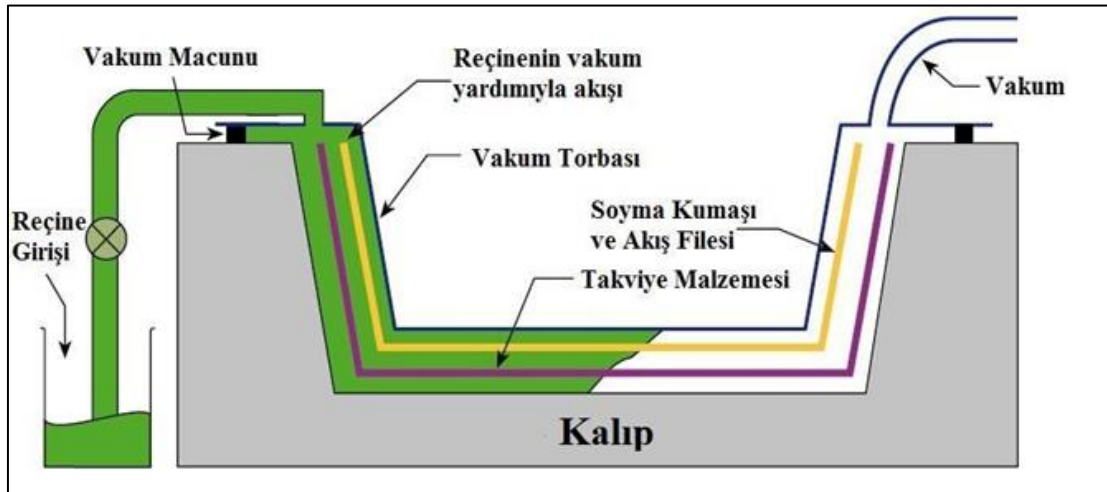


Resim 4.2. Vakum infüzyon yöntemi

Sistemde vakum torbalama aşamasında sağ ve sol kısımdan iki adet hortum girişi açıldı ve vakum işlemi ile reçine akış kontrolü bu hortumlar sayesinde yapıldı. Resim 4.2' de vakum infüzyon uygulaması yer almaktadır.

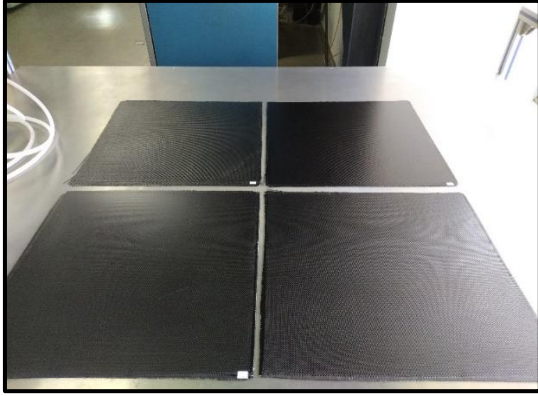


Resim 4.3. Fibermak vakum infüzyon cihazı



Şekil 4.2. Vakum infüzyon üretim uygulaması

Hazırlanan sistemde vakum pompası ile vakumlama yapılarak sistem içerisindeki hava sıfırlandı. Sonra reçine akışı sağlandıktan sonra kompozit malzeme kürlenmeye bırakıldı. Kürlenme işlemi alttan ısıtmalı vakum infüzyon sisteminde 100°C sıcaklıkta 2 saat bekletilerek yapıldı. Kürlenme sonrası elde edilen plakalar (Resim 4.4) test numuneleri için CNC Router cihazında (Resim 4.5) kesilerek hazır hale getirildi.



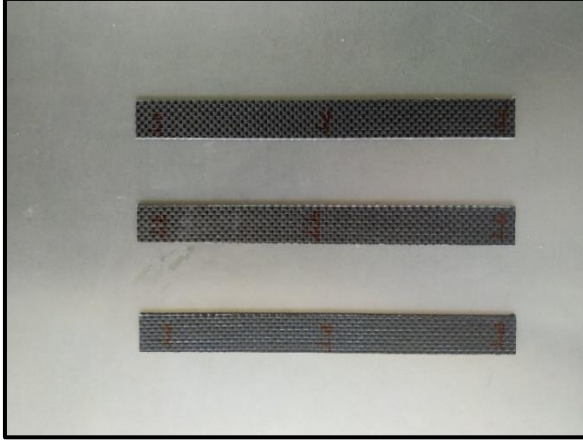
Resim 4.4. Vakum infüzyon ile üretilen plakalar

4.2.3. Plakaların test ve karakterizasyon için hazırlanması ve sonuçların değerlendirilmesi

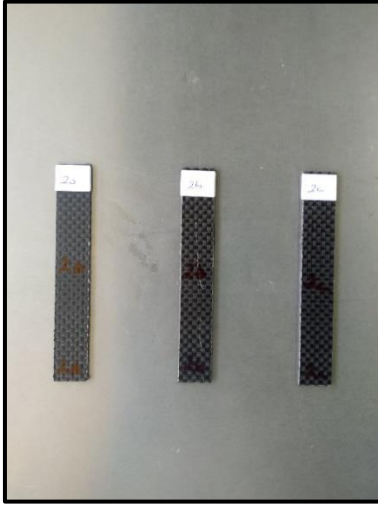
Resim 4.4’de yer alan plakalar ASTM D3039, ASTM D790 standartlarına göre CNC cihazında kesilerek termal ve mekanik testler için numuneler hazır hale getirildi. Resim 4.6 , Resim 4.7 ve Resim 4.8 de görünen test numuneleri her test türü ve üretilen her oran için (%0 ; %0,5 ; %1 ; %1,5) test standartlarına uygun olarak üçer adet test numunesi hazırlanmıştır.



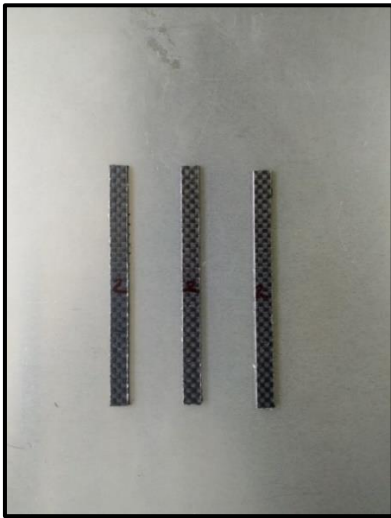
Resim 4.5. CNC Router cihazı



Resim 4.6. Çekme test numunesi



Resim 4.7. Eğme test numunesi



Resim 4.8. LOI test numunesi

4.3. Karakterizasyon İşleminde Kullanılan Testler ve Ölçümler

Çekme ve eğme test cihazı

Bor katkılı/katkısız karbon fiber kompozit plakaların mekanik testleri (çekme-eğme) için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Instron marka 100kN kapasiteli cihazda (Resim 4.9) çekme ve eğme test analizleri yapılmıştır.



Resim 4.9. Instron marka 100kN çekme ve eğme test cihazı

Limit oksijen indeks (LOI) testi

LOI genellikle malzemelerin yanıcılığını incelemek için kullanılır. Oksijen ve azot karışımındaki minimum oksijen konsantrasyon değerini ifade etmektedir. Kontrol numunelerinin LOI testleri, ASTM D 2863-2000 standardına uygun olarak Fire Technical marka cihaz ile yapılmıştır (Resim 4.10).



Resim 4.10. LOI cihazı

Tane boyutu analizi

Çalışmalarda kullanılan bor tozlarının partikül boyut analizi için Malvern/Mastersizer 3000 Marka lazerli tane boyutu cihazı kullanılmıştır (Resim 4.11).



Resim 4.11. Malvern/Mastersizer 3000 Marka lazerli tane boyutu cihazı

X ışını kırınım (XRD) spektroskopisi

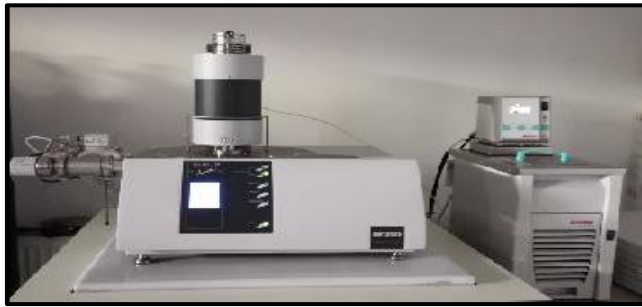
Karbon fiber kompozit plakalarının borlu ve borsuz olarak kristal yapısındaki değişikliği analiz etmek için X-ışını kırınım (XRD) spektroskopisi kullanıldı. XRD desenleri, 40 kV ve 45 mA'da bir Malvern Panalytical Empyrean marka cihaz (Resim 4.12) kullanılarak kaydedildi.



Resim 4.12. Malvern Panalytical Empyrean marka XRD cihazı

Termogravimetrik analiz (TGA)

Deneylerde hazırlanmış olan karbon fiber kompozit plakaların termal özelliklerinin belirlenmesinde ve sıcaklık ile yapıda gerçekleşen değişimlerin incelenmesi için Netzsch marka STA 449 F3 Jupiter model TGA cihazı kullanılmıştır. Üretilen kompozit plakalara (borlu ve borsuz) yapılan analizler 25-800°C sıcaklık aralığında 10 C/dk ısıtma hızında argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.



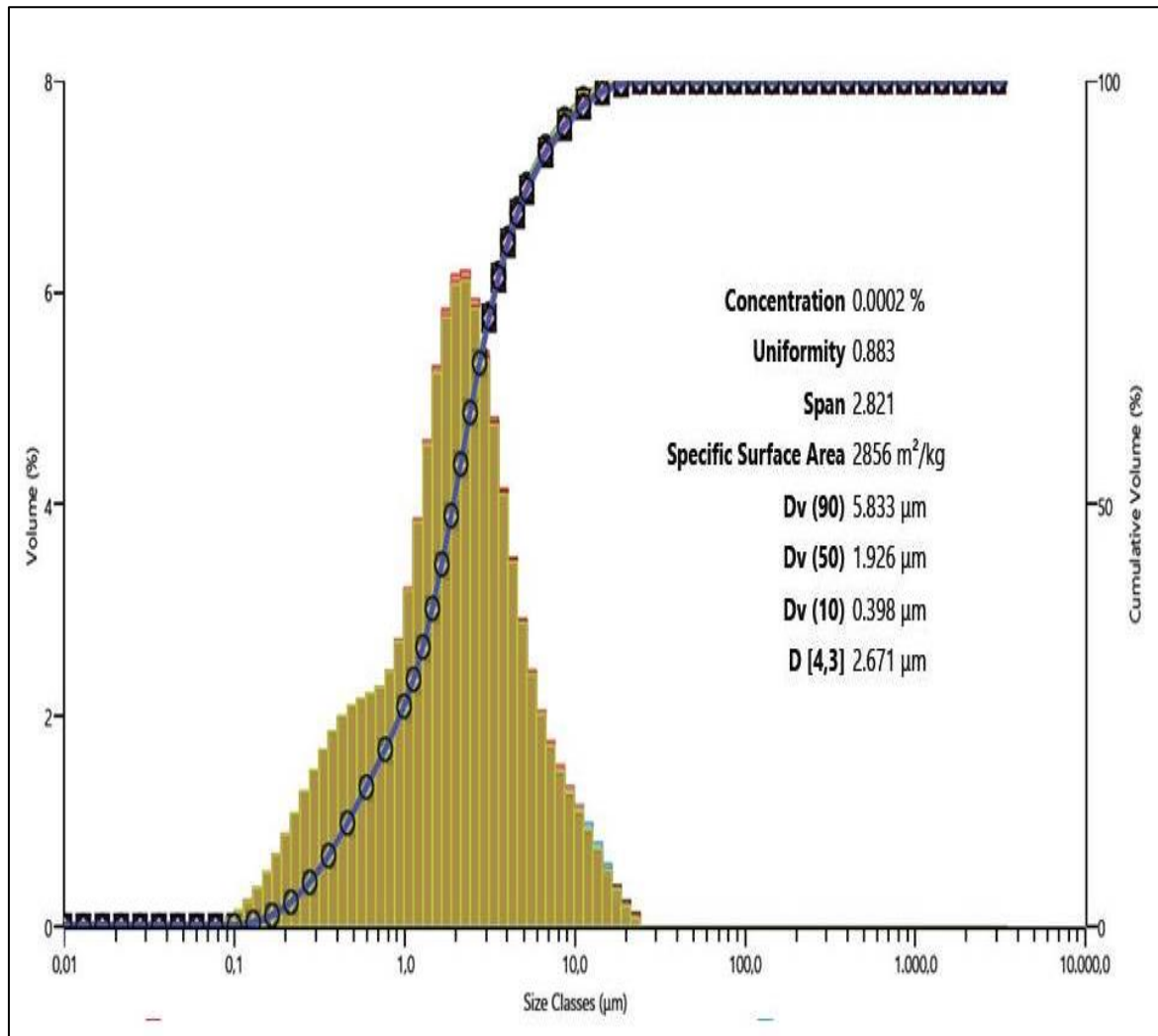
Resim 4.13. Termogravimetrik analiz (TGA) cihazı

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

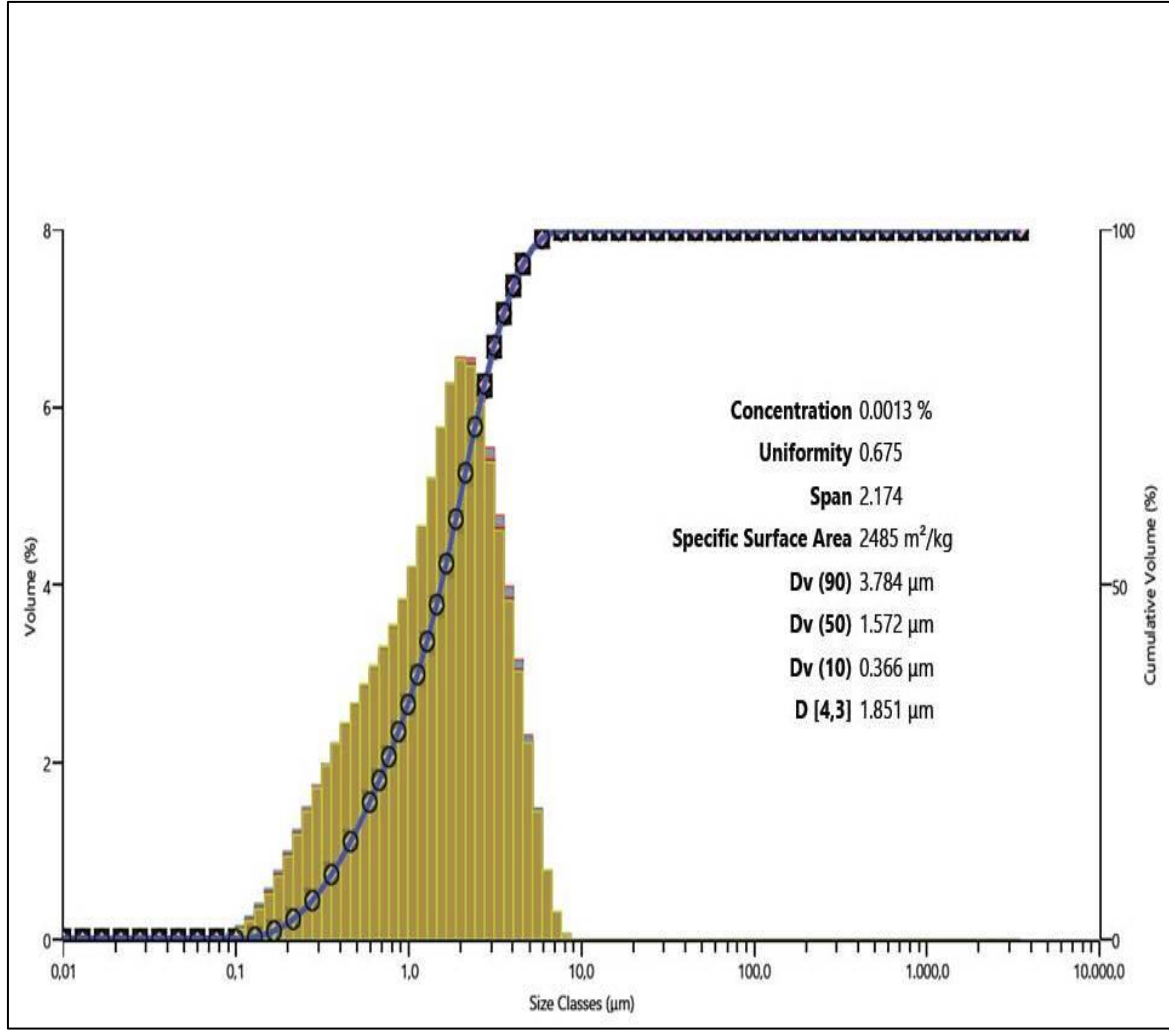
Bu çalışmada ilk olarak karbon fiber kompozit malzemelerde kullanılan bor bileşiklerinin tane boyutları incelenmiş ve üretilen kompozit plakaların karakterizasyon testleri yapılmıştır. Sonraki aşamada mekanik ve termal özellikleri için farklı oranlarda yapılan katkılandırmaların etkisi incelenmiştir. Üretilen plakalardan elde edilen test numunelerine çekme, eğme, LOI, XRD, DTA-TG analizleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1. Bor Bileşiklerinin Tane Boyutu Analizi

Karbon fiber kompozit plaka üretiminde kullanılan hegzagonal bor nitrür ve çinko borat tane boyutu analizi Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de yer almaktadır.



Şekil 5.1. hBN tane boyutu analizi



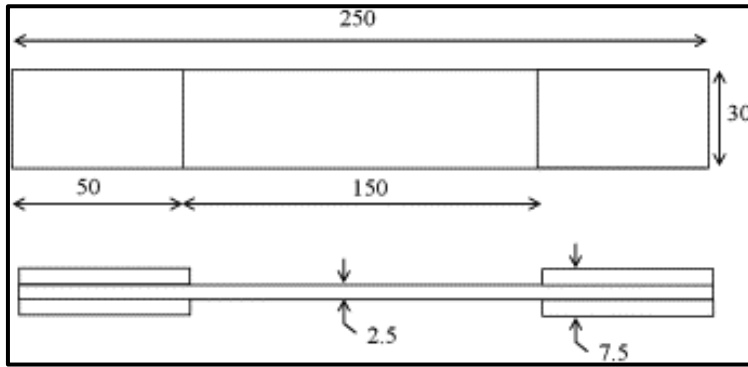
Şekil 5.2. Çinko borat tane boyutu analizi

Karbon fiber kompozit malzemelerde kullanılan bor bileşiklerinin tane boyutu belirlenmesi için boyut analizleri yapılmıştır. Tane boyutu dağılım grafiğinde boyut dağılım eğrisindeki %10 (D10), %50 (D50), %90 (D90) kümülatif miktarlar yer almaktadır. Hegzagonal bor nitrür tozunun tane boyutu (D50) 1,926µm'dir. Çinko borat tozunun tane boyutu (D50) 1,572µm'dir. Tane boyut ve yüzey alanı gibi sonuçları etkileyecek olan parametrelere dikkat edilmiştir. Birbirlerine yakın değerlerde tane boyutlarına sahip toz numuneleri kullanılmıştır.

5.2. Çekme ve Eğme Test Analizi

Çalışmanın bu kısmında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit plakaların farklı oranlarda borlu ve borsuz olmak üzere elde edilen plakaların çekme ve eğme test analiz sonuçları verilmiştir.

Çalışma kapsamında ASTM D3039 standardına göre numuneler CNC cihazında hazırlanmıştır. Her test ve her bor katkı oranı için üçer adet test numunesi hazırlanmıştır. Çekme testi 2mm/dk çekme hızında kontrollü olarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 5.3'te ASTM D3039 standardına göre çekme test numunesi yer almaktadır.



Şekil 5.3. ASTM D3039 Çekme testi numunesi [35]

Çizelge 5.1. Bor katkısız kompozit numune çekme testi sonuçları

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	624,64	11,017
2	653,192	11,39
3	608,412	9,285
Ortalama	628,75	10,564
Standart Sapma	22,672	1,123

Bor katkısız numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.1'de yapılan çekme testi sonucuna göre bor katkısız numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 628,75MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 10,564GPa' dır.

Çizelge 5.2. %0,5 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	785,34	14,553
2	477,429	9,773
3	832,815	14,386
Ortalama	698,53	12,904
Standart Sapma	92,94	2,712

%0,5 hegzağonal bor nitrür katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.2’de yapılan çekme testi sonucuna göre %0,5 hBN katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 698,53MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 12,904GPa’ dır.

Çizelge 5.3. %1 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	820,52	12,291
2	765,552	10,562
3	833,632	15,215
Ortalama	806,56	12,689
Standart Sapma	36,121	2,35

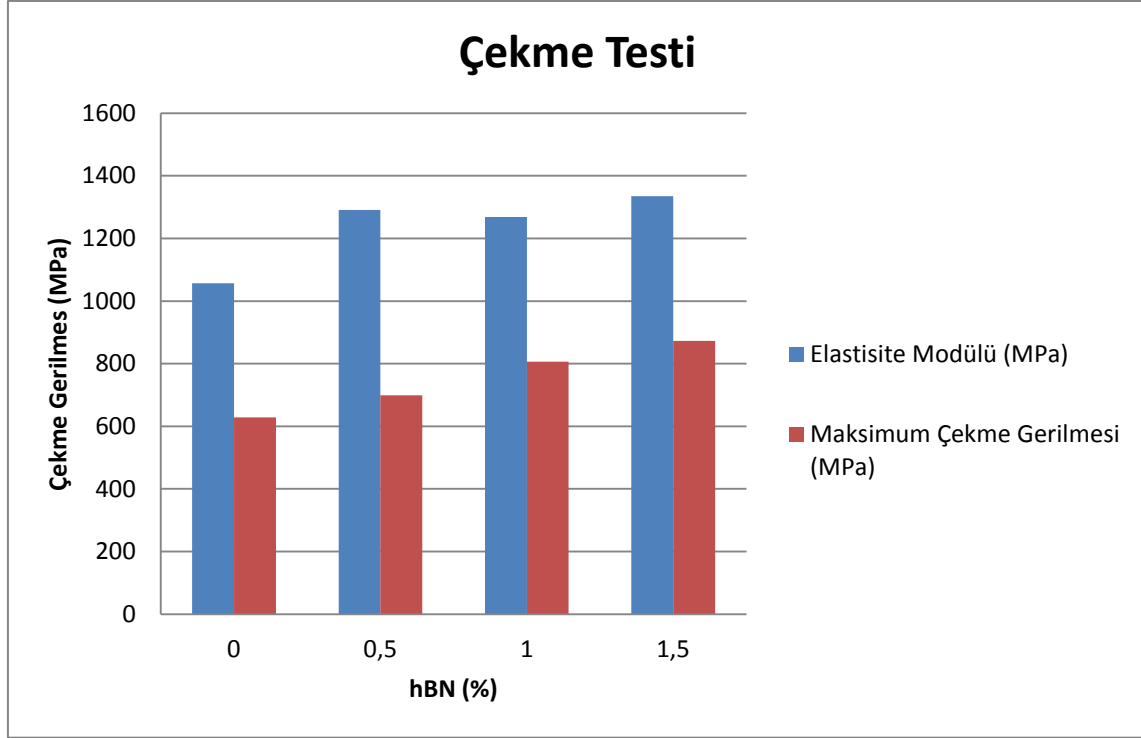
%1 hegzağonal bor nitrür katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.3’de yapılan çekme testi sonucuna göre %1 hBN katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 806,56MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 12,689GPa’ dır.

Çizelge 5.4. %1,5 hBN katkılı kompozit numune çekme testi sonuçları

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	890,54	13,584
2	802,730	14,526
3	923,978	11,938
Ortalama	872,416	13,349
Standart Sapma	62,623	1,309

%1,5 hegzağonal bor nitrür katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.4’de yapılan çekme testi sonucuna göre %1,5 hBN katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 872,416MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 13,349GPa’ dır.

Yapılan hegzagonal bor nitrür çekme testi sonuçları incelendiğinde karbon elyaf kompozit plakalarda bor katkı oranının artırılması ile doğru orantılı olarak bir etki oluşturduğu görülmektedir. Bor katkısız plakalara kıyasla hBN katkılı plakalarda mekanik dayanımın arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4. hBN Çekme testi sonucu

Çizelge 5.5. %0,5 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	761,3	5,349
2	740,82	5,773
3	777,79	5,625
Ortalama	759,9	5,583
Standart Sapma	18,5	2,15

%0,5 çinko borat katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.5'te yapılan çekme testi sonucuna göre %0,5 çinko borat katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 759,9MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 5,583GPa' dır.

Çizelge 5.6. %1 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi

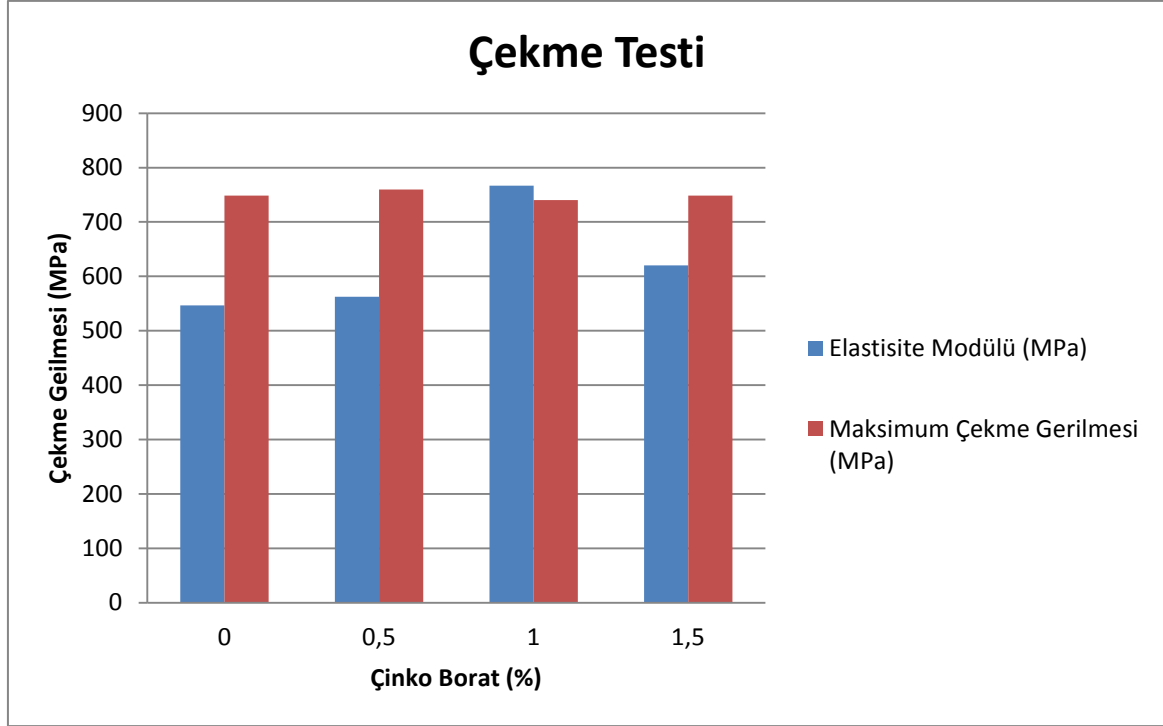
Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	724,4	5,64
2	740,12	9,69
3	726,3	5,63
Ortalama	732,2	7,67
Standart Sapma	11,1	2,86

%1 çinko borat katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.6’da yapılan çekme testi sonucuna göre %1 çinko borat katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 732,2MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 7,67GPa’ dır.

Çizelge 5.7. %1,5 çinko borat katkılı kompozit numune çekme testi

Numune No	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	748,83	6,21
2	719,12	6,15
3	681,8	5,71
Ortalama	716,5	6,02
Standart Sapma	33,6	2,69

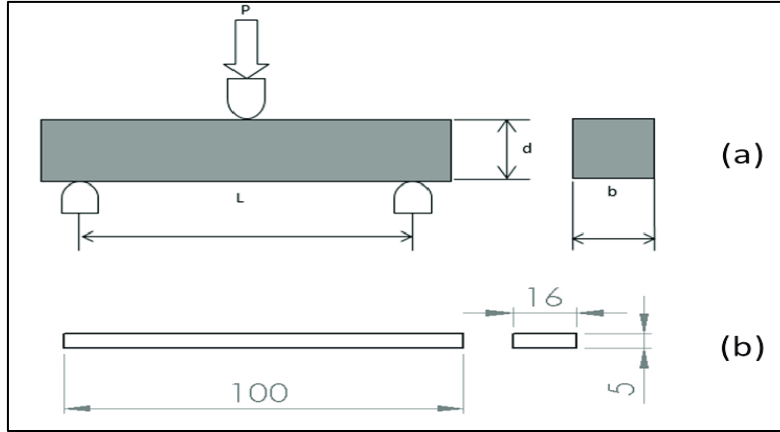
%1,5 çinko borat katkılı numunelerde yapılan çekme testi için ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.7’de yapılan çekme testi sonucuna göre %1,5 çinko borat katkılı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ortalama değeri 716,5MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 6,02GPa’ dır



Şekil 5.5. Çinko borat çekme testi sonucu

Çinko borat ve hegzagonal bor nitrür ile yapılan karşılaştırma sonucunda hBN katkısındaki çekme testi sonucu daha yüksek çıkmıştır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Her iki bor katkısı için olumlu sonuçlar görülmektedir. Maksimum katkı olan %1,5 hBN ve çinko borat katkılarında mekanik dayanım katkısız kompozit malzemeye göre yüksek değer vermiştir. Katkısız kompozit plakaya kıyasla %1,5 çinko borat katkılı plakada %1,13 verimde sonuç verirken %1,5 hBN katkılı plaka %1,38 değerinde verim elde edilmiştir. Borlu bileşikler kıyaslandığı zaman mekanik dayanım değeri hBN de daha yüksek görülmektedir. hBN mekanik özellikler doğrultusunda daha etkili olmuştur.

Çalışma kapsamında katkılı ve katkısız karbon fiber kompozit plakaların farklı oranlarda hazırlanmasından sonra ASTM D790 standardına göre numuneler CNC cihazında hazırlanmış ve üç nokta eğme testi yapılmıştır. Her numune için üçer adet kupon hazırlanmıştır. Test 2mm/dk test hızında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6 ASTM D790 standardına göre eğme test numunesi yer almaktadır.



Şekil 5.6. ASTM D790 Eğme test numunesi [36]

Çizelge 5.8. Bor katkısız kompozit numune eğme testi sonuçları

Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	681,227	33,88
2	640,122	31,82
3	738,199	35,089
Ortalama	686,516	33,59
Standart Sapma	49,25	1,65

Bor katkısız numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.8’de yapılan eğme testi sonucuna göre bor katkısız numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 686,516MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 33,59GPa’ dır.

Çizelge 5.9. %0,5 hegzagonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi

Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	860,197	43,53
2	920,653	43,955
3	813,96	41,466
Ortalama	864,93	42,98
Standart Sapma	53,50	1,331

%0,5 hBN katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.9’da yapılan eğme testi sonucuna göre %0,5 hBN katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 864,93MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 42,98GPa’ dır.

Çizelge 5.10. %1 hegzağonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi

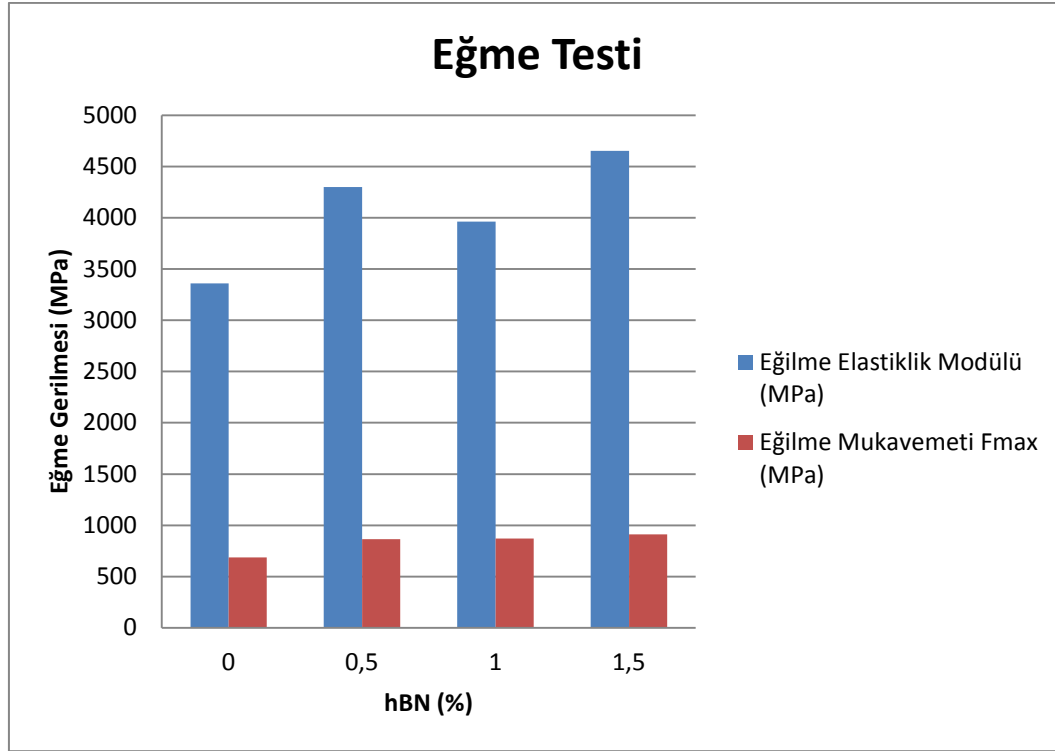
Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	833,113	37,351
2	863,80	39,788
3	916,439	41,711
Ortalama	871,11	39,61
Standart Sapma	42,14	2,18

%1 hBN katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.10’da yapılan eğme testi sonucuna göre %1 hBN katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 871,11MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 39,61GPa’ dır.

Çizelge 5.11. %1,5 hegzağonal bor nitrür katkılı kompozit numune eğme testi

Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	887,96	46,84
2	988,768	45,994
3	859,06	46,732
Ortalama	911,93	46,52
Standart Sapma	68,09	0,46

%1,5 hBN katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.11’de yapılan eğme testi sonucuna göre %1,5 hBN katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 911,93MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 46,52GPa’ dır.



Şekil 5.7. hBN Eğme testi sonucu

Çizelge 5.12. %0,5 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi

Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	579,21	44,17
2	666,13	47,209
3	599,05	43,243
Ortalama	615,13	44,875
Standart Sapma	46,2	2,07

%0,5 çinko borat katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.12’de yapılan eğme testi sonucuna göre %0,5 çinko borat katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 615,13MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 44,875GPa’ dır.

Çizelge 5.13. %1 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi

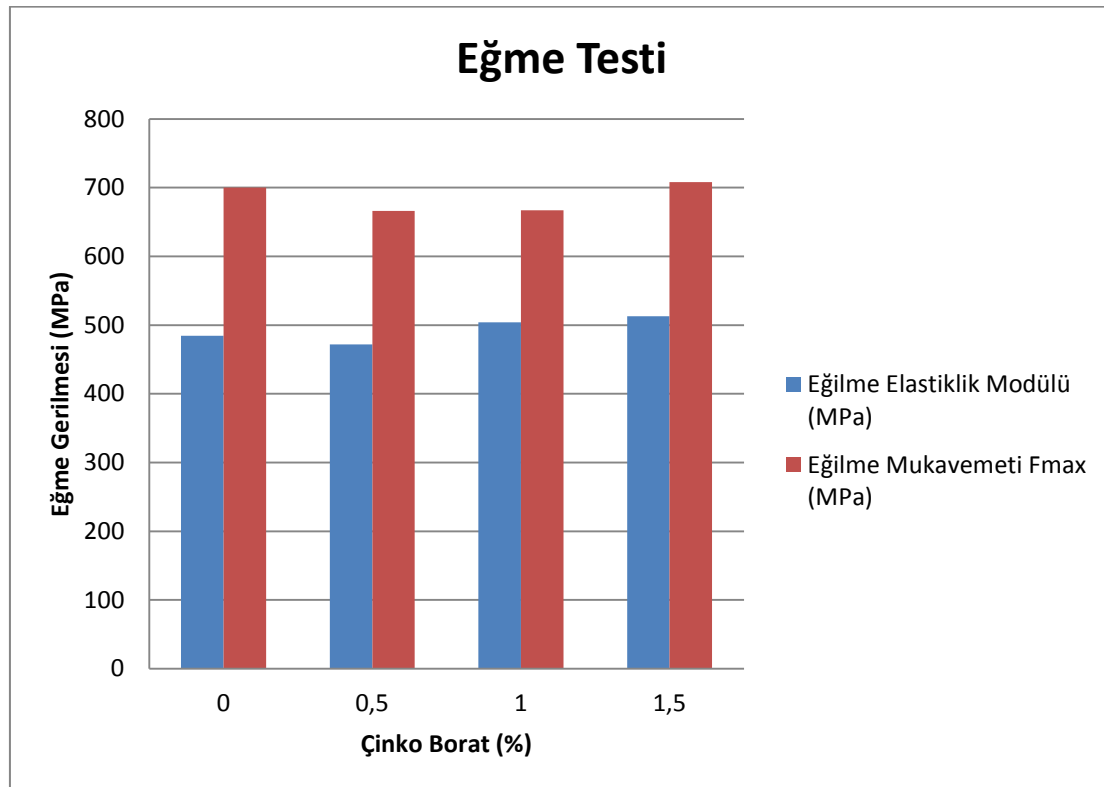
Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	667,03	50,40
2	499,13	45,71
3	606,27	46,466
Ortalama	591,14	47,524
Standart Sapma	85,3	2,52

%1 çinko borat katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.13’de yapılan eğme testi sonucuna göre %1 çinko borat katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 591,14MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 47,524GPa’ dır.

Çizelge 5.14. %1,5 çinko borat katkılı kompozit numune eğme testi

Numune No	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
1	635,24	46,495
2	664,32	48,47
3	708,16	51,29
Ortalama	669,24	48,752
Standart Sapma	37	2,41

%1,5 çinko borat katkılı numunelerde yapılan eğme testi için ASTM D790 standardına uygun hazırlanan üç adet test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5.14’de yapılan eğme testi sonucuna göre %1,5 çinko borat katkılı numunelerin maksimum eğme gerilmesi ortalama değeri 669,24MPa, elastiklik modülü ortalama değeri 48,752GPa’ dır.

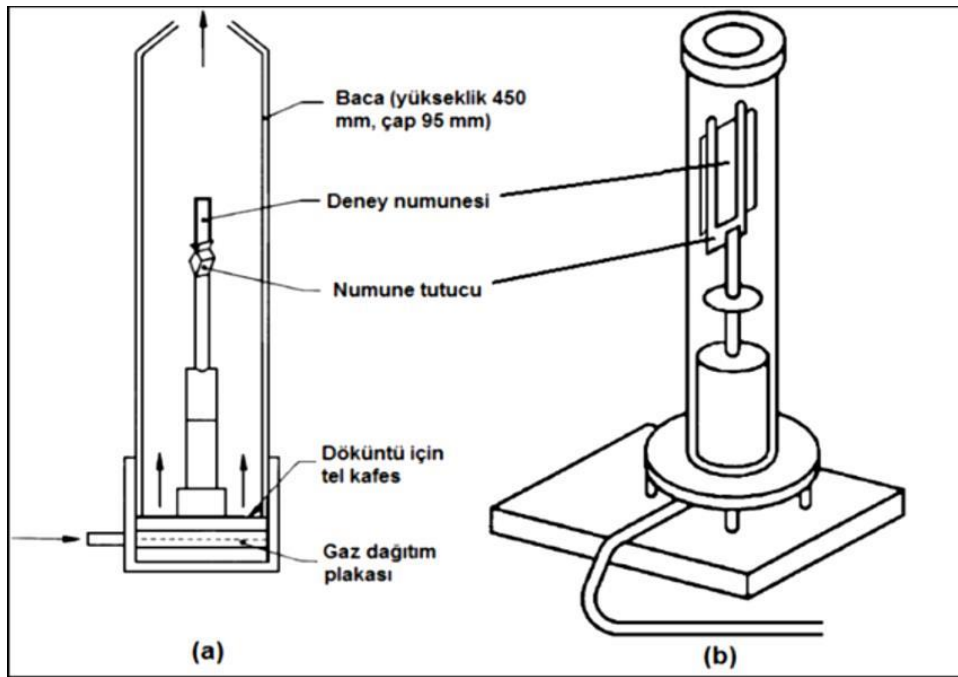


Şekil 5.8. Çinko borat eğme testi sonucu

Çinko borat ve hegzagonal bor nitrür ile yapılan çalışmalar sonucunda hBN katkısındaki eğme testi sonucu daha yüksek çıkmıştır (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). Maksimum katkı olan %1,5 hBN katkısında mekanik dayanım katkısız kompozit malzemeye kıyasla yüksek değerlerde sonuç vermiştir. Katkısız kompozit plakaya kıyasla %1,5 hBN katkılı plaka %1,32 değerinde verim elde edilmiştir. Borlu bileşikler kıyaslandığı zaman mekanik dayanım değeri hBN de daha yüksek görülmektedir.

5.3. Limit Oksijen İndeksi (LOI)

Malzemenin yanmasını sağlayan oksijen ve azot karışımı gazdaki oksijenin minimum hacim % konsantrasyonunu ifade eden LOI değeri, karbon fiber dokuma kumaşlarda, termoset epoksi polimer malzemelerde ve üretilen plakalarda alev geciktirici performansının değerlendirilmesinde önemli bir analiz yöntemidir.



Şekil 5.9. LOI testinin şematik gösterimi [41]

Çizelge 5.15. LOI'ye göre alev geciktirici malzemelerin sınıflandırılması [42]

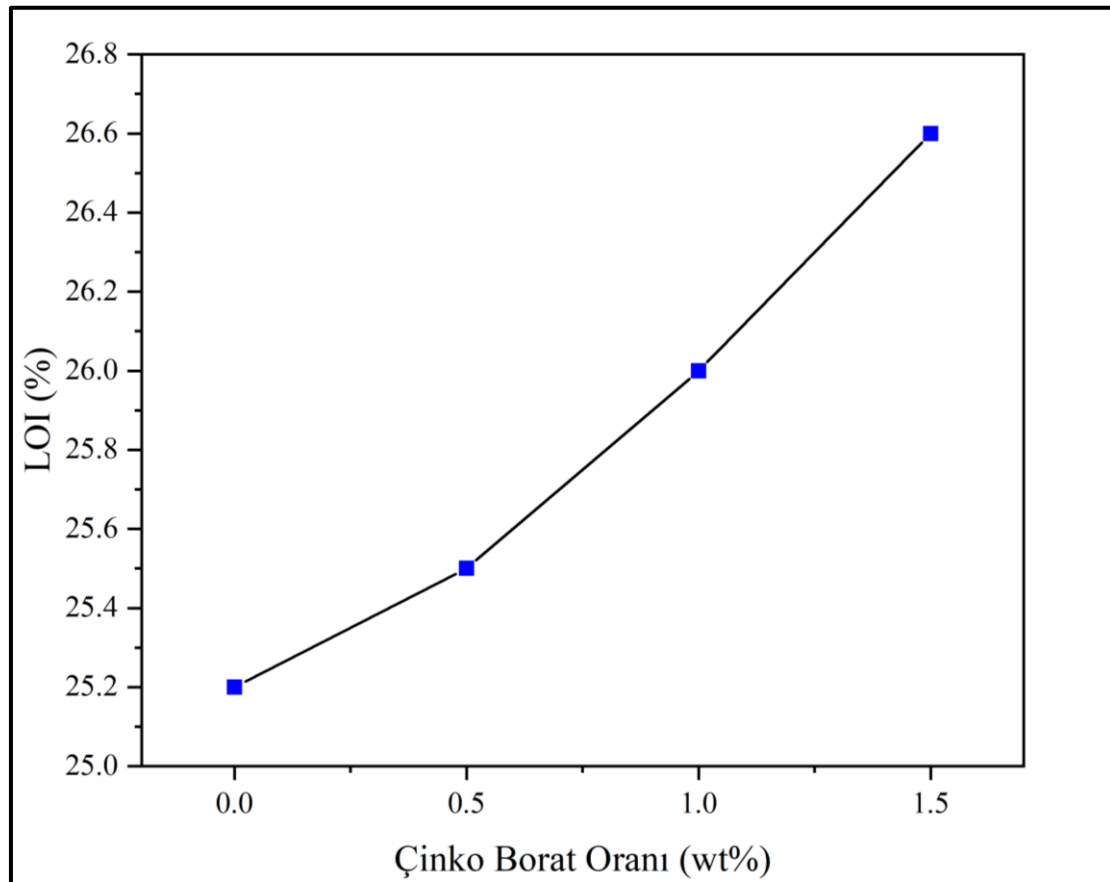
< %24	Yanabilir, alev alabilir
%24-28	Sınırlı alev geciktirici
%29-34	Alev geciktirici
> %34	Ekstra alev geciktirici

Bor bileşiminin alev geciktirici türleri mevcuttur. Bunlardan biri de çinko borattır. Bu çalışmada üretilen hBN ve çinko borat katkılı plakalardaki LOI değerleri incelenmiştir (Çizelge 5.16). CNC cihazında tüm katkı oranlarına göre üçer adet LOI test numuneleri hazırlanmıştır. ASTM D2863 standardına uygun LOI testleri yapılmıştır (Şekil 5.9).

Çizelge 5.16. Çinko borat katkılı plaka LOI sonucu

NUMUNE	LOI %
Katkısız	25,2
% 0,5 ZnB	25,5
% 1 ZnB	26
% 1,5 ZnB	26,6

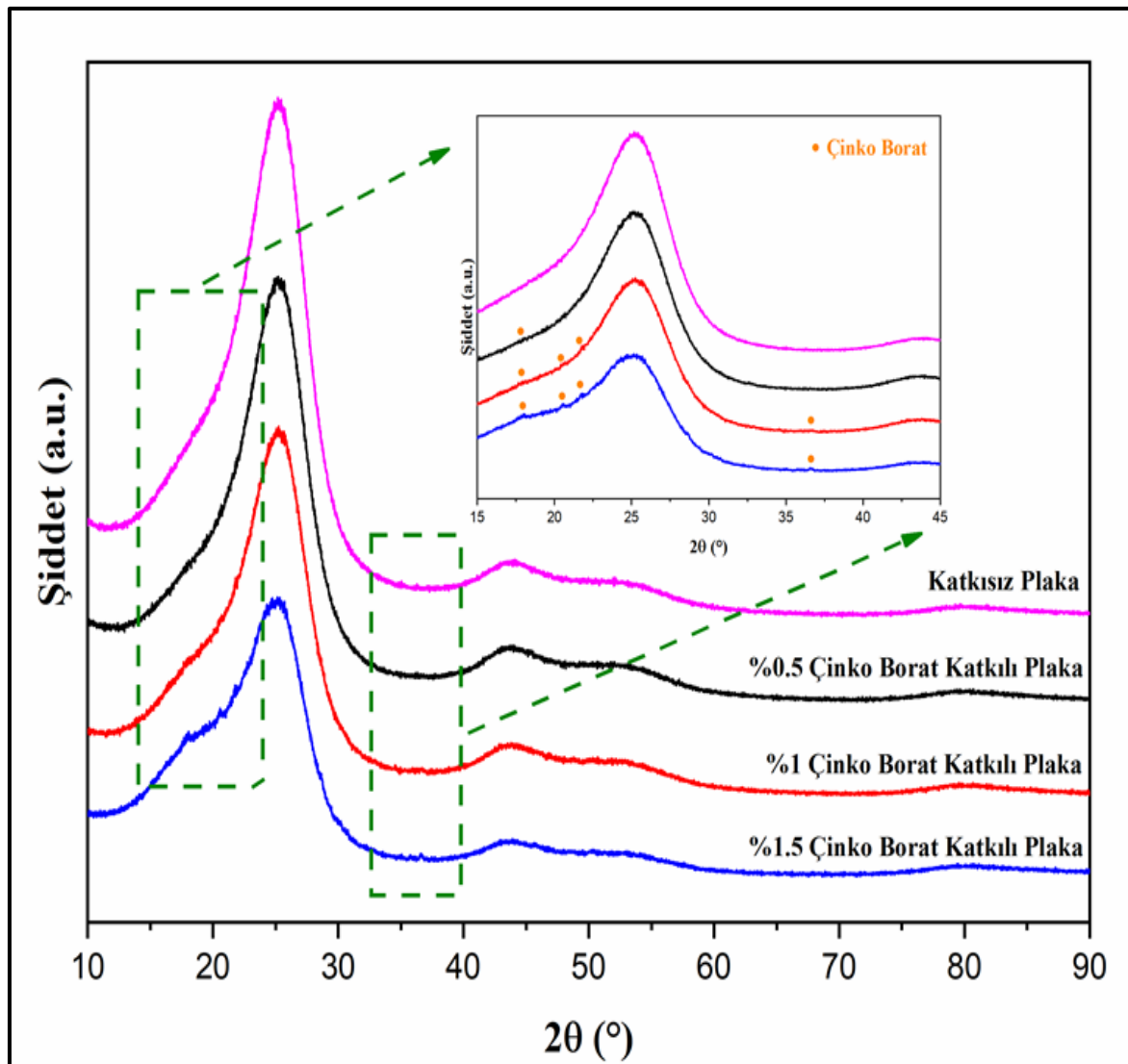
Bor katkısı yapılmayan karbon fiber kompozit plakalarda LOI değeri %25 iken %1,5 çinko borat katkısı ile LOI değeri %26,5'e yükselmiştir. Az bir miktarda yapılan katkı oranı ile birlikte alev geciktirici özelliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.10)



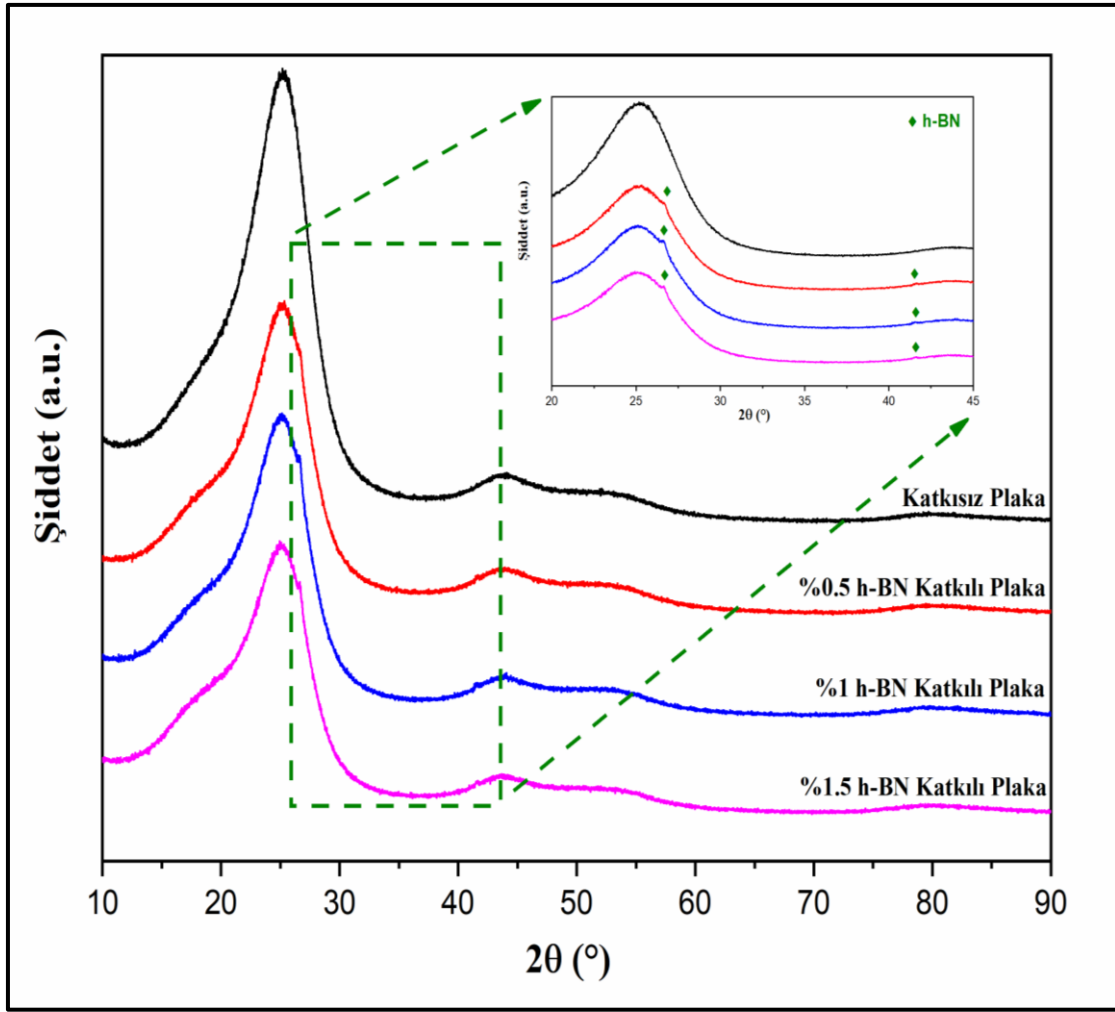
Şekil 5.10. Çinko borat limit oksijen indeksi

5.4. X-Işını Kırınım Spektroskopisi (XRD)

Karbon fiber takviyeli bor katkılı kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretildikten sonra yapısal analiz için x-ışını kırınım spektroskopisi (XRD) ölçümleri yapılmıştır. Karbon fiber amorf bir yapıya sahip olduğu için pik gözlemlenmemiştir. Kompozit plakalara katkılanırılan farklı oranlardaki hegzagonal bor nitrür ve çinko borat katkısı ile plakalara yapılan XRD analiz sonuçlarında oranlara bağlı olarak pik oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12)



Şekil 5.11. Çinko borat katkılı plakaya ait XRD deseni



Şekil 5.12. hBN katkılı plakaya ait XRD deseni

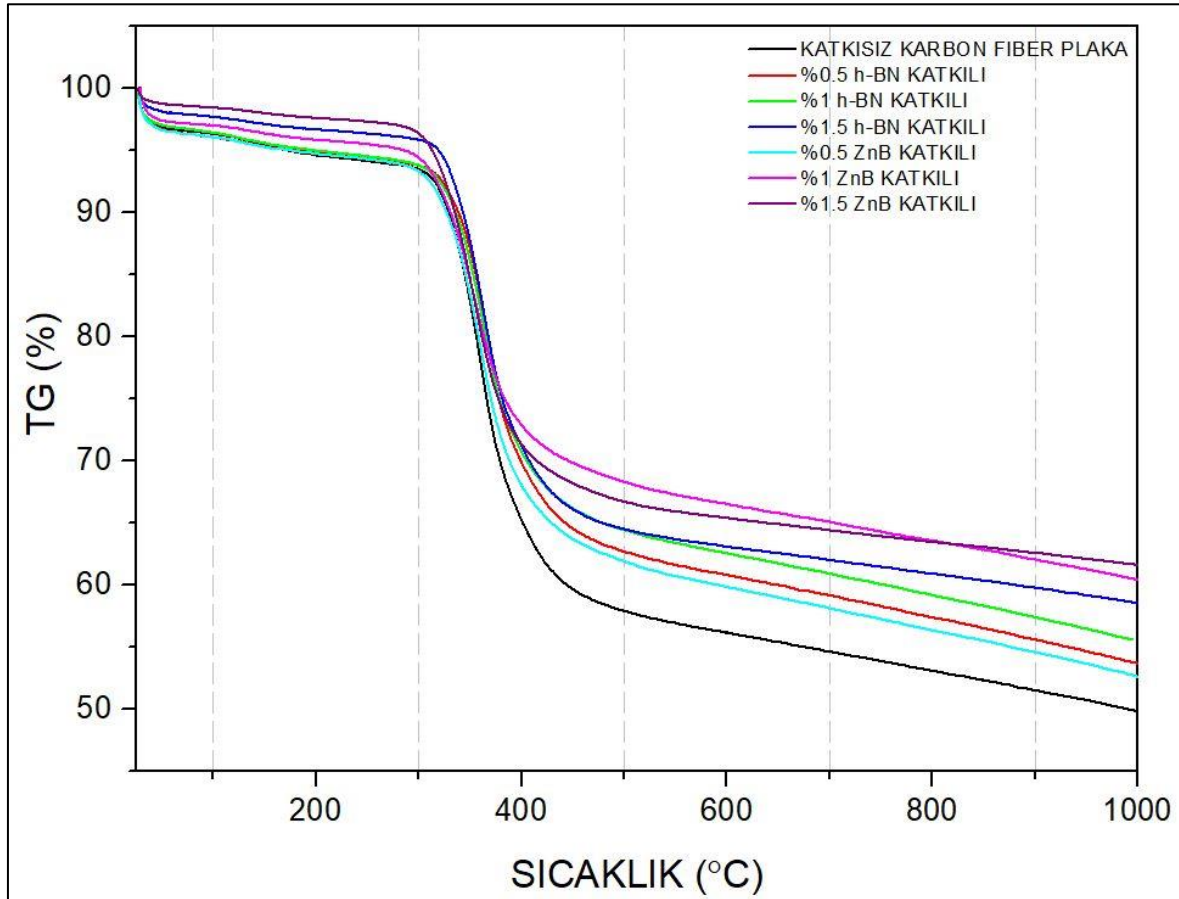
5.5. Diferansiyel Termal Analiz (DTA-TG)

Bu bölümde tez çalışması kapsamında karbon fiber borlu/borsuz kompozit plakaların termal kararlılıklarını belirlemek için diferansiyel termal analiz (DTA-TG) cihazında analizleri yapılmıştır. Üretilen kompozit plakalara (borlu ve borsuz) yapılan analizler 25-800°C sıcaklık aralığında 10 C/dk ısıtma hızında argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.

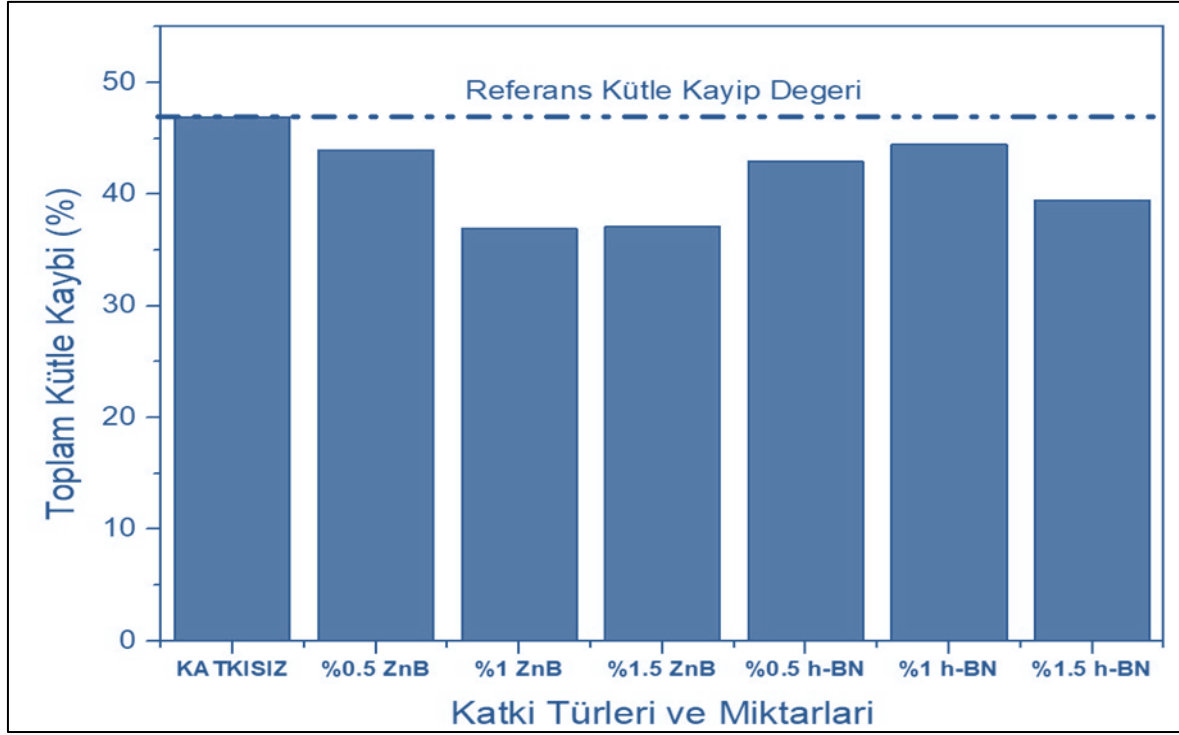
Çizelge 5.17. Kompozit plakalar DTA-TG analiz sonucu

Numune	Tmax (°C)	Kütle Kaybı (%)
Katkısız (Referans)	412,2	47,8
% 0,5 hBN	417,8	42,3
% 1 hBN	415,4	43,4
% 1,5 hBN	412,6	38,7
% 0,5 ZnB	407,9	43,1
% 1 ZnB	404,6	36,9
% 1,5 ZnB	402,7	36,4

Yapılan analizler sonucunda 400°C ve 430°C sıcaklık aralığında kütlede değişim görülmektedir. DTA-TG sonuçlarında kütle kaybındaki değişimin bor oranındaki artışa bağlı olarak tersine bir etki gözlemlenmiştir. Katkısız olan referans numune Tmax değeri 412,2°C'dir. Kütle kaybı %47,8 gösterirken bor katkısı ile bu oranlarda değişiklik görülmektedir. hBN değeri arttıkça Tmax değeri referans numuneye yakın bir sonuç elde edilmiştir. Kütle kaybında ise azalma görülmüştür. Çinko borat katkılandırması arttıkça Tmax değerinde referans numuneye kıyasla azalma görülmektedir. Kütle kaybında da azalma görülmüştür. %1,5 hBN katkısı Tmax değeri 412,6°C, kütle kaybı ise %38,7 sonucuna ulaşılmış, %1,5 çinko borat katkısı ile Tmax değeri 402,7°C iken kütle kaybı %36,4 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.13. Bor katkılı plakalara ait DTA-TG sonucu



Şekil 5.14. Bor katkı oranlarına bağlı referans kütle değerleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında vakum infüzyon yöntemi ile karbon fiber termoset kompozit plakaların üretimi yapılmıştır. Çalışmalarda farklı oranlarda (%0 ; %0,5 ; %1 ; %1,5) çinko borat ve hegzagonal bor nitrür kullanılarak kompozit plakaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardaki hedef doğrultusunda bor bileşiklerinin katkılandırılması ile düşük oranlarda bile hem mekanik hem de termal özelliklerinin iyileştirilmesi planlanmıştır. Kompozit malzemelerde bu şekildeki iyileştirmeler ile maliyet açısından da uygunluk sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmada üretilen kompozit plakalarda kullanılan farklı oranlardaki bor bileşiklerinin hem termal hem de mekanik özelliklerde farklılık sağladığı görülmüştür. Mekanik karakterizasyona bakıldığı zaman hBN katkısının, çinko borata kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür. Farklı oranlarda katkı miktarlarının artırılması ile mekanik etkideki iyileşmeler daha da artırılabilir. Düşük oranlarda da etkili sonuçlar görülmüştür.

Tozların eklenmesinde, termoset epoksi reçine içerisine katkılandırma aşamasında da çinko boratta meydana gelen topaklanma istenmeyen bir durumdur. Homojen bir dağılımın olmamasında etki oluşturmuştur. Bu yüzden her iki bor bileşiğinde de hem mekanik hem de ultrasonik karıştırma sistemi kullanılmıştır. Hegzagonal bor nitrürde bu tarz bir durumla karşılaşılmamıştır. hBN'ün çinko borata göre yağlayıcılık etkisi daha yüksektir. Bu yüzden topaklanma durumu çok görülmemiştir. Tane boyutlarının küçük olmasında bir etki olup olmadığı görülebilmesi için büyük tane boyutlu tozlar üzerinden de çalışmalar yapılabilir.

DTA-TG analiz sonuçlarına göre katkı oranlarındaki artışa da bağlı olarak %Tg değerinde artış gözlemlenmiştir. Katkısız olan karbon fiber plakaya kıyasla hem hBN hem de çinko borat en düşük ve en yüksek oranlarda farklı sonuçlar göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre 400°C - 430°C aralığında kütle kaybı başlamıştır.

Limit oksijen indeks testinde hBN katkısında oranların değişmesine rağmen alev geciktiricilik noktasında bir etkiye ulaşılmamıştır. Oranların artırılması ile hBN için tekrar bir çalışma yapılabilir. Çinko borat ise düşük oranlarda bile plakalarda alev geciktiricilik özelliği bakımından etkili olmuştur. Katkı oranı arttıkça LOI değerinde de artış gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmalar kapsamında farklı bor bileşiklerinin farklı katkı oranları ile vakum infüzyon yöntemi ile üretilen karbon fiber kompozit plakalarda iyileştirici özellikler sağladığı görölmüştür. Polimer matris termoset epoksi karbon fiber kompozit malzemelerde bor bileşiklerinin düşük oranlarda bile etkili olabileceğı görölmektedir.

KAYNAKLAR

1. Wang, M., Jiao, Z., Chen, Y., Hou, X., Fu, L., Wu, Y. and Yu, J. (2018). Enhanced thermal conductivity of poly (vinylidene fluoride)/boron nitride nanosheet composites at low filler content. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 321-329.
2. Geng, R., Xu, Y., Songfeng, E., Li, C., Yu, C., Li, T. and Yao, Y. (2018). Bio-inspired synthesis of highly crystallized hexagonal boron nitride nanosheets. *Ceramics International*, 44(12), 14228-14235.
3. Altuntaş, E., Karaoğlu, E. ve Alma, M. H. (2017). Odun-plastik kompozitlerin termal ve yanma özellikleri üzerine borlu bileşiklerin etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 18(3), 247-250.
4. Kartal, İ. and Boztoprak, Y. (2019). Bor Nitrür partikülleriyle takviyelendirilmiş vinil ester matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(1), 43-50.
5. Schwartz, R. T. and Schwartz, H. S. (1967). Characteristics of boron fibers and boron-fiber-reinforced plastic composites. *AIAA Journal*, 5(2), 289-295.
6. Wootthikanokkhan, J., Cheachun, T., Sombatsompop, N., Thumsorn, S., Kaabuuathong, N., Wongta, N. and Kositchaiyong, A. (2013). Crystallization and thermomechanical properties of PLA composites: Effects of additive types and heat treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(1), 215-223.
7. Brack, N., Rider, A. N., Halstead, B. and Pigram, P. J. (2005). Surface modification of boron fibres for improved strength in composite materials. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(10), 857-877.
8. Uygunoglu, T., Gunes, I. and Brostow, W. (2015). Physical and mechanical properties of polymer composites with high content of wastes including boron. *Materials Research*, 18(6), 1188-1196.
9. Xu, Z., Chen, Y., Chen, X., Zhang, J., Huang, S., Chen, A. and Zhang, P. (2021). Enhanced thermal conductivity and electrically insulating of polymer composites. *Journal of Materials Science*, 56(6), 4225-4238.
10. Zeng, X., Yao, Y., Gong, Z., Wang, F., Sun, R., Xu, J. and Wong, C. P. (2015). Ice-templated assembly strategy to construct 3D boron nitride nanosheet networks in polymer composites for thermal conductivity improvement. *Small*, 11(46), 6205-6213.
11. Pan, C., Zhang, J., Kou, K., Zhang, Y. and Wu, G. (2018). Investigation of the through-plane thermal conductivity of polymer composites with in-plane oriented hexagonal boron nitride. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 1-8.
12. Ayırmis, N., Dundar, T., Kaymakci, A., Ozdemir, F. and Kwon, J. H. (2014). Mechanical and thermal properties of wood- plastic composites reinforced with hexagonal boron nitride. *Polymer Composites*, 35(1), 194-200.

13. Wang, X. B., Weng, Q., Wang, X., Li, X., Zhang, J., Liu, F., Jiang X. F., Guo, H., Xu, N., Golberg, D. and Bando, Y. (2014). Biomass-directed synthesis of 20 g high-quality boron nitride nanosheets for thermoconductive polymeric composites. *ACS Nano*, 8(9), 9081-9088.
14. İnternet: Accluster (2022). *Kompozit malzemelerin yapısı*. Web: <https://accluster.com/blog-post.html?kategori=kurumsal&slug=kompozit-malzemelerin-yapisi>. Son Erişim Tarihi:07.10.2022.
15. Chung, D. D. (2010). *Composite materials: science and applications* (Second edition). New York: Springer Science & Business Media, 348.
16. Ercan H.(2015). *Epoksi/MWCNT ve Epoksi/BN kompozit malzemeler*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 3-32.
17. Gemci, R. (2002). Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, 7(1), 93-116.
18. Mıstık, S. İ. (2009). *Bor lifi takviyesinin polimer esaslı kompozit yüzeylerin mekanik özelliklerine etkileri*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 48-62.
19. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering* New York: John Wiley & Sons., 412.
20. Balcı, M. (2020). *Nanoselüloz ve Bor Nitrür katkılı polimer kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 26-32.
21. Gülmez, S. (2018). *Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler*. Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 12-30.
22. Dutton, S., Kelly, D. and Baker, A. (2004). *Composite materials for aircraft structures*. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 599.
23. Miracle, D. B., (2001). ASM handbook. In *Materials Park*. OH: ASM International, 218.
24. Beşergil, B. (2016). *Kompozitler temel ilkeler: Test metotları*. Ankara: Gazi Kitabevi.
25. Durgun, İ. (2014). *El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi*. 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara, 45-52.
26. İnternet: Silo (2022). *Kompozit malzeme üretim yöntemleri*. Web: <https://silo.tips/download/3-kompozit-malzeme-retm-yntemler>. Son Erişim Tarihi: 08.10.2022.

27. Dinkci, H. (2020). Vakum torbalamada basınç değişkeninin karbon elyaf matrisli epoksi yapılarda estetik ve mekanik özelliklere etkisi. *Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, 1(1), 1-21.
28. İnternet: Kosse Composite (2022). *Kompozit malzemeler*. Web: <http://www.kossecomposite.com/sistemkurma.html>. Son Erişim Tarihi:10.11.2022.
29. İnternet: Mühendis Alemi (2022). Vakum İnfüzyon. Web: <http://www.muhendisalemi.com/vakum-infuzyon-yontemiyle-kompozit-malzeme-uretimi/>. Son Erişim Tarihi: 21.12.2022
30. İnternet: ID Material (2022). *Enjeksiyon kalıplama*. Web: <http://www.idmaterial.com/2015/08/18/injection-molding-enjeksiyon-kaliplama/>. Son Erişim Tarihi:22.12.2022
31. İnternet: Debis (2023). *Kompozit malzemeler*. Web: <https://debis.deu.edu.tr/userweb/mehmet.aktas/Kompozit%20Malzemeler/Ders%20%203/3.pdf>. Son Erişim Tarihi: 08.03.2023
32. Yünlü. K. (2016) *Bor: Bileşikleri, sentez yöntemleri, özellikleri, uygulamaları*. İstanbul: Değişim Yayınları, 233.
33. İnternet: Eti Maden (2023). *Bor bileşikleri*. Web: <https://www.etimaden.gov.tr/>. Son Erişim Tarihi: 22.01.2023.
34. İnternet: Boren (2023). *Bor*. Web: <https://boren.tenmak.gov.tr/>. Son Erişim Tarihi: 22.01.2023
35. De Baere, I., Van Paepegem, W., Quaresimin, M. and Degrieck, J. (2011). On the tension–tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: Limitations of the ASTM D3039/D3479 standard. *Polymer Testing*, 30(6), 625-632.
36. Suhariadi, I., Shiratani, M. and Itagaki, N. (2018). *Morphology Evolution Of ZnO thin films deposited by nitrogen mediated crystallization method*. In MATEC Web of Conferences (p. 02031). New York: EDP Sciences.
37. İnternet: El Yatırma (2023). Web: https://www.researchgate.net/figure/Hand-lay-up-process-for-fabricating-composite-materials_fig1_305218585. Son Erişim Tarihi:24.02.2023
38. İnternet: Epp Composites (2023). *Sprey yöntem*. Web: <https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html>. Son Erişim Tarihi: 15.04.2023
39. İnternet: Filament Sarım (2023). Web: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-filament-winding-process_fig1_332329420. Son Erişim Tarihi: 17.04.2023
40. İnternet: Vakum İnfüzyon (2023). Web: https://www.researchgate.net/figure/Normal-procedure-for-vacuum-infusion-process-9_fig1_325017393. Son Erişim Tarihi: 17.04.2023

41. Eyi, G. (2019). *Pamuk ve elastan karışımı denim kumaşların borik asit, boraks dekahidrat, nano-SiO₂, triazin ve fosfor bileşimleri varlığında güç tutuşurluk özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 119.
42. Durgun, Z. G. Y. (2010). *Çeşitli kalsiyum boratların sentezi, karakterizasyonu ve alev geciktirici etkinliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 164.



Gazili olmak ayrıcalıktır