T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TiO_2 NANO PARTİKÜL KATKILI CAM, ARAMİD, KARBON HİBRİT EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Hüseyin ALPTEKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Önemi ve Amacı 1
1.2. Tezin Kapsamı 2
1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler 3
1.4. Kompozit Malzemeler 4
1.5 Nanopartikül Katkılı Kompozitler 4
1.5.1. Seramik matrisli nanokompozitler 6
1.5.2 Metal matrisli nanokompozitler 7
1.5.3. Polimer matrisli nanokompozitler 8
1.6. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri 8
1.6.1. El yatırma yöntemi 8
1.6.2. Filament sarma yöntemi 10
1.6.3. Profil çekme yöntemi 10
1.6.4 Çözelti döküm üretim yöntemi 11
1.7. Nanokompozit Kullanım Alanları 12
1.8. Hibrit Kompozitler 13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 15
3. MATERYAL ve YÖNTEM 19
3.1. Materyal 19
3.1.1. Nanopartiküllerin epoksi ile karıştırılması 20
3.1.2. Vakum destekli reçine infüzon yöntemi kullanılarak kompozit plaka üretimi 23
3.2. Numunelerin Kesilmesi 26
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 28
4.1. Deneyler 28
4.1.1. Çekme deneyi 28
4.1.2. Eğilme deneyi 33
4.1.3. Yarı statik delme kesme 38
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 48
5.1. Sonuçlar 48
5.2. Öneriler 50
KAYNAKLAR 51

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TiO_2 NANO PARTİKÜL KATKILI CAM, ARAMİD, KARBON HİBRİT EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Hüseyin ALPTEKİN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ÖZEN
YIL: 2022, Sayfa: 64

Elyaf takviyeli polimer kompozitler çeşitli sanayi uygulamalarında yüksek dayanım istenen yerlerde genel olarak kullanılmaktadırlar. Başlıca kullanım alanları otomotiv, deniz, hava, uzay ve savunma sanayidir. Bu kompozitler geleneksel malzemelere göre daha yüksek dayanım ve daha uzun çalışma şartları sunmaktadırlar. Özellikle cam, aramid ve karbon kullanılarak üretilen kompozit malzemeler geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu elyaflar birbirlerinden farklı karekteristik özellikler göstermektedir. Son yıllarda akademide farklı elyaf kombinasyonları yaparak üretilen hibrit kompozitler her geçen gün daha çok çalışma alanı yaratmıştır. Polimer matrisli hibrit kompozitler bu alanda önemli bir açığı kapatmaktadır. Matris malzemesine nanopartikül ilavesi ile mekanik özelliklerin arttırılması bu çalışmalarda önemli bir yerdedir. Nano partikül ilavesi ile mekanik dayanımların artması bu çalışmaların yapılabilmesi için bir umut kaynağı olmuştur. Bu çalışmada cam, aramid ve karbon elyaf kullanılarak farklı dizilimlere sahip hibrit kompozitler üretilmiştir. Üretilen hibrit kompozitlere TiO_2 nanopartiküller katkı malzemesi olarak ilave edilmiştir. Saf ve nanopartiküllü hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerindeki farklılığın anlaşılabilmesi için farklı dizilimlerde saf ve katkılı hibrit kompozitler ile deneyler yapılmıştır. Çalışmada hibrit kompozit lerin eğilme davranışları, çekme davranışları ve yarı statik penetrasyon özellikleri incelenmiştir. Çalışmada katkılı kompozitlerde ağırlıkça %2 oranında TiO_2 kullanılmıştır. Hibrit kompozitler CAG, AGC ve GCA dizilimlerinde üretilmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri incelendikten sonra elyafların dizilimleri ve nanopartikül ilavesinin mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Dizilimin ve nanopartikül ilavesinin mekanik özelliklere olan olumlu etkisi bu çalışmada tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Hibrit kompozit, TiO_2, Cam, Aramid, Karbon

ABSTRACT

MSc Thesis

MECHANICAL PROPERTIES OF TiO2 NANOPARTICLE ADDED GLASS, ARAMID, CARBON HYBRID EPOXY COMPOSITES

Hüseyin ALPTEKİN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZEN
Year: 2022, Page: 64

Fiber reinforced polymer composites are generally used in various industrial applications where high strength is required. Its main areas of use are automotive, marine, aerospace and defense industries. These composites offer higher strength and longer operating conditions than conventional materials. Composite materials produced using especially glass, aramid and carbon have a wide range of uses. These fibers show different characteristics from each other. In recent years, hybrid composites produced by making different fiber combinations in academia have created more and more work areas with each passing day. Hybrid composites with polymer matrix fill an important gap in this field. Increasing the mechanical properties with the addition of nanoparticles to the matrix material has an important place in these studies. The increase in mechanical strength with the addition of nanoparticles has been a source of hope for these studies. In this study, hybrid composites with different arrays were produced using glass, aramid and carbon fiber. TiO_2 nanoparticles were added as additive material to the hybrid composites produced. In order to understand the difference in the mechanical properties of pure and nanoparticle hybrid composites, experiments were carried out with pure and doped hybrid composites in different sequences. In the study, bending behavior, tensile behavior and quasi-static penetration properties of hybrid composites were investigated. In the study, 2% by weight TiO_2 was used in the doped composites. Hybrid composites were fabricated in CAG, AGC and GCA arrays. After examining the mechanical properties of the produced hybrid composites, the arrangement of the fibers and the effect of nanoparticle addition on the mechanical properties were investigated. The positive effect of array and nanoparticle addition on mechanical properties was determined in this study.

KEY WORDS: Hybrid composite, TiO_2, Glass, Aramid, Carbon

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi adına tez yazımı ve deney süreci boyunca benden bilgi ve birikimlerini esirgemeyen danışman hocam sayın Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e en içten dileklerimle saygı ve teşekkürlerimi sunarm. Tez çalışmam süresince laboratuvar çalışmalarımda beni destekleyen Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Gökhan DEMİRCAN ve Arş. Gör. Abuzer AÇIKGÖZ'e sahip oldukları bilgi ve birikimi bana aktardıkları için teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın yapılabilmesi için gerekli maddi desteği sağlayan HÜBAK birimine teşekkür ederim. Tüm çalışmam boyunca her zaman yanımda olup benden hiçbir desteğini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Nanokompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre gelişmiş özellikleri 6
Şekil 1.2. Amerikadaki Şirketlerin Matris Türlerine Göre Matris Kullanım Oranları 8
Şekil 1.3. El yatırma yöntemi 9
Şekil 1.4. Profil Çekme Yöntemi Cihazı 11
Şekil 1.5. Çözelti döküm üretim yönteminin şeması 11
Şekil 3.1 Nanopartiküllerin ölçülerek epoksi reçine içerisine eklenmesi 20
Şekil 3.2. Nanopartikül katkılı epoksinin manyetik + ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması 22
Şekil 3.3. Vakum gaz alma odasında epoksinin içerisindeki kabarcıkların giderilmesi 23
Şekil 3.4.a. Kalıp ayırıcı filmin vakum bandı ile zemine yerleştirilmesi b. Kalıp ayırıcı filmin nihai hali 24
Şekil 3.5. Üretim şeması a)2 kat cam elyaf, b) aramid elyaf, c) karbon elyaf, d)aramid elyaf, e) soyma kumaşı, f) infüzyon filesi, g) vakum poşeti, h) vakum hattı 24
Şekil 3.6. Epoksi infüze edilmeye hazır VARTM tezgâhı 25
Şekil 3.7. Sulu Testere Kullanılarak Numunelerin Kesim İşlemi 26
Şekil 3.8 Kesilecek Numunelere Ait Teknik Çizimler 27
Şekil 4.1 Çekme Deneyi Test Numunesi 28
Şekil 4.2 Çekme Testi 29
Şekil 4.3. CAG/CAG-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği 31
Şekil 4.4. AGC/AGC-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği 31
Şekil 4.5. GCA/GCA-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği 32
Şekil 4.6. Eğilme deneyi şeması 33
Şekil 4.7. Eğilme deneyi numuneleri 33
Şekil 4.8. 3 Nokta eğilme deneyi 34
Şekil 4.9. CAG/CAG-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği 35
Şekil 4.10. AGC/AGC-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği 36
Şekil 4.11. GCA/GCA-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği 36
Şekil 4.12. Kesilmiş yarı statik delme kesme deney numunesi 38
Şekil 4.13. ASTM D6264/D6264M standardına uygun olarak hazırlanmış yarı statik delme kesme deneyi 39
Şekil 4.14. Yarı statik delme kesme deney şeması 39
Şekil 4.15. Elyaf Dizilim Şeması 40
Şekil 4.16. CAG dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 41
Şekil 4.17. AGC dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 42
Şekil 4.18. GCA dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 42
Şekil 4.19. CAG-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 43
Şekil 4.20. AGC-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 43
Şekil 4.21. GCA-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği 44
Şekil 4.22. meydana gelen mekanik hasarlar 45
Şekil 4.23. Kesit görüntüleri 46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Farklı nanokompozit türleri 5
Çizelge 1.2. Nanokompozit sistemlerde bildirilen özelliklerde önemli değişiklikler için özellik boyutları 5
Çizelge 1.3. Seramik matrisli nanokompozit örnekleri ve özellikleri 7
Çizelge 3.1. Titanyum Dioksit (TiO_2) nanopartikülün teknik özellikleri 19
Çizelge 3.2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri 19
Çizelge 3.3. elyafların teknik özellikleri 20
Çizelge 3.4. Üretilen 6 adet nanokompozit plaka ve kodlama 26
Çizelge 4.1. Yapılan deneylerin standartları 28
Çizelge 4.2. Nanokompozit hibrit kompozit numunelerin çekme deneyindeki maksimum gerilme değerleri 30
Çizelge 4.3. Nanokompozit hibrit kompozit numunelerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme değerleri 35
Çizelge 4.4 PSS sonuçları 41
Çizelge 5.1 Genel sonuçlar 49
Çizelge 5.2 maksimum dayanım gösteren dizilimler 49
Çizelge 5.2 maksimum dayanım gösteren dizilimler 49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AEK	Aramid elyaf kırılması
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum oksit
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
ATH	Alümina trihidrit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
CEK	Karbon elyaf kırılması
CeO_2	Seryum oksit
CNT	Karbon nanotüp
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe_3O_4, Fe_2O_3	Demir oksit
GEK	Cam elyaf kırılması
KNT	Karbon nanotüp
Mg	Magnezyum
MMK	Metal matrisli kompozitler
MMNK	Metal matrisli nanokompozitler
$MoSi_2$	Moliben disilisid
PNC	Polimer nanokompozitler
SiC	Silisyum karbür
SiH_4	Silan
SiO_2	Silisyum dioksit
SMK	Seramik matrisli kompozitler
TiO_2	Titanyum dioksit
VARTM	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi
ZnO	Çinko oksit
ZnO	Çinko oksit
ZnO_2	Çinko peroksit

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Önemi ve Amacı

Teknolojinin gelişmesi ile insanlık daha yüksek performanslı ve kullanım açısından daha işlevsel ve daha nitelikli farklı malzemelerin kullanımına yönelmiştir ve bu malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır.

Yıllardır geleneksel yöntemler ile üretilip kullanılan malzemeler bu bağlamda gelişen teknolojiye göre bazı alanlarda yetersiz kalmaktadır. Geleneksel malzemelere göre daha hafif ve daha mukavemetli polimer matrisli kompozit malzemeler bu anlamda sektördeki açığı kapatmaktadır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin gelişimi bu anlamda sektör için daha olumlu bir gelişmedir. Elyaf katkılı polimer matrisli kompozit malzemelerin sahip oldukları mekanik özelliklerini arttırmak için bu kompozit malzemelere nanopartikül ekleyerek mekanik özelliklerinde bir artış sağlamak mümkündür.

Son yıllarda nanoboyuttaki malzemeler alanında yürütülen çalışmalar bu malzemelerin kullanımının gelişen teknolojiye ayak uyduracağını göstermiştir. Bu konu ile çalışma yapanların bu konuya yönelme amaçları nano malzemelerin fiziksel ve kimyasal olarak olağanüstü özellikler göstermeleridir. Bu tür nano malzemelere farklı fiziksel özellikler ve işlevsellik katan, boyutları nano boyutlara ufaltılmış partiküllere nanopartikül denir.

Bu çalışmada TiO_2 Nanopartikül katkılı cam, aramid, karbon elyaf takviyeli hibrit epoksi kompozit mazlemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca hibrit kompozitte elyafların tür açısından dizilimlerine göre üretilen kompozit malzemelerdeki dayanım değerleri incelenmiştir. Çalışmada matris malzemesi olarak epoksi termoset polimeri, elyaf malzemesi olarak cam elyaf, aramid elyaf ve karbon elyaf, nano partikül olarak da TiO_2 nanopartikül kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı literatürde var olan vakum infüzyon yöntemi ile hibrit nanokompozit üretimi yapmak ve nano partikül kullanılmadan üretilen hibrit kompozitlerin nanopartikül takviyeli kompozit malzemeler karşısında olan avantaj ve dezavantajlarını irdeleyip avantajlı yönlerini ele alarak daha yüksek dayanımlı hibrit epoksi kompozitler üretmektir.

1.2. Tezin Kapsamı

Nanopartiküller "American Society For Testing and Materials (ASTM)" standartlarına göre boyutsal olarak uzunlukları 1-100 nm aralığında değişen parçalar olarak tanımlanmaktadır. Uzunlukları 100-250 nm aralığında olan parçacıklar ise küçük taneli parçacıklar olarak adlandırılmaktadır (Berk ve Akkurt, 2012). Bu boyutlardaki parçacıklar yıllardır çeşitli uygulamalarda ve sanayide kullanılmaktadır. Buna ek olarak bu tür malzemelerin basit sentezleme ve manipüle yetenekleri sayesinde son yıllarda kullanım alanlarında önemli bir artış yaşanmıştır. Nanopartiküller elektronik, biyomedikal, kozmetik, manyetik ve birçok alanda kullanım olarak artmıştır (Mohanraj ve Chen, 2006).

Metal ve metal oksit nanopartiküller bu kapsamda birer örnek olarak gösterilebilir. Bu tür metal veya metal oksit nanopartiküllerin elektriksel ve optiksel etkilere sahip olması son yıllarda araştırmacıların bu konu üzerinde çalışmalarını arttırmıştır. "Önemli nanopartiküllerden bazıları; çinko oksit (ZnO), silisyum dioksit (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_3O_4, Fe_2O_3) gibi oksit metallerdir" (Esen, 2011).

Nanopartiküllere ek olarak kompozit malzemelerin üretiminde karbon, cam, aramid türevi elyaflar kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler yüksek dayanım değerleri hafiflikleri ve diğer mekanik özellikleri sayesinde ön plana geçmektedir. Karbon elyaf hafifliği ve aynı ağırlıktaki çeliğe nazaran daha dayanıklı olması nedeni ile kullanılmaktadır. Aramid elyaf bunlara ek olarak balistik özellikleri nedeni ile ön plana çıkmaktadır. Cam elyaf ise tüm bu özelliklere ek olarak daha düşük maliyetlerde olduğundan kompozit malzeme sektöründe yaygınca kullanılmaktadır. Elyaf tabanlı

kompozit malzemelerin oksitlenme sorunu olmadığından kullanımı bu konuda oldukça önemlidir. Bu özellikleri sayesinde yıllardır araştırmacıların dikkatini çekmiş ve üzerinde çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmıştır.

Kompozit üretiminde elyafları bir arada tutmak için üretim esnasında elyaflara bir matris malzemesi eklenerek sertleşme ve elyafların birbiri içerisinde birbirlerine tutunma değerlerinin arttırılması sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak matris malzemesi elyaflara uygulanan yükü kendine çekerek elyaflar üzerinde oluşan gerilmeleri azaltmaktadır.

Nanopartikül katkılı kompozit mazlemeler daha yüksek mekanik özelliklerin istendiği alanlarda kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerin kullanımının yaygınlaşması bu konuda çok önemlidir. Yapılan literatür taramalarında, daha yüksek mekanik dayanım değerleri sergileyen hibrit kompozitler ve önemli nanopartiküller den biri olan TiO_2 nanopartiküllerin Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi kullanılarak hibrit kompozit üretiminin yapıldığı çalışma sayısının az olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi kullanılarak titanyumdioksit nanopartikül katkılı aramid, cam ve karbon elyaf takviyeli hibrit epoksi kompozitler üretilmiştir. Üretim esnasında nanopartikül katkılı hibrit kompozitlerin, katkısız hibrit kompozitlere göre göstereceği farklı mekanik özelliklerin tespiti amacıyla belli bir oranda ve nano partikül katkılı olmayan saf plakalar üretilmiştir. Ayrıca elyafların dizilimleri değiştirilerek, farklı dizilimlere sahip plakalar üretilmiştir. Bu çalışmada nanopartikül katkılarına göre ve en uygun elyaf dizilim kombinasyonuna göre plakaların mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Üretilen nanokompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler

Yapılan çalışmanın katkısı ve literatüre getireceği yenilikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Literatürde yapılan araştırmalara göre yüksek mekanik dayanım sağlayan hibrit nanokompozitlerde nanopartikül olarak TiO_2 kullanımının az olduğuna rastlanmıştır. Bu nedenle bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- Daha önce denenmiş ancak elyaf sıralamasına göre dizilimleri incelendiğinde örneğine az rastlanan bir çalışma olduğu için elyaf dizilimlerinin nanopartikül katkısı ile yapılan çalışma literatürde önemli bir yere sahip olacaktır.

1.4. Kompozit Malzemeler

Kompozit kelime anlamı olarak birden çok parça kullanılarak oluşturulan bir malzeme olarak tanımlanır. Kompozit malzemeler kısaca makro boyutta aralarında farklı olarak en az iki bileşen olarak bileşenlerin bir yüzey boyunca bir araya gelmesi ile oluşan malzemelerdir. Tarihte kompozit malzemelerin kullanımı yüzyıllar öncesinde evlerin ana bileşenlerinden biri olan duvar örülmesi esnasında kerpiç ve saman karışımından günümüzde teknolojik aletlerin çoğunluğunda kullanılmaktadır. 1930' lu yıllarda Amerika'da cam elyafın bulunması ile teknolojik kompozit malzemelerin kullanımına başlanmıştır (Kaya, 2016). Farklı uygulamalarda herhangi bir malzeme ile tek başına elde edilemeyen daha faydalı yapısal ve daha işlevsel bir sistem elde etmek kompozit malzemeler ile sağlanabilmektedir. Süper malzeme olan kompozitler daha düşük ağırlık, korozyon direnci, yüksek yorulma mukavemeti ve daha birçok avantajları nedeni ile günümüz teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Khayal, 2017).

1.5 Nanopartikül Katkılı Kompozitler

Nanopartikül katkılı kompozitler en az bir boyutunun nanometre aralığında olduğu kompozitleri ifade eder. Nanopartiküller ile güçlendirilmiş parçacıklı kompozitler belki de günlük malzemelerde en yaygın olarak kullanılan kompozitlerdir. Parçacıkları kompozitin elastislik modülünü ve akma mukavemetini arttırmak için eklenir. Parçacık boyutunu nanometre ölçeğine indirgeyerek malzemede yeni

özellikler elde edilebileceği bu tür üretimler ile gösterilmiştir (Thostenson ve ark., 2005). Nano boyuttaki malzemelerin geniş yüzey boyutları sayesinde mikro boyuttan nano boyuta geçerken malzeme özelliklerinde önemli artışlar sağlanmaktadır. Nanopartiküllerin kullanımı elektronik, biyomedikal, kozmetik, manyetik alanlar başta olmak üzere birçok alanda artmıştır. Nanokompozitler, seramik matrisli nanokompozitler, metal matrisli nanokompozitler ve polimer matrisli nanokompozitler olarak üç gruba ayrılır. Çizelge 1.1' de farklı nanokompozit türleri ve Çizelge 1.2' de nanokompozit sistemlerinde bildirilen özelliklerde önemli değişiklikler sağlanabilmesi için gerekli partikül boyutları gösterilmiştir.

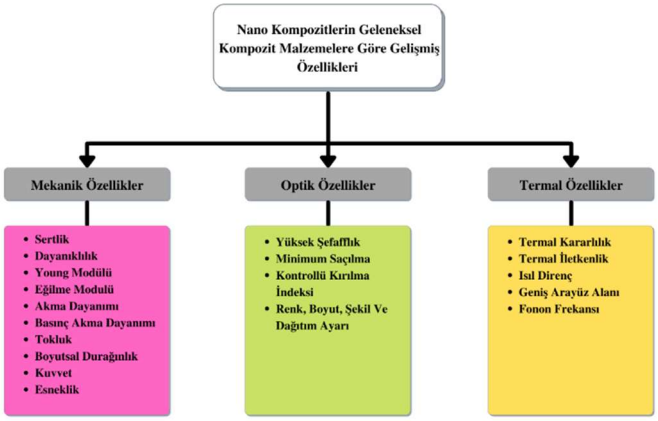
Çizelge 1.1. Farklı nanokompozit türleri (**C**amargo ve ark., 2009)

Sınıf	Örnek
Metal	Fe-Cr/Al_2O_3, Ni/ Al_2O_3 Co/Cr Fe/MgO Al/CNT Mg/CNT
Seramik	Al_2O_3/SiO_2, SiO_2/Ni, Al_2O_3/TiO_2, Al_2O_3/SiC, Al_2O_3/CNT
Polimer	Termoplastik/termoset, polimer/katmanlı silikatlar, polyester/TiO_2, polimer/CNT, polimer/katmanlı çift hidroksitler.

Çizelge 1.2. Nanokompozit sistemlerde bildirilen özelliklerde önemli değişiklikler için özellik boyutları

Özellikler	Değişikliklerin beklenebileceği özellik boyutu (nm)
Katalitik aktivite	<5
Sert manyetik malzemeleri yumuşatmak	<20
Kırılma indisi değişiklikleri üretmek	<50
Süper paramanyetizma ve diğer elektromanyetik fenomenlerin üretilmesi	<100
Güçlendirme ve sertleştirme üretmek	<100
Sertliği ve plastisiteyi değiştirme	<100

Nanokompozitlerin geleneksel kompozit malzemelere göre gelişmiş özelikleri Şekil 1.1' de verilmiştir.



Şekil 1.1 Nanokompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre gelişmiş özellikleri

1.5.1. Seramik matrisli nanokompozitler

Seramik malzemeler genellikle kırılgan malzemelerdir, seramik malzemeler çatlak yayılmasının bir sonucu olarak kolayca kırılmaktadırlar. Matrislere sünek bir metal faz veya başka bir seramik malzemenin dahil edilmesi ile seramikleri mühendislik uygulamalarında kullanmak mümkün hale gelmiştir. Bu malzemelerdeki faz sınırlarındaki farklı fazlar matris ve takviye malzemeleri arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak ortaya çıkan sertlik ve kırılma tokluğu gibi geliştirilmiş mekanik özellikler sağlamaktadır. Bu tür takviye malzemelerinin yüzey alanlarının hacimlerine oranı seramik matrisli nanokompozitlerde (SMNK) yapı ve özellik ilişkilerinin anlaşılmasında önemli katkı sağlamaktadır. SMNK' lerde nanokompozitin mikro muadillerinde ve monolitik matris bileşenine kıyasla kırılma mukavemeti ve tokluk ayrıca yüksek sıcaklık değerlerinde mukavemet ve sürünme direncinde yüksek oranda gelişme gösterdiği görülmüştür. Seramik matrisli nanokompozit örnekleri ve özellikleri Şekil 1.1 de gösterilmiştir (Camargo ve ark., 2009).

Seramik matrisli nanokompozitlerin birçok üretim yöntemi mevcuttur. Bu üretim yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemler toz yöntemi, püskürtme pirilozi, polimer öncü metodu, sol-jel prosesini içeren kimyasal yöntemler ve buhar teknikleridir.

Çizelge 1.3. Seramik matrisli nanokompozit örnekleri ve özellikleri (Camargo ve ark., 2009)

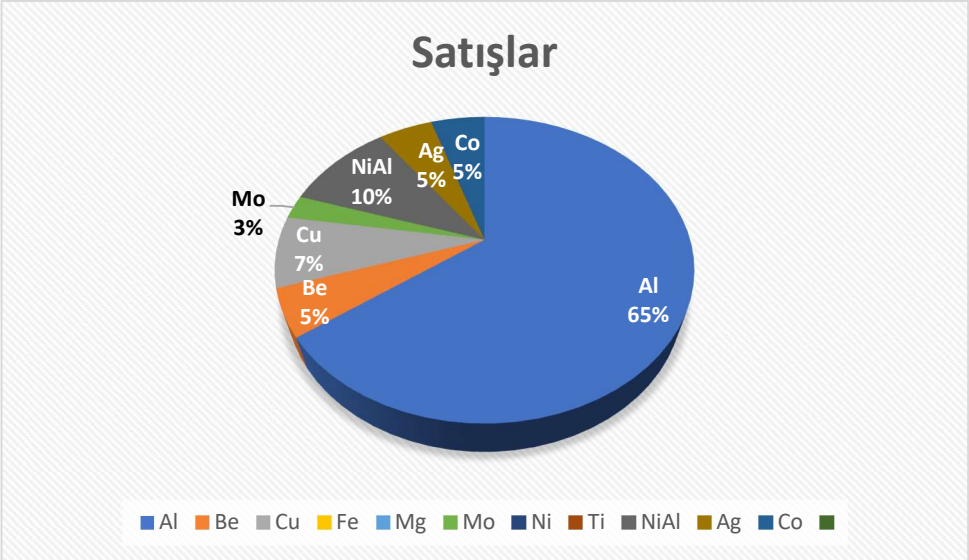
Matris/Takviyeler	Özellikler
Si_3N_4/SiC	Geliştirilmiş güç ve tokluk
$MoSi_2/ZrO_2$	-
B_4C/TiB_2	-
Al_2O_3/SiC	-
MgO/SiC	-
Mullite/SiC	-
Al_2O_3/ZrO	-
Al_2O_3/Mo, Al_2O_3/W	-
$Al_2O_3/NdAlO_3$	Gelişmiş fotolüminesans

1.5.2 Metal matrisli nanokompozitler

Metal matrisli nanokompozitler (MMNK) çok sayıdaki uygulama alanları nedeni ile sanayi ve endüstride çok sayıda kullanılması vaat edilen bir malzemedir. Bu tür nano kompozitler matris ve takviye fazlarından oluşurlar. Bu tür kompozitlerde metal matrisler sünekliğin sağlanması ve yükün malzemeye aktarılmasında önemli rol oynarlar. Metal matrisli kompozit malzemelerde matris Alüminyum (Al), Demir (Fe), Magnezyum (Mg) veya Bakır (Cu) gibi alaşımlardan seçilmektedir. Metal matrisin bu tür nanokompozitlerde kullanım amacı şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek mukavemet ve yüksek yoğunluk oranı sayesinde ağırlık azaltılması.
- Daha yüksek aşınma ve yorulma direnci.
- Yüksek sıcaklık kararlılığı.

Metal matrisli nanokompozitlerde Al en çok kullanılan matris malzemesidir. Aşağıdaki Şekil 1.1.' de Amerika'daki şirketlerin matris türlerine göre matris kullanım oranları gösterilmiştir (Martin, 2019).



Şekil 1.2. Amerikadaki Şirketlerin Matris Türlerine Göre Matris Kullanım Oranları

1.5.3. Polimer matrisli nanokompozitler

Polimer matrisli nanokompozitler (PMNK) şu anda en çok tercih edilen nanomalzemelerin başında gelmektedir. Polimer nanokompozitler konsantrasyon, boyut, şekil yapıları itibari ile atık su arıtımı, doku mühendisliği, elektrokimyasal sensörler, ilaç dağıtımı, gıda işleme, şeffaflık gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. Ayrıca polimer nanokompozitler geniş yüzey alanları, serbest absorbsiyon bölgeleri ve polimer matrisinin iyi arayüzey reaktivitesi ve olağanüstü fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde kullanım açısından oldukça yaygındır (Kumar ve ark., 2018).

1.6. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

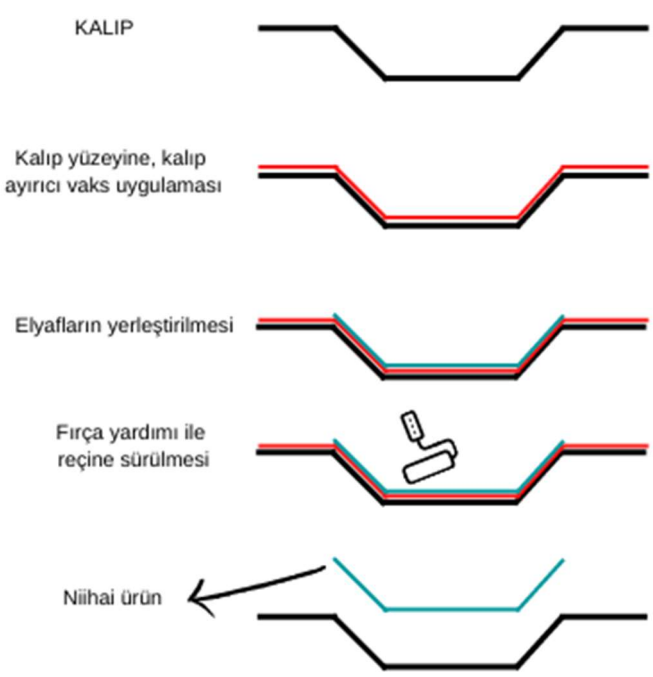
1.6.1. El yatırma yöntemi

El yatırma yöntemi daha az miktarda üretim sayısı olan parçalarda ve deney numunelerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde üretilecek kompozit malzemeye göre oluşturulan düzeneğe veya kalıba kumaş veya kırpık halde bulunan takviye elemanlarının el ile yerleştirilmesi ve ardından rulo fırça yardımı ile matris malzemesi olan reçinenin bu tabakaya nüfus ettirilmesi işlemidir. El yatırma yöntemi ile kompozit malzemeler üretilirken gerçekleştirilen dikkat edilmesi gereken imalat

aşamaları;

- Ortam sıcaklığının 10 C° den düşük olmaması
- Ortam havasının nemden arındırılmış ve kuru olması
- Kalıp yüzeyinde herhangi bir yabancı madde (toz, yağ, vs.) bulunmaması
- Fırça ile sürülen reçinenin tek yönde uygulanması ve 0.25-0.50 mm kalınlıkla sürülmesine dikkat edilmelidir.

Takviye elemanı olarak kullanılacak kumaş veya kırpık halde olan elyaflar ile oluşturulan son ürünün diğer yöntemler ile üretilen parçalardan olan dezavantajları yüzey kalitelerinin iyi olmaması ve elyaf dağılımının bozuk olması nedeni ile son ürün kalitesinin istenen düzeyde olmaması muhtemeldir. Bunlara karşın el yatırma yöntemi mimari kaplama amaçlı, tekne ve araç eklentileri, küvet, lavabo gibi ürünlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Durgun, 2014). Şekil 1.3' te el yatırma yöntemi şeması verilmiştir.



Şekil 1.3. El yatırma yöntemi

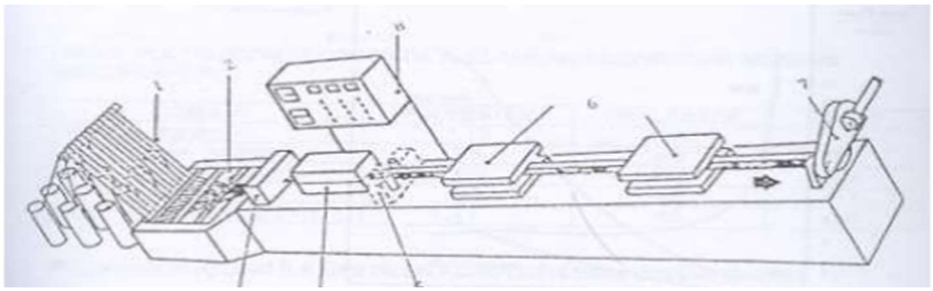
1.6.2. Filament sarma yöntemi

Filament sarma yöntemi elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem dayanıklı ürünlerin üretilmesini mümkün kılar. Bu üretim metodu ile üretilen nihai ürünler daha düşük ağırlık/hacim oranı nedeni ile birçok üretim yöntemine göre daha büyük bir avantaja sahiptir. Simetrik elemanlar ve borular filament sarma yöntemi ile üretilebilmektedir (Toptaş ve Akkuş, 2017). Bu üretim yöntemi basit olarak bir kalıp üzerine sarılmış lifler olarak betimlenebilir. Yöntemde elyaf iplikleri ilk olarak düzenekten geçerek reçine ile ıslatılır. Daha sonra bir makaradan geçerek kalıp üzerine sarım işlemi gerçekleştirilir. Sarım işlemi yapılırken değişik açılarda sarımlar ile farklı mukavemet özelliklerine sahip malzemeler üretilebilir.

1.6.3. Profil çekme yöntemi

Profil çekme yöntemi daha önceden, reçine ile ıslatılmış olan fiber iplik veya dokuma kumaşların ön şekillendirme işlemi sonrasında ısınan bir kalıptan geçirilmesi ile profil üretim metodudur. İşlem malzemenin profil çekilmesi yolu ile üretilmiş olmasından dolayı sürekli bir üretim metodudur. Bu işlemde kullanılmak üzere yaygın olarak termoset reçine ve cam elyaf tercih edilmektedir. Elyaflar kalıba girmeden önce bir reçine banyosundan geçmektedir. Kalıptan çıktıktan sonra sıcak ortama giren elyaf burada basınç altında son şeklini almaktadır. Bu yöntem ile istenen uzunlukta profiller üretilebilmektedir (Ünal ve Gülten, 1998). Şekil 1.4'te profil çekme cihazı

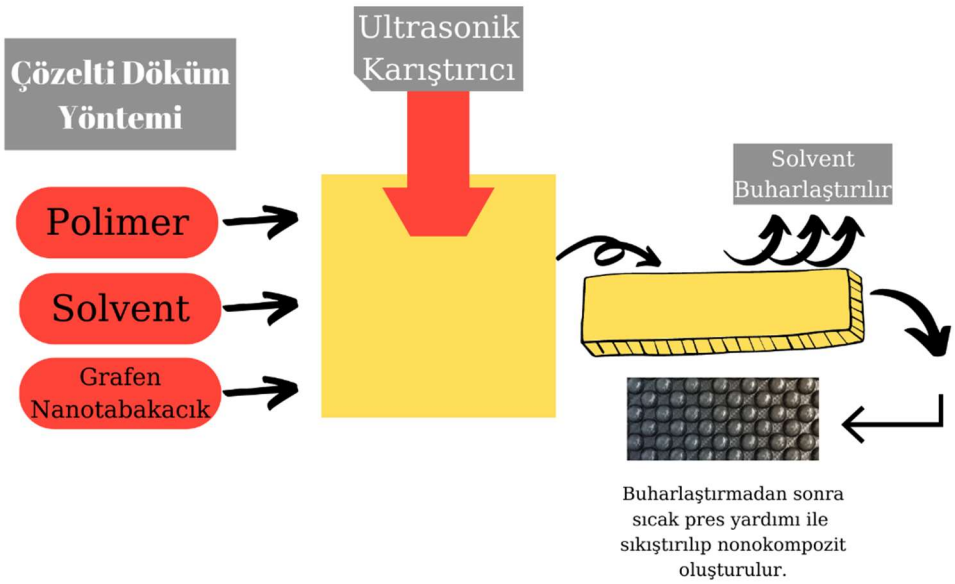
gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Profil Çekme Yöntemi Cihazı (Ünal ve Gülten, 1998)

1.6.4 Çözelti döküm üretim yöntemi

Nanokompozitlerin üretim metodları arasında en az kullanılan metottur. Bu yöntemde polimer, çözücü ve nano takviye edici birleştirildikten sonra ultrasonik karıştırıcı yardımı ile karıştırılır. Karıştırmanın ardından nanopartiküllerin polimer içerisinde kalması şeklinde çözücü buharlaştırılır. Buharlaşma tamamen gerçekleştikten sonra geriye kalan nanopartikül takviyeli polimer sıcak presten geçirildikten sonra kompozit üretilir. Şekil 1.5'te üretim metodu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Çözelti döküm üretim yönteminin şeması

1.7. Nanokompozit Kullanım Alanları

Klasik kompozit malzemeler uzun yıllardır bilinmekte ve yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda kullanımı oldukça yüksek düzeyde artan nanokompozitler günümüzde azalan kaynaklar sebebi ile ve nanokompozitlerin geleneksel malzemelere göre kullanım alanlarının daha fazla olması sebebi ile kullanımları artmıştır. Nano kompozitler elektronik elemanlarda, sağlık sektöründe, uçak ve havacılık sanayisinde, uzay sanayinde ve otomotiv sanayisinde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Aşağıda kullanım yerlerine göre kullanıldığı alanlar belirtilmiştir (Şen ve ark., 2010).

- **Elektronik elemanlarda:** Nanokompozitlerde en çok kullanılan kompozit türlerinden biri olan polimerler yalıtkan bir malzeme olmalarına karşılık bu polimer matrisler içerisine iletken tanecikler ilave edilerek geliştirilen iletken polimerik nanokompozitler şarj deşarj olabilen pil yapımlarında, transistör, kapasitör ve çeşitli sensör yapımlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar.

- **Uçak ve havacılık sanayisinde:** Daha hafif ve daha yüksek mukavemet değerleri istenen uçak gövde kısımlarında, metal yorgunluğunun maksimum olacağı elemanlarda ve askeri uçaklarda radar görünmezliği sağlamak amacı ile kullanılmaktadır.

- **Sağlık sektöründe:** Yapılan çeşitli çalışma ve araştırmalar ile bu tür malzemelerin gen tedavisinde ve DNA, RNA gibi biyomoleküllerin ayrıştırılmasında kullanılmaktadır.

- **Uzay sanayisinde:** Uzay araçlarının yapısal ağırlığını azaltmak amacı ile aynı mukavemet değerlerini daha hafif bir şekilde elde edebilmek için bu sayede aracın taşıyacağı faydalı yük miktarını arttırmak için, daha yüksek yanma dirençleri olduğu için, daha karmaşık yapıların daha kolay bir şekilde üretilebileceği için.

- **Otomotiv sanayisinde**: Yüksek dayanım değerleri ısı ve kimyasal maddelere karşı yüksek dayanım sergiledikleri için ve daha esnek yapıda oldukları için bu sektörde kullanılırlar.

1.8. Hibrit Kompozitler

Kompozitler genel olarak bir matris ve bir takviye fazının makro boyutta bir araya gelerek oluşturdukları malzemeler olarak tarif edilebilir. Burada takviye fazı olarak kullanılan elyaflar kompozit malzemenin karekteristik özelliklerini belirlemektedir. Takviye fazında kullanılan elyafların çeşitli özelliklerinin belirlediği kompozit malzemenin karekteristik özelliği, çeşitli kullanım amaçları için birden farklı şekilde ihtiyaç duyulabilir. Burada ortaya çıkan sonuç kompozit malzemelerde farklı elyaf türlerinin sağlayacağı özellikleri tek bir kompozit malzemede elde edilmesi amacıdır. Hibrit kompozit malzemeler iki veya daha fazla farklı fiberin bir matris malzemesi ile bir araya getirilmesi ile farklı türdeki fiberlerin farklı özelliklerini tek bir kompozit malzedeme toplama kabiliyetine sahiptir. Örneğin aramid elyaf karbon elyafa nazaran daha düşük maliyettli ancak basma mukavemeti açısından oldukça düşük bir elyaf türüdür. Buna nazaran karbon elyaf aramid elyafa göre daha maliyetli ancak daha yüksek değerde basma mukavemeti olan bir elyaf türüdür. Bu iki tür elyafın birlikte kullanıldığı bir hibrit kompozit malzemede maliyet açısından uygun, ancak uygun maliyetine karşın daha yüksek basma mukavemetine sahip bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır (Sayer, 2009).

Hibrit kompozit malzemeler yapısal hafiflikleri ve diğer özellikleri sebebi ile uçakların ve otomotivlerin güç aktarma organları gibi hareketli mil ve yataklarda, daha yüksek özgül sertliğe ve daha yüksek özgül mukavemete sahip oldumalarından uçak ve uzay yapılarının üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılırlar (Oh ve Kim, 1997).

1.8.1. Hibrit kompozit türleri

Literatürde 4 farklı hibridizasyon yöntemi bulunmaktadır. Bunlar sırayla iki veya daha fazla lif türünün aynı kat içerisinde karıştırıldığı kat içi hibritler, laminatın her katının tek bir çeşit fiber içerdiği katlar arası melezler, tek lif tipi bir çekirdeğin başka bir lif tipi iki tabakanın arasına sıkıştırıldığı sandviç hibritler, sonuncu olarak farklı elyaf tiplerine ek olarak bunlar içinde farklı matris malzemesi kullanılan süper hibritlerdir (Sebaey ve Wagih., 2019)

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sayer (2009), 8 tabakalı ve iki farklı tür takviye elemanı içeren Karbon elyaf/ Cam elyaf-Epoksi, Aramid elyaf/Cam elyaf- eposki ve Aramid elyaf/Karbon elyaf-Epoksi hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin darbe altındaki etkilerini incelemiştir. Burada elyaf türlerinin farklı özelliklerinin hibrit kompozitlerde bir araya gelmesi ile malzemede dayanım arttığını tespit etmiştir.

Arasan (2014), sadece karbon, sadece cam ve cam/karbon hibrit kompozit plakalar üretmiş ve bu plakalardan alınan numunelerin kırılma tokluklarını incelemiştir. Hibrit plakalarda malzemenin özellikleri hakkında bilgi vermiştir.

İmak (2018) oryantasyon açıları birbirlerinden farklı olan cam ve karbon elyafları epoksi yardımı ile üreterek numuneleri çekme ve yorulma testine tabi tutmuştur. Yaptığı analizler sonucunda tabakalı hibrit kompoztilerin mekanik özelliklerinin malzemelerin oryantasyon açılarına göre değiştiğini gözlemlemiştir.

Naresh ve ark. (2018), 610 gsm yoğunluğunda cam elyaf ve 450 gsm yoğunluğunda karbon dokuma elyaf ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanarak 0°/90˚ oryantasyolarında karbon cam ve hibrit kompozit malzemeler üretmiş ve bu malzemeleri çekme testi ve yarı statik delme kesme analizlerini yapmıştır. Yapılan testlere göre hibrit olarak üretilen kompozitin nispeten daha düşük değer gösteren saf cam kompozite göre yüksek, karbonfiber kullanılarak üretilen kompozitten düşük bir miktarda dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç maliyet olarak daha karbon elyaf katkılı kompozitlere nispeten daha düşük maliyetli hibrit kompozitlerin üretilmesinin maliyeti düşüreceği gözlemlenmiştir.

Karthik ve ark. (2021), cam, aramid ve bazalt elyaflar kullanarak hibrit kompozit plakalar üretmiş ve bu kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitleri 4 farklı dizilim ile g/k/g/k/g – k/g/k/g/k – c/k/c/k/c – k/c/k/c/k üretmişlerdir. Yaptıkları çekme testi sonuçlarında 3 katman karbon ve 2 katman

aramid takviyeli hibrit kompozitlerin 385 MPa gerilme, k/g/k/g/k diziliminde 361 MPa gerilme tespit edilmiştir. En düşük gerilme değeri g/k/g/k/g diziliminde 234 Mpa olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda dizilimin mekanik özelliklere etki ettiği tespit edilmiştir.

Cheon ve ark. (2020), karbon, cam ve aramid kullanarak fiber takviyeli polimer kompozitler üretti. Her bir fiber takviyenin zayıf özelliklerini ortadan kaldırmak için bu kompozitler hibrit olarak üretildi. Yapılan deneyler sonucunda özellikleri zayıf olan fiberlerin hibrit olarak üretilmesi ile hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinde artış tespit edildi.

Yao ve ark. (2007), aramid ve cam elyaf kullanarak farklı konfigürasyonlarda hibrit kompozitler üretmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerin etkisi aramid elyafın, cam elyaftan daha yüksek gerilme modülüne sahip olması ile birlikte, kompozit yüklendiğinde, aramid elyafların cam elyaflardan daha yüksek stres taşımaktadır. Buda cam elyafın daha önce kırılacağının kanıtıdır. Aramid fiberin hacim oranı düşük olduğunda, aramid fiberler başarısız olduğunda, kalan cam fiberler uygulanan yükü paylaşmaktadır ve böylece kompozit daha da yüksek yük seviyelerine dayanabilmektedir. Buda hibrit kompozitlerin içerdiği elyafların birbirlerinin eksik yönlerini tamamlamaları ve mekanik özelliklerine olumlu bir etki yarattıklarının kanıtıdır. Bu çalışmada hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Çetin ve ark. (2022), karbon ve aramid elyaf kullanarak halloysit nanotüp takviyeli hibrit kompozitler üretmiş ve çalışmada üretilen kompozitin mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda hibrit kompozitlere cnt eklenmesi sürtünme katsayısını ortalama olarak %10 azaltmıştır. Aynı yükte aşınma oranıda %75 oranında azalmıştır.

Meszaros ve ark. (2013), enjeksiyon kalıplama tekniği kullanara bazalt elyaf ve montmorrillonit katkılı hibrit nano kompozitler üretmişlerdir. Hibrit nano kompozitler, nano partikül katkısı ile birlikte yüksek çekme ve eğilme özellikleri göstermişlerdir.

Rangaswamy ve ark. (2021), cam ve aramid fiber elyaflar kullanarak karbon nanotüp katkılı hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada tek tür hibrit kompozite %0.3, %0.6 ve %0.9 ağırlık oranında karbon nanotüp ilave edilmiştir. Basınçlı kalıplama tekniği kullanılarak üretilen kompozitlerin çekme ve eğilme testleri yapılmış bu testler sonucunda %0.6 oranında karbon nanotüp ilaveli kompozit plakanın dayanım değerlerinin diğer plakalara göre arttığı tespit edilmiştir.

Sapiai ve ark. (2015), epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında karbon nanotüp ilave ederek kenaf/cam elyaf katkılı hibrit kompozitler üretmiştir. Üretim yöntemi olarak filament sarma ve el yatırma tekniği kullanılmıştır. Numunelere çekme ve eğilme testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre karbon nanotüp ilavesi ile eğilme mukavemetinin azaldığı, artan karbon nanotüp miktarı ile eğilme modülünün arttığı tespit edilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre %0.5 ve %0.75 karbon nanotüp ilavesi ile dayanımın azaldığı ancak %1 oranındaki katkı ile çekme mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Bulut ve Erkliğ. (2018), aramid, karbon ve cam elyaf fiberler kullanarak hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin yarı statik delme kesme analizlerini yapmıştır. Yapılan testler sonucunda hibrit kompozitlerin başarısızlık mekanizmalarının ana unsurunun lif türlerinin yanı sıra liflerin istiflenme biçimleri ile alakalı olduğu tespit edilmiştir.

Dong (2020), karbon ve cam kullanarak ürettikleri hibrit kompozitlerde karbon ve cam elyafların dizilimlerine göre gösterdikleri dayanımsal farklılıkları incelediler. Yarı karbon ve yarı cam / epoksi içeren hibrit kompozitlerde eğilme dayanımının en yüksek değerde seyrettiği gözlemlenmiştir.

Erkendirci ve Avcı (2019), karbon nanotüp kullanarak, karbon ve cam elyaf takviyeli hibrit nano kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin yarı statik delme kesme testlerini yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda kompozitin penetrasyon direnci, ve

farklı katmanlardaki penetrasyon kuvvetlerini incelemişlerdir. Çalışmada CNT ve benzeri tozların kullanımının bu kompozit plakalara olan etkisi araştırılmıştır.

Sadeghi ve Hossein (2017), 12 kat düz dokuma cam elyaf kullanarak CNT katkılı el yatırma metodu ile kompozit plakalar üretmişlerdir. Üretikleri plakalara ağırlıkça %0, 0.5, ve %1 oranlarında CNT ilave etmişlerdir. Daha sonra bu kompozitlerin çekme ve yarı statik delme kesme özelliklerini incelemiştilerdir. Deney sonucunda saf numuneye nazaran CNT ilavesinin gerinim enerjisini %22 oranında %0.5 katkı ile elde ettiğini tespit etmişlerdir. Çekme testinde herhangi bir farklı sonuç elde edilmemesine karşılık, yarı statik delme kesme testinde ise CNT ilavesinin ogival ve konik girintilerde temas kuvvetini ve emilen enerjiyi azalttığını tespit etmişlerdir. CNT parçacıklarının varlığında temas kuvvetlerinde ve emilen enerjide maksimum azalma sırasıyla %23 ve % 26 oranlarında konik uç girintisinde meydana gelmiştir.

Demircan ve ark. (2021), Al_2O_3 ve B_4C nanoparçacıklar kullanarak cam elyaf takviyeli polimer kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin yarı statik penetrasyon testlerini incelemişlerdir. Kompozite ağırlıkça %1 oranında Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesi kompozitin zımba kesme mukavemetini %8.97 oranında arttırmıştır. Kompozite B_4C eklenmesi sertliği arttırmıştır. Buna karşılık olarak iki nanoparçacık ta emilen enerji miktarında herhangi bir değişikliliğe sebep olmadığı belirtilmiştir.

Tehrani ve ark. (2012), karbon fiber takviyeli kompozitin epoksi matrisine CNT ilavesi ile kompozitin mekanik özellikleri incelenmiştir. CNT ilavesi kompozitin enerji emme yeteneğini %17 oranında arttırmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Kompozit ve nanokompozit plaka üretimi için Titantum dioksit (TiO_2) nanopartiküller kullanılmıştır. Teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Titanyum Dioksit (TiO_2) nanopartikülün teknik özellikleri

TiO_2 Nanopartikülün Teknik Özellikleri	
Saflık	%99.5+
Renk	Beyaz
Ortalama Partikül Boyutu	38 nm
Özgül Yüzey Alanı	35 m^2/g
Morfoloji	Neredeyse küresel yapıda
Kitle Yoğunluğu	0.40 g/cm^3

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar kompozit üretilirken nano partiküllerin kullanımının dayanım ve mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir (Bağatır, 2018). Bu çalışmada matris malzemesi olarak Çizelge 3.2.'de teknik özellikleri gösterilen MGS L 285 laminasyon reçinesi ile H287 sertleştiricisi kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri

MGS L 285 Laminasyon Reçinesi		**H287 sertleştiricisi**	
Yoğunluk	1.18-1.23 g/cm^3	Yoğunluk	0.93-0.96 gr/ cm^3
Vizkosite	600-900 mPas	Vizkosite	80-120 mPas
Epoksi eşdeğeri	155-170 gr/eşdeğer	Amin Değeri	450-500 mgr KOH/gr
Epoksi değeri	0.59-0.65 eşdeğer/100gr	Refraktör indeksi	1.4950-1.4990
Refraktör indeksi	1.525-1.530		

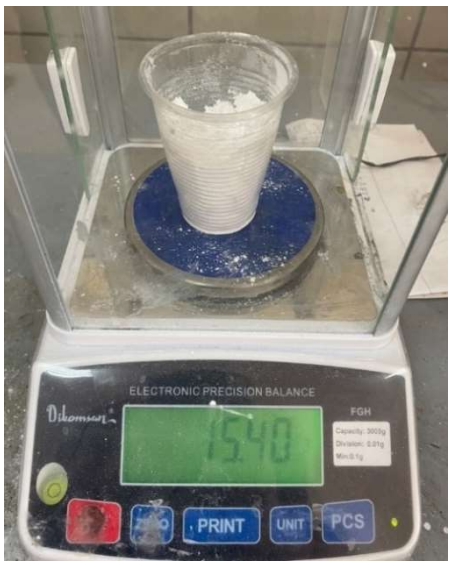
Hibrit kompozit plaka üretimi için takviye elemanı olarak aramid, cam ve karbon elyaflar kullanılmıştır. Teknik özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Elyafların teknik özellikleri

	Aramid Elyaf	Cam Elyaf	Karbon Elyaf
Örgü Tipi	Twill	Twill	Twill
Lif	Kevlar 49	EC9 Cam	Karbon T700
Alan Ağırlığı	326 ± 4% g/m^2	300 ± %2 g/m^2	300 ± %2 g/m^2
Kalınlık	400 ± 15% µm	0.35 mm	0.48 mm

3.1.1. Nanopartiküllerin epoksi ile karıştırılması

Bu aşamada nanopartiküller epoksi reçine ile bütünleştirilerek homojen bir karışım elde edilmiştir. İlk olarak standartlara uygun yeterli sayıda test numunesi üretebilmek için kompozit plaka ebatları (500 x 610 mm) olarak tespit edilmiştir. Belirlenen boyutlarda hibrit kompozit plaka üretmek için her plakaya 4 kat aramid, 4 kat cam ve 4 kat karbon elyafın ağırlığı tartılarak ne kadar reçine infüze tespit edilmiştir. Bu oran 4 kat aramid, 4 kat cam ve 4 kat karbon elyaf için 770 gram toplam epoksi reçinesi ve sertleştirici karışımı olarak (550 gram epoksi + 220 gram sertleştirici) tespit edilmiştir. Sertleştiricisi daha sonra eklenmek üzere 500 gram epoksiye ağırlıkça % 2 oranında (15.4 gr) TiO_2 Şekil 3.1' de gösterildiği gibi eklenmiştir.



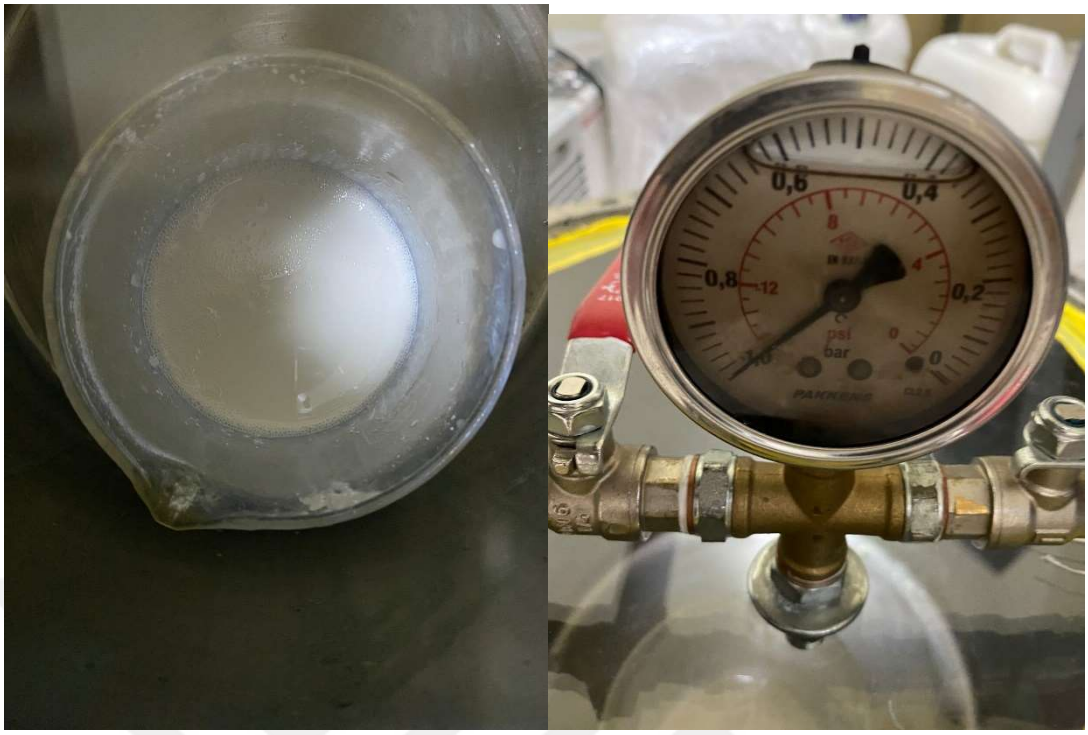
Şekil 3.1 Nanopartiküllerin ölçülerek epoksi reçine içerisine eklenmesi

Bu karışım karıştırılmak üzere Şekil 3.2.'de gösterilen manyetik ve ultrasonik karıştırıcıya aktarılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı yüksek frekansta sonik dalgalarla karışım yaptığı için karışım ısınmaktadır. Isınan karışım reçinenin kimyasal özelliklerini etkileyeceğinden dolayı bu olumsuz durumla karşılaşmamak amacıyla karışım buz banyosuna alınıp sabit sıcaklıkta karıştırılmıştır. Demircan, (2018) yaptığı çalışmada optimum karışım şartlarının 300 dev/dk ve ultrasonik karıştırıcı %60 genlikte 2 sn açık 3 sn kapalı şekilde olduğunu gözlemlemiştir. Bu çalışmada da manyetik karıştırıcı 300 dev/dk ve ultrasonik karıştırıcı %60 genlikte 2 sn açık 3 sn kapalı modda sıcaklık kontrolü yapılarak 2 saat boyunca homojen duruma gelene kadar karıştırılmıştır.



Şekil 3.2. Nanopartikül katkılı epoksinin manyetik + ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması

Ultrasonik ve manyetik karıştırıcıdan alınan karışım, içerisindeki karıştırma esnasında oluşan hava kabarcıklarından arındırılmak için vakum gaz alma odasına koyulmuştur. Burada yaklaşık 20 dakika boyunca her 2 dakikada bir kapatıp açılacak şekilde bekletilmiş ve içindeki hava kabarcıkları alınmıştır. Şekil 3.3.'te gösterildiği gibi hava kabarcıklarından arındırılan karışımın içerisine sertleştirici eklenmiş ve vakum destekli reçine infüzyon yöntemi için kullanılmak üzere uygun hale getirilip kompozit plaka üretiminde kullanılmak üzere hazır hale gelmiştir.

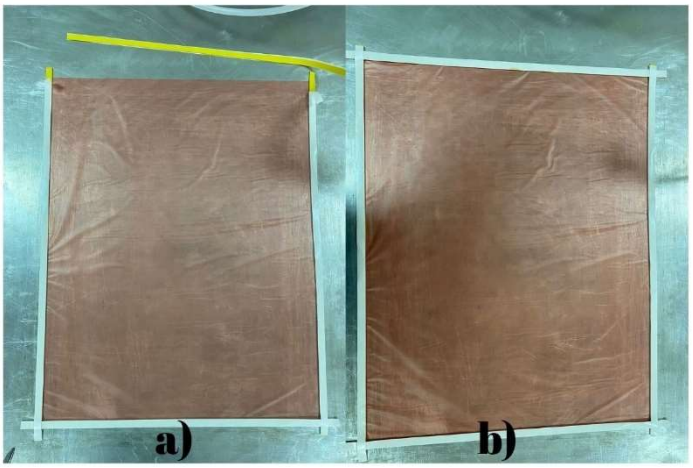


Şekil 3.3. Vakum gaz alma odasında epoksinin içerisindeki kabarcıkların giderilmesi

3.1.2. Vakum destekli reçine infüzon yöntemi kullanılarak kompozit plaka üretimi

Nanopartikül katkılı epoksi reçine hazırlandıktan sonra vakum destekli reçine infüzyon (VARTM) tezgahına alınarak uygun ölçülerde nanokompozit hibrit plakalar üretilmiştir. VARTM yöntemi ile hibrit kompozit plaka üretim metodu aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

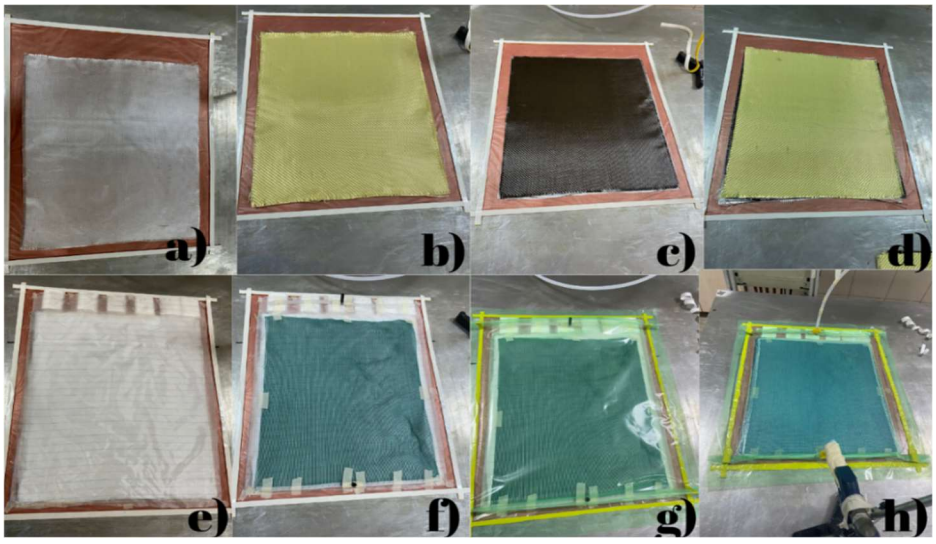
.



Şekil 3.4.a. Kalıp ayırıcı filmin vakum bandı ile zemine yerleştirilmesi b. Kalıp ayırıcı filmin son hali

En dip kısımda epoksi reçine karışımının zemine yapışmasını engellemek için kalıp ayırıcı film yerleştirilerek kenarları Şekil 3.4.a.'daki gibi vakum sızdırmazlık bandı ile zemine yapıştırılmıştır. Yapışan kalıp ayırıcı film Şekil 3.4.b' deki gibi son halini almıştır.

Üretilecek hibrit kompozit plaka için kumaşlar Şekil 3.5' deki gibi dizilimlerine uygun olarak yerleştirilmişlerdir.



Şekil 3.5. Üretim şeması a)2 kat cam elyaf, b) aramid elyaf, c) karbon elyaf, d)aramid elyaf, e) soyma kumaşı, f) infüzyon filesi, g) vakum poşeti, h) vakum hattı

Şekil 3.5. a 'da ilk önce 2 kat cam elyaf Şekil 3.5. b 'de 2 kat aramid elyaf Şekil 3.5. c 'de 4 kat karbon elyaf ardından Şekil 3.5. d ve Şekil 3.5 e'de görüldüğü gibi

ayna görüntüsü olacak Şekilde aramid ve cam elyaflar yerleştirilmiştir. Ardından Şekil 3.5. f'de kompozit plakanın diğer elemanlardan ayrılabilmesi için sıyırma kumaşı konulmuştur. Sıyırma kumaşının ardından reçinenin elyaf yüzeyine olan infüzyonunun daha düzgün ve sürekli olabilmesi adına infüzyon filesi ve diğer ara bağlantılar hazırlanmıştır. Sonrasında düzenek Şekil 3.5. g' de görüldüğü gibi vakum poeşityle kapatılmış ve Şekil 3.5. h 'de görüldüğü gibi son nihai halini almıştır.



Şekil 3.6. Epoksi infüze edilmeye hazır VARTM tezgâhı

Ardından Şekil 3.6.' de görüldüğü gibi tezgâh 80° C sıcaklığa ısıtılmış ve vakumlanmıştır. Vakumlanan tezgâh 15 dakika bekletildikten sonra reçine sisteme vakum yardımı ile transfer edilmiştir. Reçine transferinin ardından sistem kitlenmiş ve tam vakum altında 15 saat boyunca 80° C sabit sıcaklıkta kürlenmeye bırakılmıştır.

Üretilen kompozit plakalar, elyaf dizilimleri, kodlamaları ve nanopartikül oranları Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Üretilen 6 adet nanokompozit plaka ve kodlama

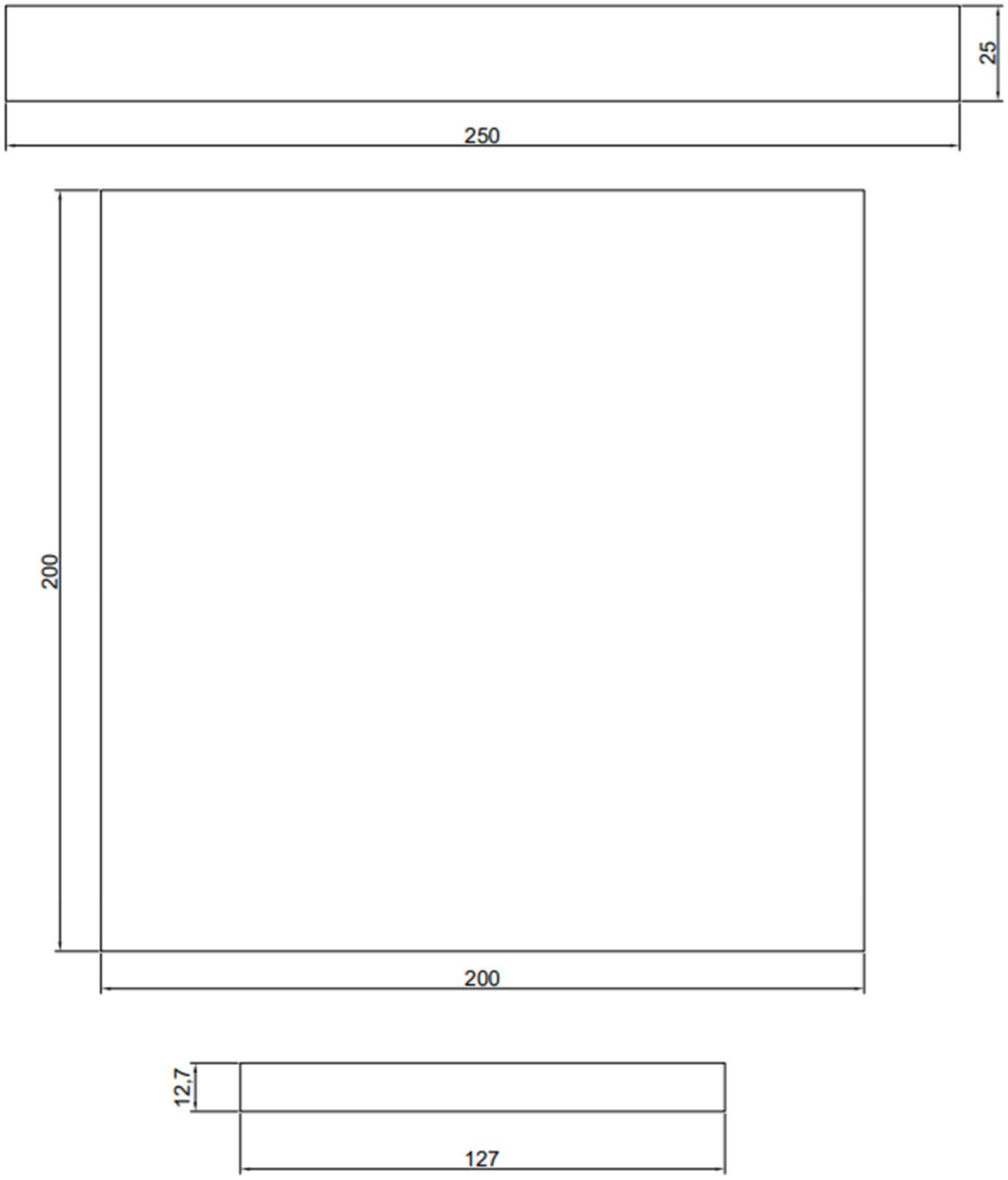
	Takviye Malzemesi	Matris Malzemesi	Kodlama
Nanokompozit Plaka 1	CC/AA/GG/GG/AA/CC	Epoksi Reçinesi	CAG
Nanokompozit Plaka 2	AA/GG/CC/CC/GG/AA	Epoksi Reçinesi	AGC
Nanokompozit Plaka 3	GG/CC/AA/AA/CC/GG	Epoksi Reçinesi	GCA
Nanokompozit Plaka 4	CC/AA/GG/GG/AA/CC	Epoksi Reçinesi + %2 TiO_2	CAG-N
Nanokompozit Plaka 5	AA/GG/CC/CC/GG/AA	Epoksi Reçinesi + %2 TiO_2	AGC-N
Nanokompozit Plaka 6	GG/CC/AA/AA/CC/GG	Epoksi Reçinesi + %2 TiO_2	GCA-N

3.2. Numunelerin Kesilmesi

Deney numuneleri ASTM standartlarına uygun olarak Şekil 3.7' de gösterildiği gibi sulu testere yardımı ile kesilmiştir. Kesim işlemi yapılırken yüzeyin daha düzgün kesilmesi ve kesim esnasında ortaya çıkan ısının dezavantaj oluşturmaması adına sulu kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8' de kesilecek numunelere ait teknik çizimler verilmiştir.



Şekil 3.7. Sulu Testere Kullanılarak Numunelerin Kesim İşlemi



Şekil 3.8 Kesilecek Numunelere Ait Teknik Çizimler

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Deneyler

Kompozit plakalar farklı dizilimlere sahip olarak hibrit bir şekilde üretilmiş ve ASTM standartlarında çekme, 3 nokta eğme ve yarı statik delme kesme testleri yapılmıştır.

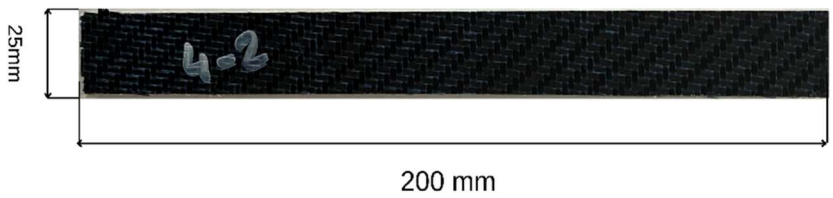
Deneylerin yapabilmesi için plakalar Çizelge 4.1.'de gösterilen ASTM standartlara uygun olarak kesilmiştir.

Çizelge 4.1. Yapılan deneylerin standartları

Deney Adı	Deney Standartları	Numune Boyutları (mm)	Açıklık Mesafesi (mm)	Deney Hızı (mm/dk)
Çekme Deneyi	ASTM D3039	250 x 25 x 3.2	----------	2
Üç Nokta Eğme Deneyi	ASTM D790	127 x 12.7 x 3.2	60	1
Yarı statik delme kesme Deneyi	ASTM D6264/D6264M	200 x 200 x 3.2	----------	2.54

4.1.1. Çekme deneyi

Çekme deneyi test numuneleri ASTM D3039 standardına uygun olarak Şekil 4.1.'deki gibi hazırlanmış ve Şekil 4.2.'deki gibi test cihazına bağlanarak deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Çekme Deneyi Test Numunesi



Şekil 4.2 Çekme Testi

Çekme deneyi malzemelerin mekanik özelliklerinin tespitinde kullanılan çok önemli bir deneydir. Malzemelerin çekme deneyi ile belirli özellikleri tayin edilebilmektedir. Bu özellikler aşağıda verilmiştir.

- Mühendislik uygulamalarında malzeme seçiminde.
- Bir uygulamada malzemenin yeterli dayanım şartlarını sağladığı konusunda kalite kontrolünde.
- Farklı türlerde malzemelerin geliştirilmesinde.
- Farklı tür malzemelerin kıyaslanmasında ve servis şartlarında malzemenin davranışı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yapılabilmektedir.

Çekme deneyi yalın olarak malzemelerin statik bir yük etkisi altında mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan bir deneydir. Deney test edilen malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan tahribatlı bir muayene çeşididir. Deney parçası basit olarak karşıt uçlarının bir test cihazına karşılıklı olarak bağlanması ve parça kırılıncaya kadar bir gerilme altında test edilmesi işlemidir. Test makine tarafından bir çekme kuvveti uygulanarak yapılır, bu kuvvet neticesinde test

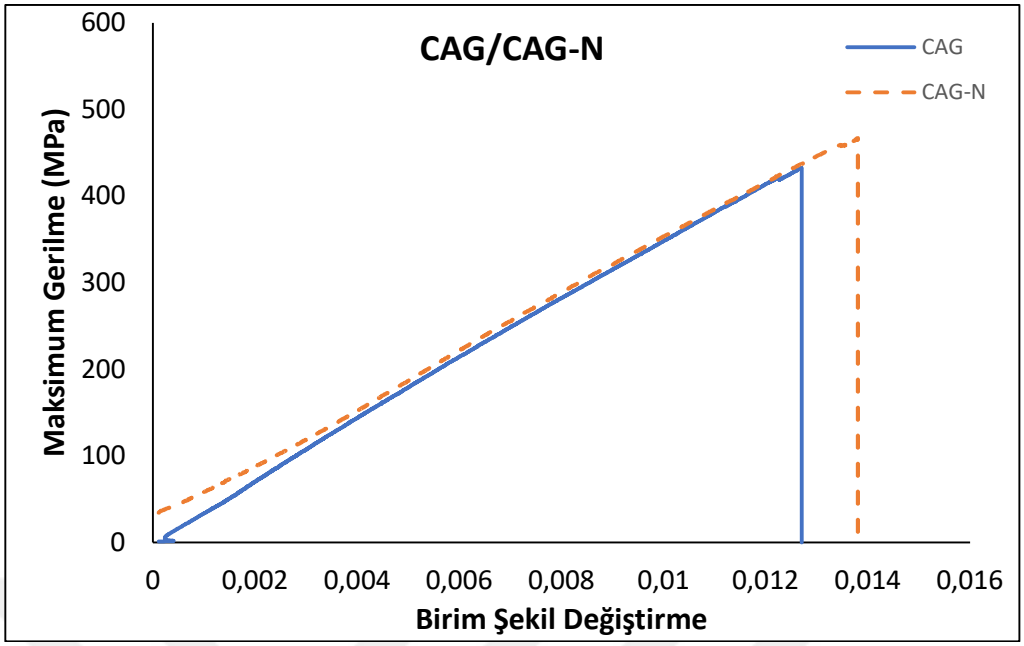
numunesinin kademeli olarak boyunun uzaması ve sonuç olarak kırılmasına sebebiyet vermektedir. İşlem anında, kuvvet ve uzama verileri derlenerek deney numunesinin üzerine uygulanan gerilme kuvveti tesirinde deforme miktarı izlenir. Çekme deneyi, malzemelerin önemli mekanik özelliklerinin tespitini sağlar. Bu mekanik özelliklerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Elastisite modülü (young modülü) ve poisson oranı
- Akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti
- Süneklik ve tokluk miktarları

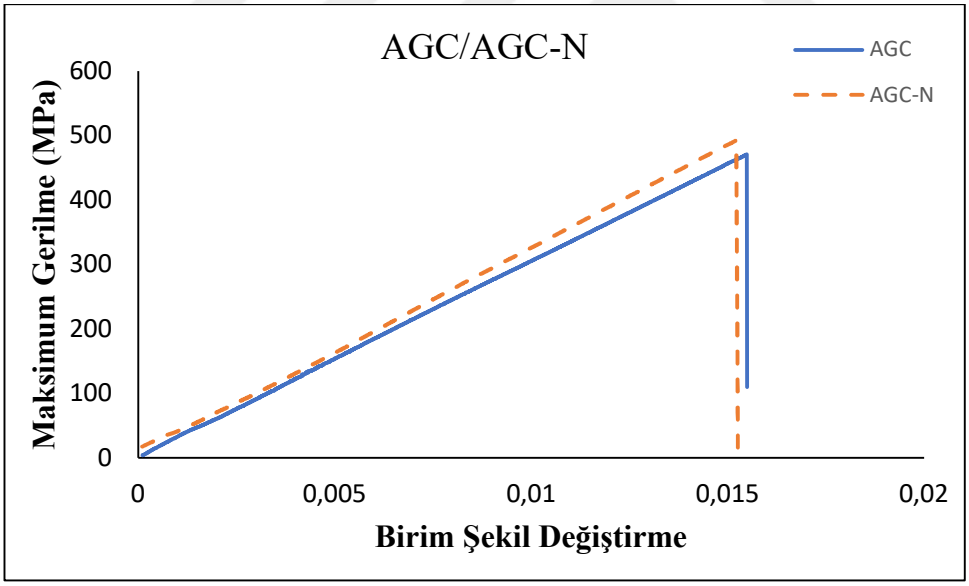
Çekme deneyi sonucunda numunelerin maksimum gerilme değerleri elde edilmiştir. Farklı dizilimlere sahip hibrit kompozit plakaların maksimum gerilme değerleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir. Grafiklerin değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Nanokompozit hibrit kompozit numunelerin çekme deneyindeki maksimum gerilme değerleri

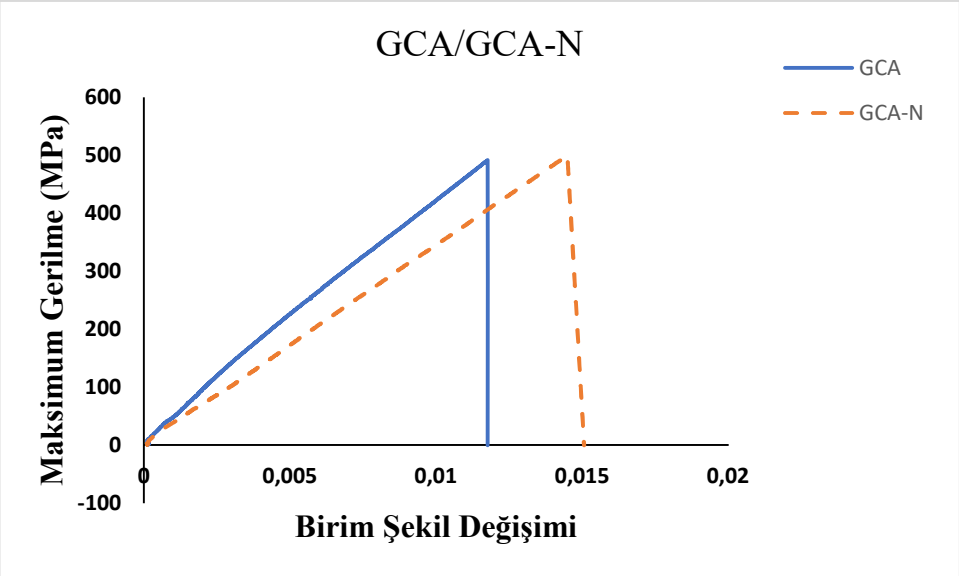
Dizilimler	Maksimum Gerilme Değeri
CAG	453.575 MPa
AGC	473.175 MPa
GCA	474.375 MPa
CAG-N	464.194 MPa
AGC-N	495.056 MPa
GCA-N	489.475 MPa



Şekil 4.3. CAG/CAG-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği



Şekil 4.4. AGC/AGC-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği



Şekil 4.5. GCA/GCA-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği

Grafiklerde düz çizgiler nanopartikül katkılı olmayan hibrit kompozit plakaları, kesikli çizgiler ise ağırlıkça %2 oranında TiO_2 katkılı hibrit kompozit plakaları göstermektedir.

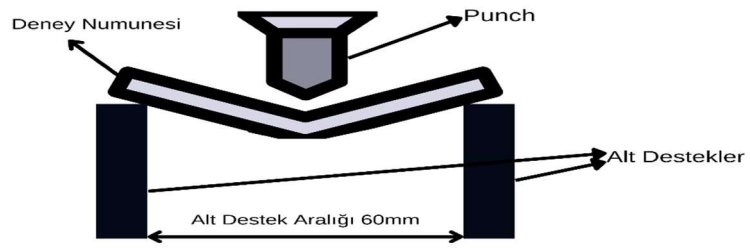
Gerilme değerleri incelendiğinde CAG dizilimine sahip hibrit kompozit 453,575 MPa, AGC dizilimine sahip hibrit kompozit 473.175 MPa, GCA dizilimine sahip hibrit kompozit ise 474.375 MPa değerinde bir gerilme göstermiştir. Hibrit kompozitlere %2 oranında TiO_2 katkısı ise kompozitlerin maksimum gerilme miktarlarında olumlu bir artış göstermiştir. CAG diziliminde bu artış %2.34, AGC diziliminde % 4.62 ve GCA diziliminde ise %3.18 miktarında sağlanmıştır. En yüksek artış miktarının %4.62 ile AGC diziliminde olduğu görünmektedir. Hibrit kompozit plakalara nanopartikül ilavesinin olumlu bir etki yarattığı buradan çıkan sonuçla anlaşılmaktadır. Hibrit kompozitlerde elyaf sıralamasının maksimum gerilme miktarlarında sağlayacağı artış ve azalışlar bu çalışmada incelenmiştir.

Song (2015), yaptığı çalışmada ayna görüntüsü olarak simetrik bir şekilde yaptığı dizilimler ile orta kısımda karbon ve aramid elyaf bulunan hibrit kompozitlerin, orta kısmında cam elyaf bulunan hibrit kompozitlere nazaran daha yüksek bir gerilme gösterdiğini tespit etmiştir. Bizim çalışmamızda ise bu sonuca benzer bir sonuç elde

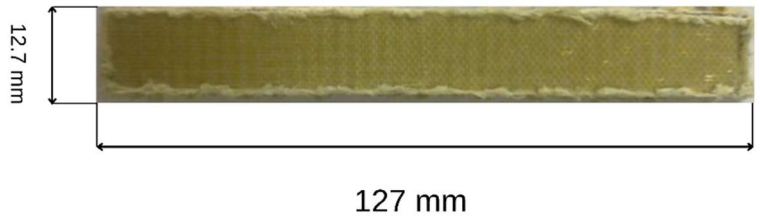
edilmiştir. Orta kısmında aramid ve karbon elyaf bulunan Hibrit kompozitlerin maksimum gerilme değerleri, orta kısmında cam elyaf bulunan hibrit kompoztilere nazaran %4,58 oranında bir artış sağlamıştır. Nanopartikül takviyesinde ise bu dayanım artışı %6,52 oranında olmuştur.

4.1.2. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi türü olarak üç nokta eğilme deneyi seçilmiş ve numuneler ASTM D790 standardına göre Şekil 4.7.'deki gibi üretilerek, Şekil 4.8.'deki gibi eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.6'da deney şeması verilmiştir.



Şekil 4.6. Eğilme deneyi şeması



Şekil 4.7. Eğilme deneyi numuneleri

Eğilme testi genel olarak bir malzemenin eğilme gerilmesini ve şekil değiştirme kabiliyetini belirlemek için yapılır. Eğilme testi, çekme testine göre düşük maliyetlidir ve test sonuçları çekme testine göre farklılık göstermektedir. Malzeme, iki destek noktasının üzerine, desteğe yatay olarak konumlandırılır ve ardından numunenin çökmesi için genellikle bir veya iki temas noktasının malzemeye temas etmesi ile malzeme üzerine bir kuvvet uygulanır. Eğilme deneyinde eğer temas noktası sayısı bir

ise bu deney üç noktalı eğilme deneyi, eğer temas noktası iki ise bu deney dört noktalı eğilme deneyi olarak adlanıdırılır.

Eğilme testi, basma ve çekme testinden farklı olarak malzeme özelliklerini ölçmemektedir. Örnek olarak eğilme kuvvetine maruz kalmış bir malzeme üzerinde aynı esnada basma, çekme ve kesme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu neticede malzemenin eğilme gerilmesi bu üç gerilme etkisi altında bileşke gerilme olarak incelenir. Malzemenin geometrik şeklinden destek aralığı mesafesi ve kuvvet uygunlanma hızında dahil olmak üzere bileşke gerilmeleri bu farklı etkiler altında incelenmektedir.

Eğilme testinin genel kullanım amacı, bir malzemenin eğilme dayanımını ve eğilme modülünün tespitidir. Bir malzemenin eğilme mukavemeti, numunenin çekme veya basma kuvvetleri etkisi altında, en dış yüzeyde bulunan liflerin üzerinde oluşan maksimum gerilme miktarı olarak tanımlanabilmektedir. Eğilme gerilme formülü denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$$\frac{3PL}{2bd^2} \tag{4.1}$$

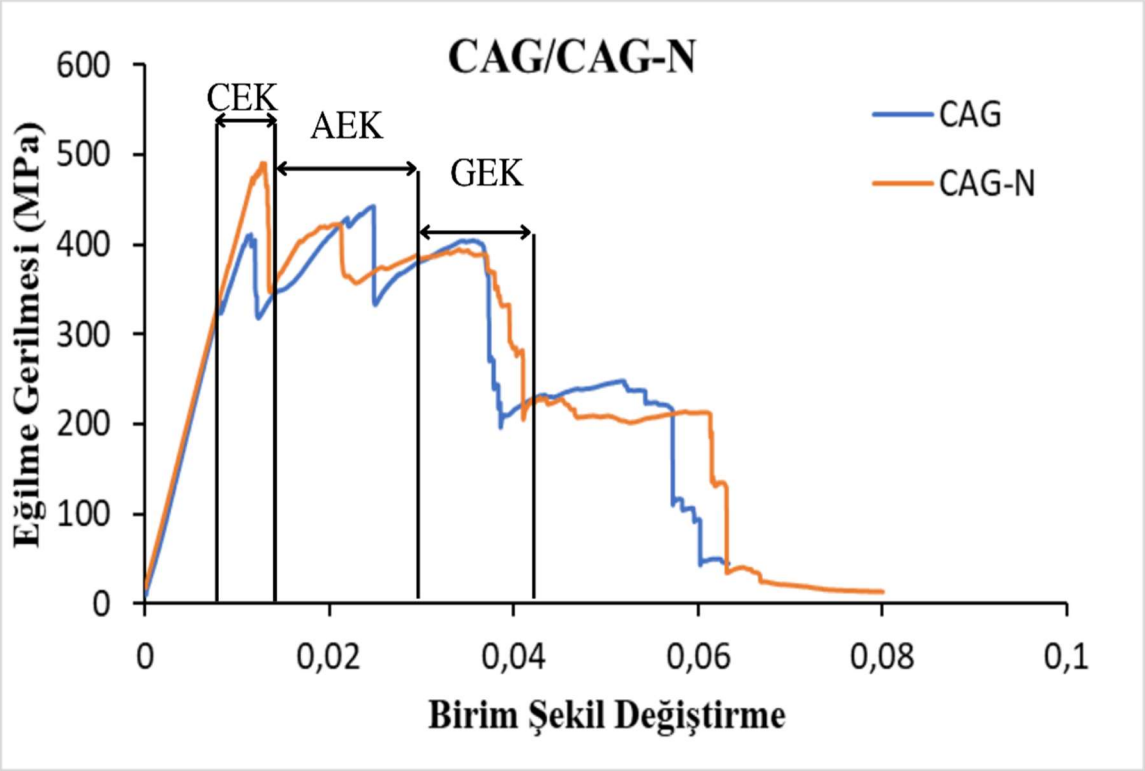


Şekil 4.8. 3 Nokta eğilme deneyi

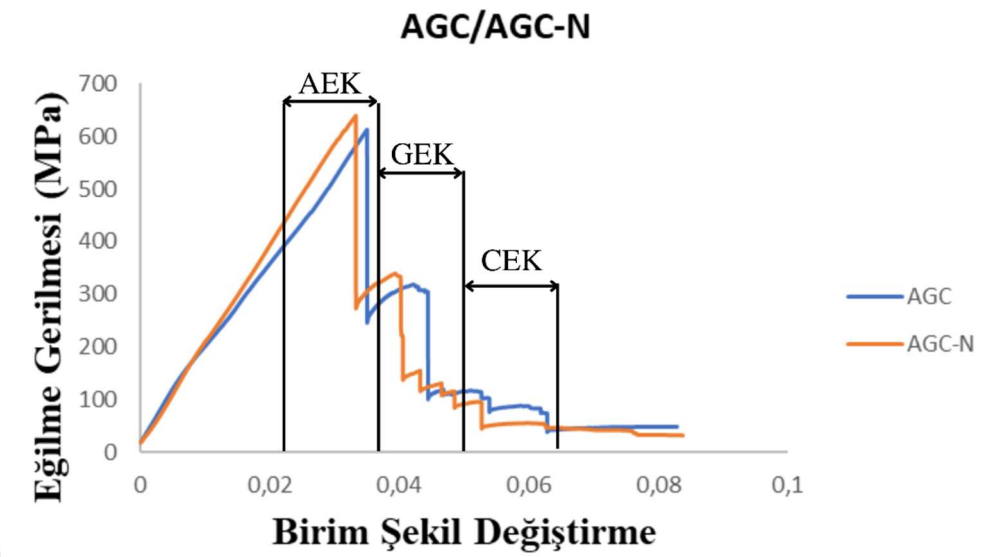
Eğilme deneyi sonucunda maksimum eğilme gerilmesi değerleri tespit edilmiş ve incelenmiştir. Eğilme deneyi sonucunda numunelerin maksimum eğilme gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Farklı dizilimlere sahip hibrit kompozit plakaların maksimum eğilme gerilmesi değerleri Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'te gösterilmiştir. Grafiklerin değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Nanokompozit hibrit kompozit numunelerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme değerleri

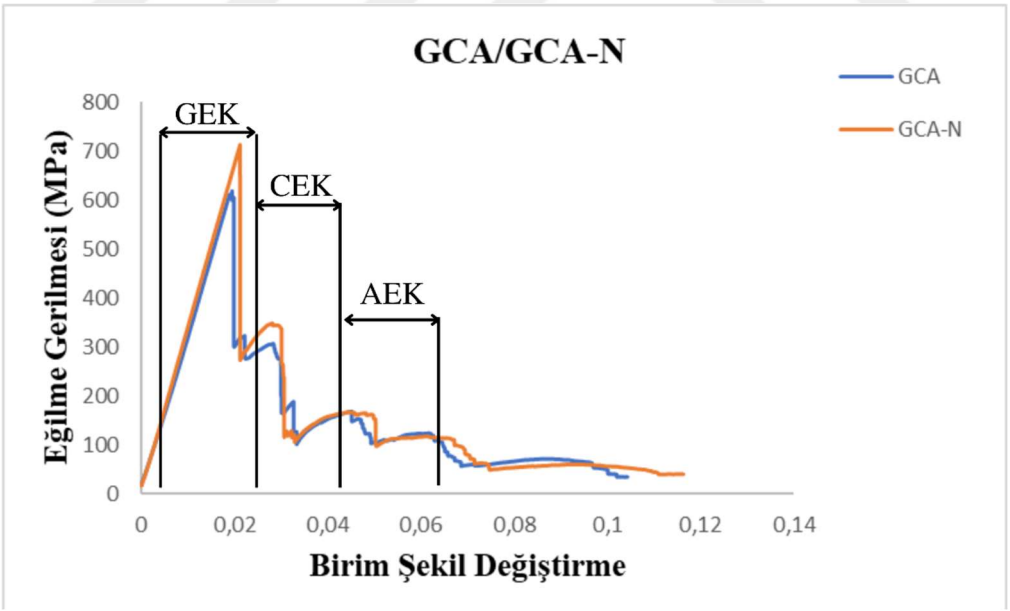
Dizilimler	Maksimum Gerilme Değeri
CAG	463,516 MPa
AGC	594,240 MPa
GCA	618,597 MPa
CAG-N	481,312 MPa
AGC-N	669,253 MPa
GCA-N	733,882 MPa



Şekil 4.9. CAG/CAG-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği



Şekil 4.10. AGC/AGC-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği



Şekil 4.11. GCA/GCA-N Dizilimine sahip Hibrit Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum eğilme gerilmesi grafiği

Grafiklerde mavi ile gösterilen çizgiler nanopartikül katkılı olmayan hibrit kompozit plakaları, kırmızı çizgiler ise ağırlıkça %2 oranında TiO_2 katkılı hibrit kompozit plakaları göstermektedir.

Gerilme değerleri incelendiğinde CAG dizilimine sahip hibrit kompozit 463,516 MPa, AGC dizilimine sahip hibrit kompozit 594,240 MPa, GCA dizilimine sahip hibrit kompozit ise 618,597 MPa değerinde bir gerilme göstermiştir. Hibrit kompozitlere %2 oranında TiO_2 katkısı ise kompozitlerin maksimum gerilme miktarlarında olumlu bir artış göstermiştir. CAG diziliminde bu artış %3,83, AGC diziliminde %12,62 ve GCA diziliminde ise %18,63 MPa miktarında sağlanmıştır. En yüksek artış miktarının %18,63 ile GCA diziliminde olduğu görünmektedir. Hibrit kompozit plakalara nanopartikül ilavesinin olumlu bir etki yarattığı buradan çıkan sonuçla anlaşılmaktadır. Hibrit kompozitlerde elyaf sıralamasının maksimum eğilme gerilmesi miktarına olan etkisi bu çalışmada incelenmiştir. Ayrıca Hibrit kompozitlerin eğilme testi esnasında kırılma şekilleri grafiklerde açıkca görülmektedir. Grafiklerde AEK, GEK ve CEK olarak ayrılmış kısımlar sırasıyla, aramid elyaf kırılması, cam elyaf kırılması ve karbon elyaf kırılması olarak kısaltılmıştır. Kırılma anları dıştan içe doğru başlamış olup elyafların dizilim sıralaması maksimum eğilme gerilmesine oldukça büyük bir etki yaratmıştır. Kırılma sıraları incelendiğinde kırılmaların en dışta olan elyafta başladığı görülmüştür. En dış katmandaki elyaf kırıldıktan sonra sırası ile ikinci ve üçüncü elyaflarda kırılmalar meydana gelmiştir. Grafiklerde kırılma kısımları buradan yola çıkılarak yorumlanmıştır.

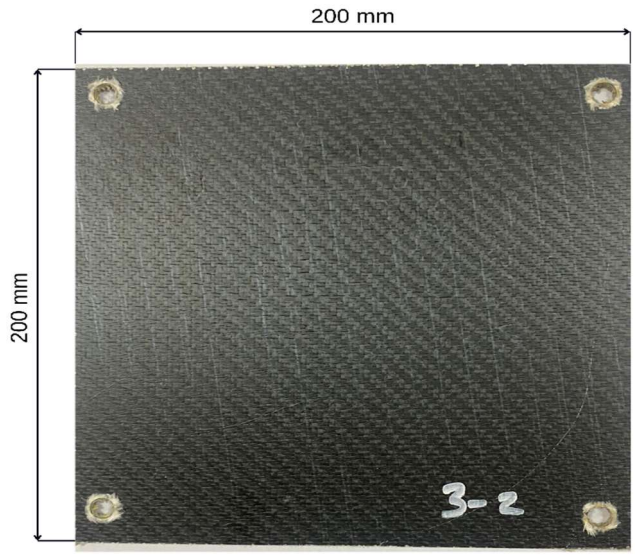
Dong (2020), yaptığı çalışmada karbon ve cam elyaf kullanarak hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin eğilme özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda en dış kısmında cam elyaf olan numunelerin, en dış kısmında karbon elyaf olan numunelere göre daha yüksek miktarda eğilme gerilmesi gösterdiğini tespit etmiştir. Dış kısımda cam elyaf olan kompozitlerin eğilme gerilme miktarlarının daha yüksek çıkmasının nedeni ise cam elyafın birim şekil değiştirme miktarının karbon elyafın birim şekil değiştirme miktarından daha yüksek olmasıdır. Bu sebepten eğilme testinde maksimum gerilmenin en alt tabakada oluşması ve bu

tabakada kullanılan elyaf türünün enerjiyi absorbe yeteneğinin fazla olması maksimum eğilme dayanım değerini arttırmıştır.

Bizim çalışmamızda da bu sonuca benzer bir sonuç elde edilmiştir. En dış yüzeyde cam elyaf bulunan hibrit kompozitler en dış yüzeyde karbon bulunan hibrit kompozitlere göre daha yüksek bir eğilme gerilmesi miktarı göstermiştir. En dış yüzeyde aramid elyaf bulunan hibrit kompoztiler ise GCA diziliminden düşük ancak CAG diziliminden yüksek miktarda bir eğilme gerilmesi göstermiştir. Bunun nedeni ise aramid elyafın, cam elyaftan daha düşük ancak karbon elyaftan daha yüksek miktarda enerjiyi absorbe edebilme yeteneğidir. Yapılan çalışmada literatüre benzer sonuçlar elde edilmiştir. Demircan (2018), yaptığı çalışmada nanopartikül ilavesinin kompozit malzemelerin dayanım değerlerinin artmasına neden olduğunu tespit etmiştir. Bizim çalışmamızda da buna benzer bir sonuç elde edilmiştir.

4.1.3. Yarı statik delme kesme

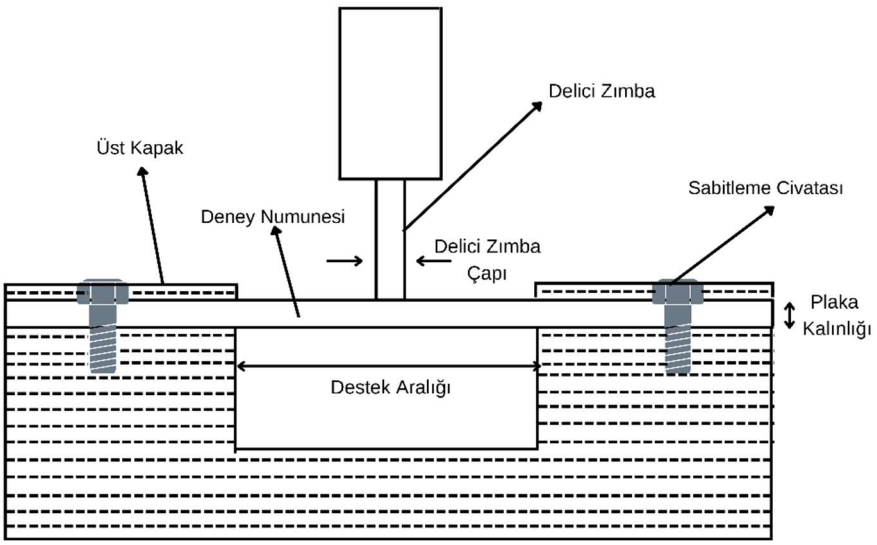
Yarı statik delme kesme test numuneleri Şekil 4.12.'deki gibi hazırlanmış ve Şekil 4.13.'deki gibi test cihazına bağlanarak deney gerçekleştirilmiştir. Deney şeması resim 4.14' te verilmiştir.



Şekil 4.12. Kesilmiş yarı statik delme kesme deney numunesi



Şekil 4.13. ASTM D6264/D6264M standardına uygun olarak hazırlanmış yarı statik delme kesme deneyi

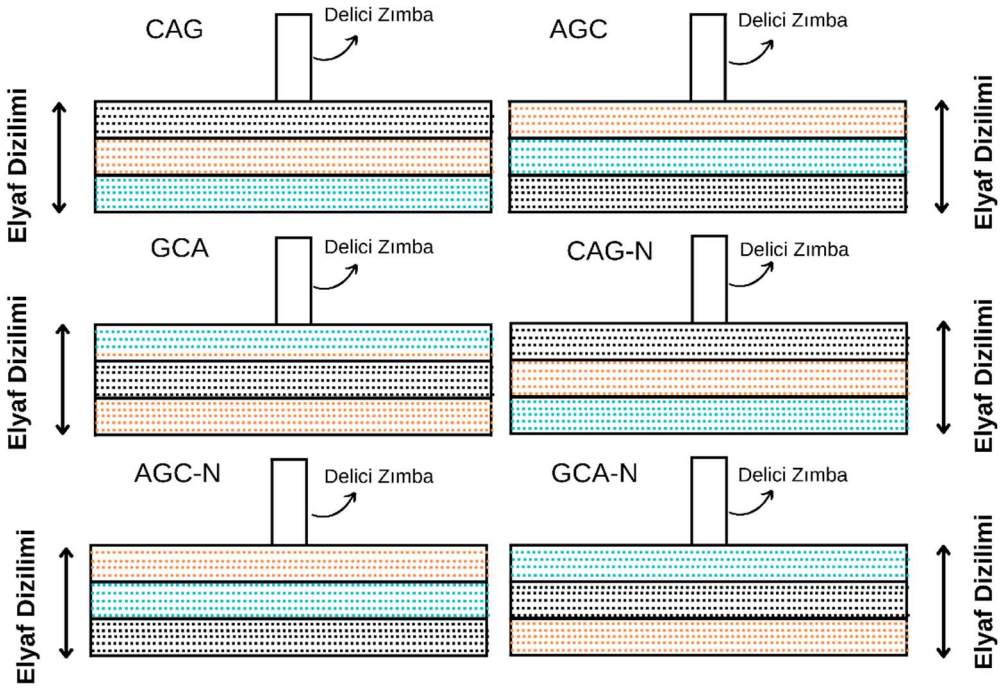


Şekil 4.14. Yarı statik delme kesme deney şeması

Yarı statik delme kesme testi malzemelerin darbe davranışlarını tespit etmek için kullanılan testlerden biridir. Bu testin amacı emilen enerjiyi hesaplamak için daha kolay bir yöntem olduğundan malzeme üzerindeki düşük hızlı darbelerin davranışını incelemektir. Deney sonucunda hibrit kompozitlerin Punch Shear Stress (zımba kesme gerilmeleri) hesaplanmıştır. PSS sonuçları Çizelge 4.4' te verilmiştir. PSS hesaplanırken Denklem 4.2 'de verilen formülasyonu kullanılmıştır. Burada Pmax maksimum gerilme, Dp zımba çapı ve Hc kompozit plaka kalınlığını temsil etmektedir. Kesme işlemi 9 mm çapında silindirik başlı bir zımba ile yapılmıştır.

$$\mathbf{PSS} = \frac{\mathbf{P_{max}}}{\pi \mathbf{D_p H_c}} \tag{4.2}$$

Elyaf dizilim şeması şekil 4.16' da verilmiştir.

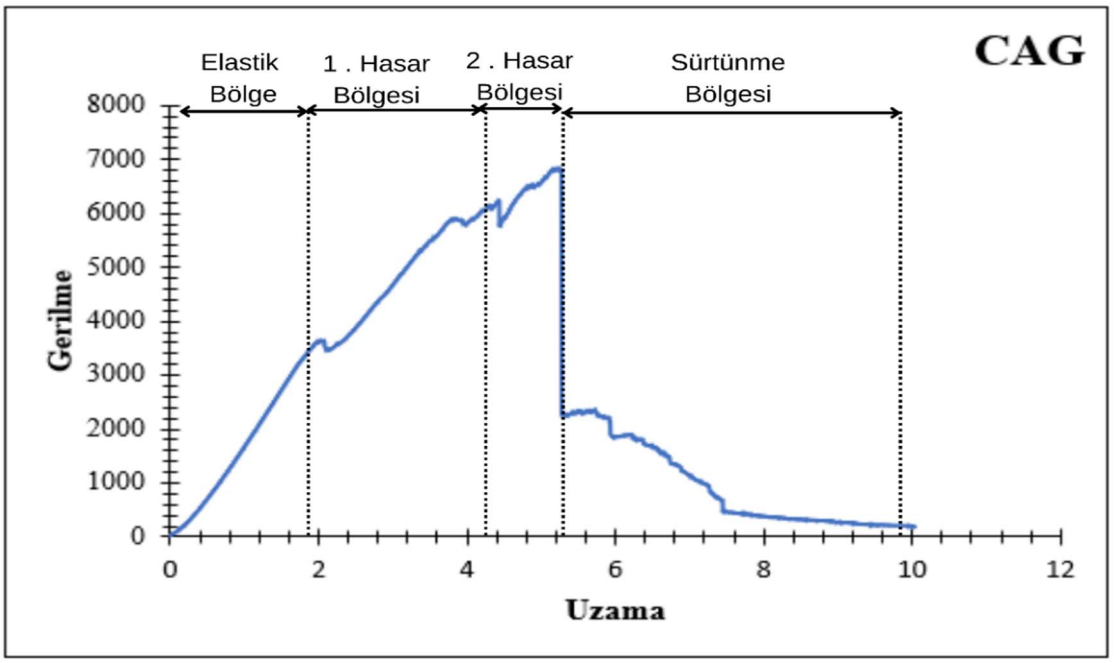


Şekil 4.15. Elyaf Dizilim Şeması

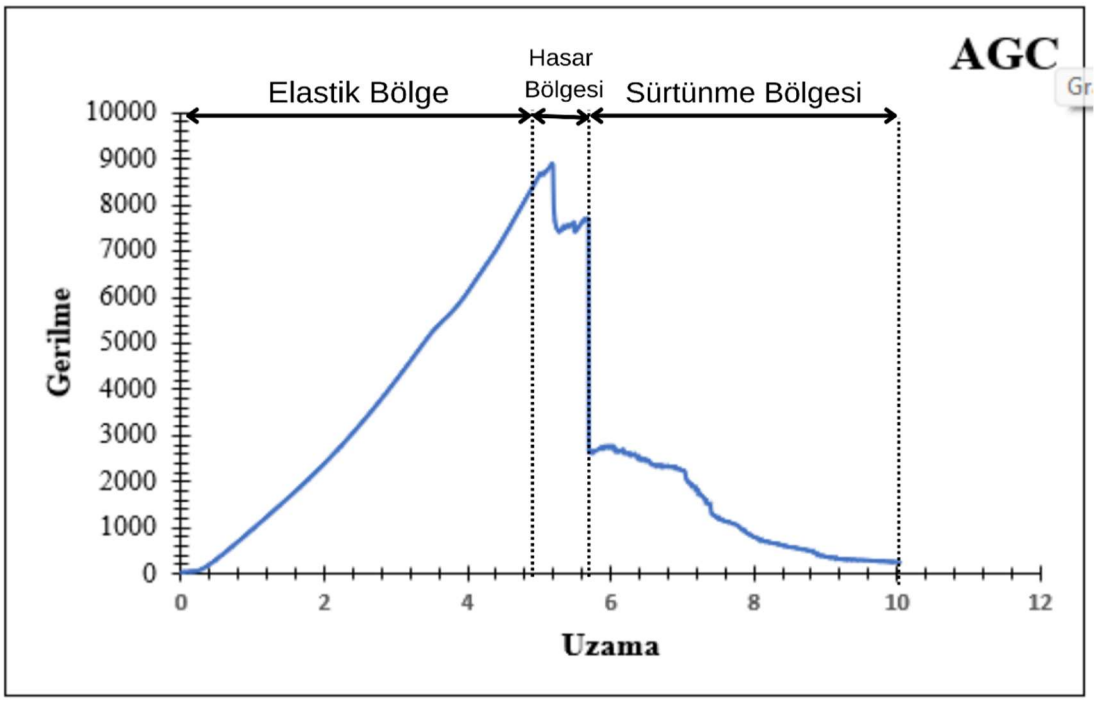
Çizelge 4.4 PSS sonuçları

	Pmax (kN)	Hc (mm)	PSS (MPa)
CAG	6591,86	3,175	73,718
AGC	7311,91	3,275	79,064
GCA	8671,94	3,137	97,757
CAG-N	7262,57	3,137	81,870
AGC-N	8412,4	3,35	88,830
GCA-N	9812,37	3,125	110,073

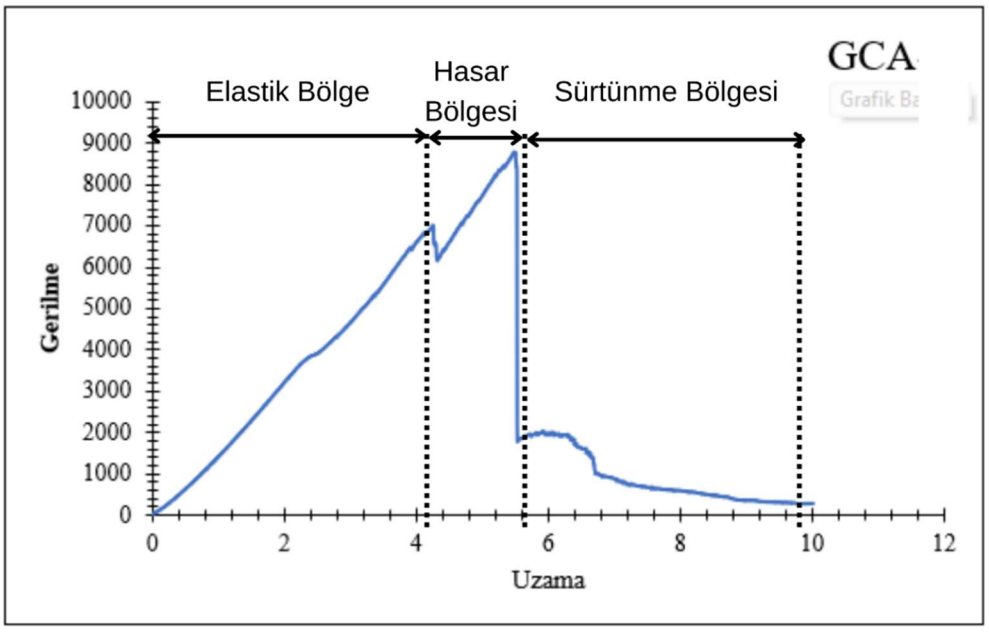
Deney sonucunda hibrit kompozitlerin maksimum gerilme ve uzama miktarları Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 ‘de verilmiştir.



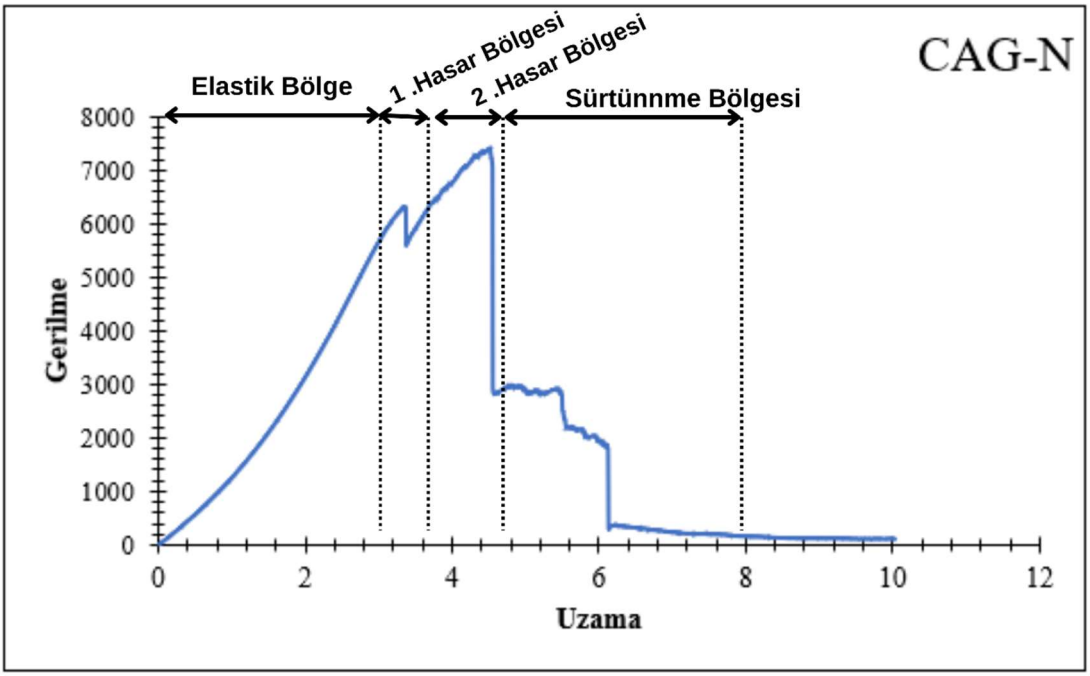
Şekil 4.16. CAG dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği



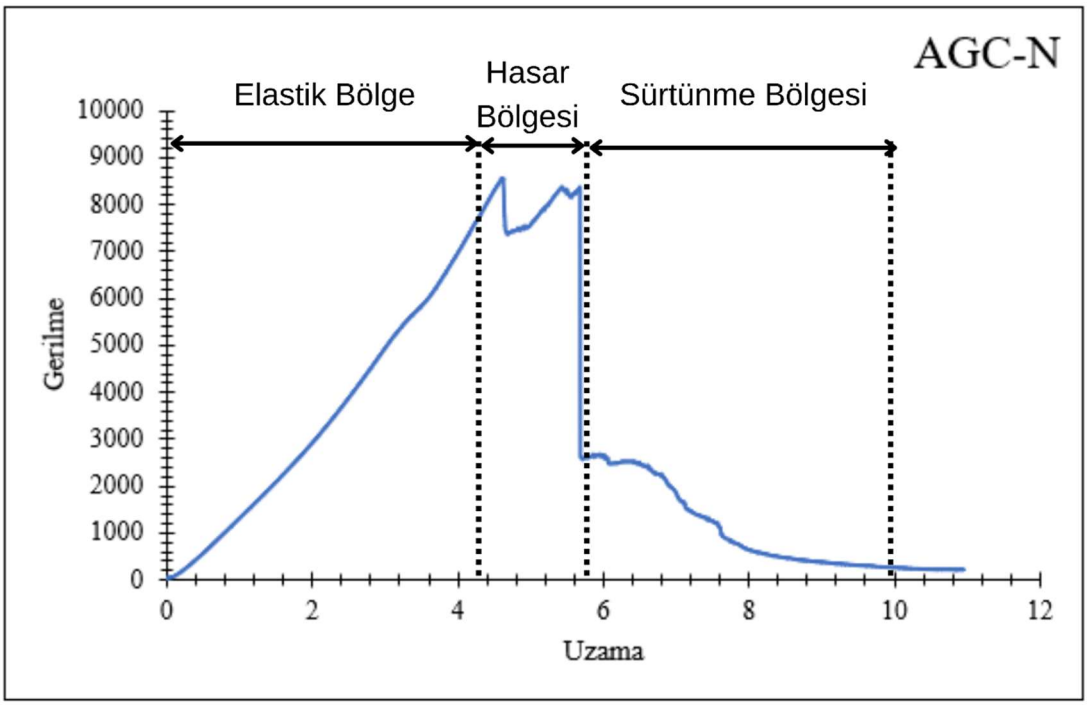
Şekil 4.17. AGC dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği



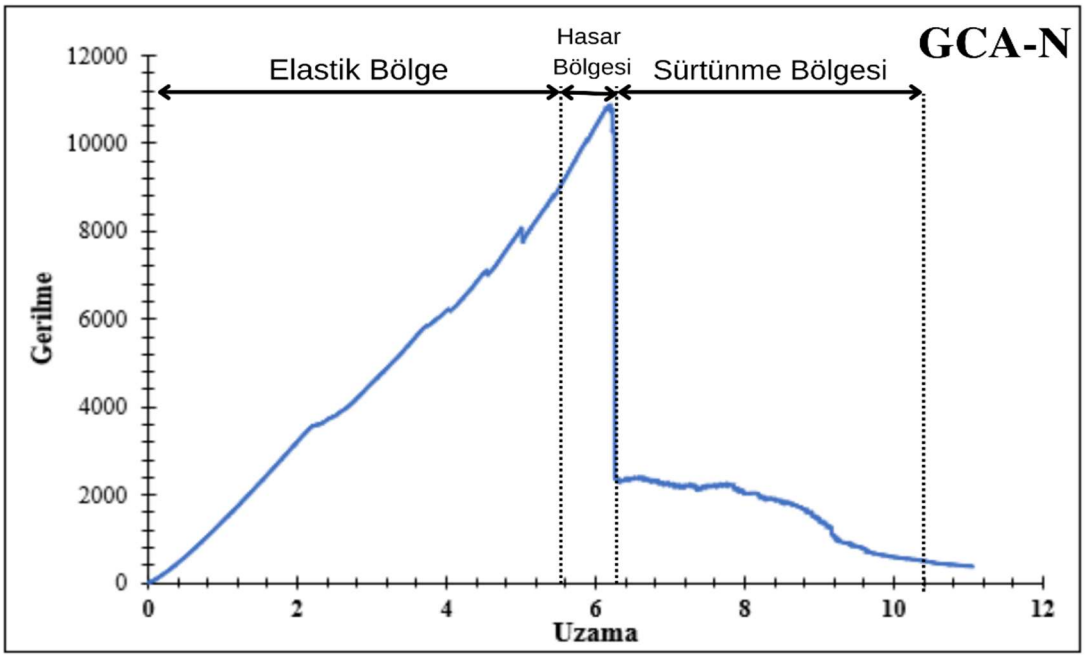
Şekil 4.18. GCA dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği



Şekil 4.19. CAG-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği



Şekil 4.20. AGC-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği



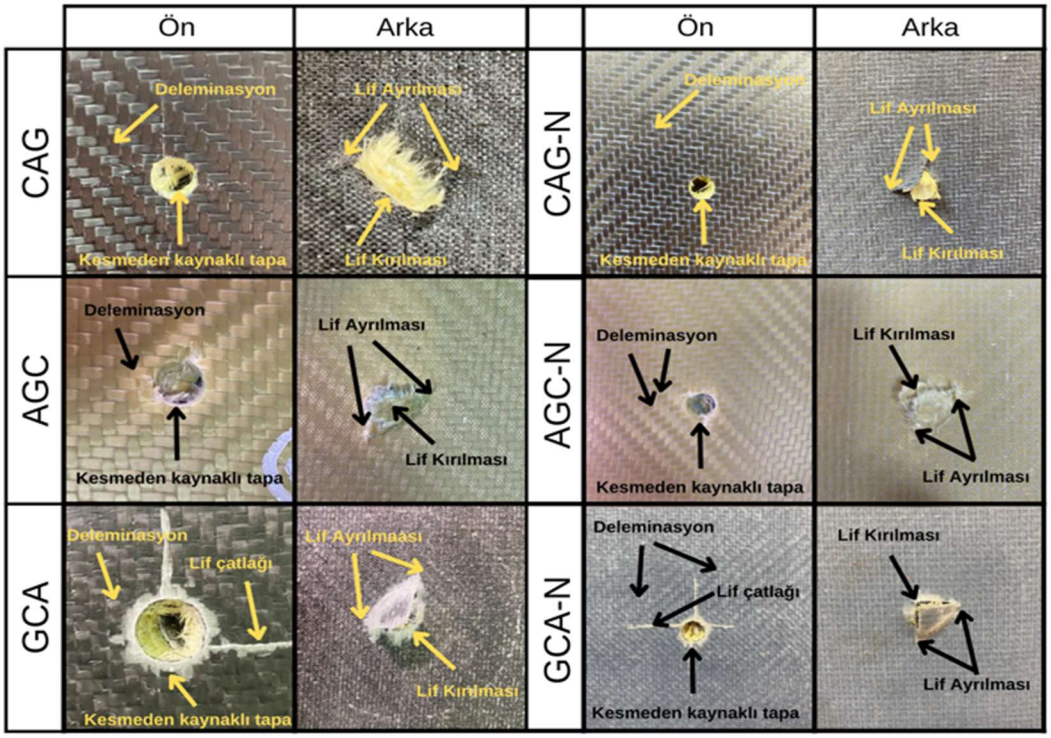
Şekil 4.21. GCA-N dizilimine sahip hibrit kompozitin maksimum gerilme ve uzama grafiği

Hibrit kompozitlerin yarı statik delme testi karşısında göstermiş oldukları davranışlar incelenmiştir. Çalışmada PSS değerleri incelendiğinde maksimum PSS değerinin GCA-N sıralamasında olduğu gözlemlenmiştir. Hibrit kompozitlere nanopartikül ilavesi PSS değerinde olumlu bir artışa sebep olmuştur. Test sonuçlarına göre GAC-N sıralamasında PSS değeri 110.073 MPa, GCA sıralamasında 97,75 MPa, AGC sıralamasında 79,06 MPa, AGC-N sıralamasında 88,83 MPa, CAG sıralamasında 73,17 MPa ve CAG-N sıralasında ise 81,87 MPa olarak tespit edilmiştir. Elyaf sıralamasının ve nanopartikül ilavesinin dayanım değerlerini etkilediği anlaşılmıştır.

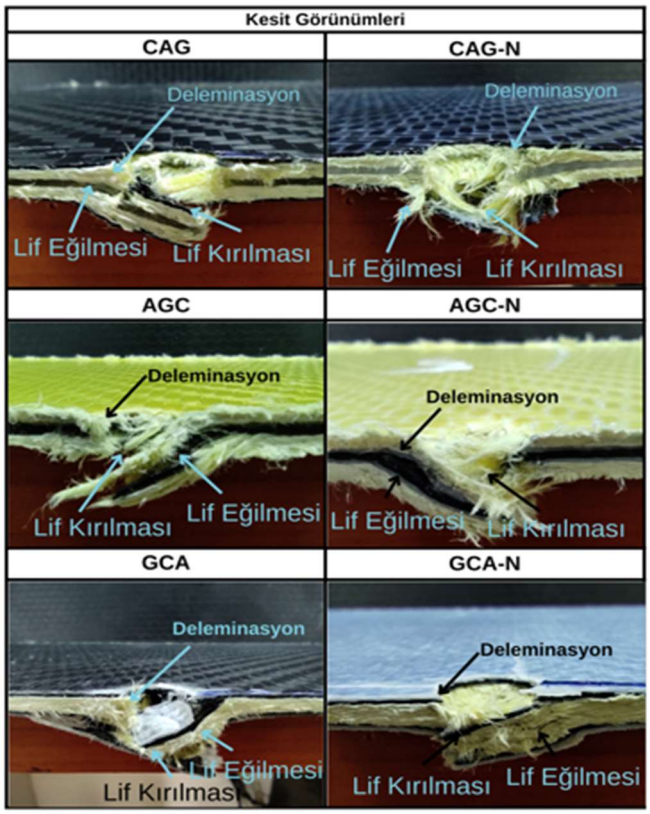
Bulut ve Erkliğ (2018), yaptıkları benzer çalışmada üçlü fiber kombinasyonlarında en dış yüzeyde cam elyaf bulunan dizilimde, diğer dizilimlere nazaran daha yüksek miktarda girinti kuvvetini ve emilen enerjiyi absorbe etmiş ve en yüksek PSS değerinin, en dış yüzeyde cam elyaf bulunan dizilimde olduğu görülmüştür. Bizim çalışmamızda da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Cam elyafların en dışta olduğu sıralamalarda yüzeylerin arka taraflarında matris hasarı ve deleminasyon daha net görünmektedir. Aramid elyafın en dışta olduğu sıralamada ise, karbon elyafın en dışta olduğu sıralamaya göre daha yüksek miktarda PSS ortaya çıkmıştır. PSS değerlerine göre nanopartikül ilavesi CAG sıralamasında PSS

değerinde %11,82 oranında, AGC sıralamasında %12,35 ve GCA sıralamasında ise %12,59 oranında artışa sebep olmuştur. Burada cam elyafın daha yüksek miktarda dayanım göstermesinin sebebi elyafın üzerine etki eden kuvveti absorbe yeteneğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Aramid elyaf, karbon elyaftan daha yüksek ancak cam elyaftan daha düşük bir dayanım göstermiştir. Buradan elde edilen sonuç ise aramidin karbondan daha yüksek ancak cam elyaftan daha düşük bir absorbe yeteneğinin olmasıdır. Hibrit kompozitlere nanopartikül ilavesi, farklı dizilimlerin dayanım değerlerini yaklaşık olarak aynı miktarda arttırmıştır. Bunun sebebi ise sadece dizilimlerin farklı olması, kullanılan elyaf türlerinin aynı olmasıdır.

Hibrit kompozitlerde meydana gelen tahribatlar ise Şekil 4.22 ve 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.22. meydana gelen mekanik hasarlar



Şekil 4.23. Kesit görüntüleri

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi numunelerde matris çatlamaları ve girintiler etrafında olan lokal deformasyonlar, tabakalar arasında deleminasyona sebep olmuştur. Numunelerde kesme işlemi esnasında numunelerin arka yüzeylerinde oluşan eğilme gerilmeleri nedeni ile hasarlı kısımlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Bu lif kopmaları şişkinlik ve hasara sebep olmuştur. Maksimum kuvvete ulaşıp delme işlemi tamamlandıktan sonra sürtünme esnasında lif yarılmaları meydana gelmiştir. Elde edilen verilere göre elyaf sıralamasının bu tür kompozitlerde çok önemli olduğu tespit edilmiştir. Örneğin kırılma türleri incelendiğinde en yüksek dayanım değerini veren, GCA sıralamasında diğer sıralamalara göre daha farklı bir kırılma gözlemlenmiştir. Bu etki cam elyafın daha düşük sertliğine ve kırılgan olmasından dolayıdır.

Şekil 4.23'te kırılmaların kesit görüntüleri incelendiğinde ise lif eğilmeleri, lif kırılmaları ve deleminasyonlar açıkça görünmektedir. Kompozitlerin eğilmesi ve tabakalarının kayması kesme esnasında oluşan gerilmeye bağlıdır. Oluşan gerilme

tabakalarda bir eğilme gösterdiğinden dolayı tabaka önce eğilmeye ardından kırılmaya başlamaktadır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada cam karbon ve aramid elyaf takviyeli hibrit epoksi nanokompozitler üretilmiş ve bunların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada CAG, AGC ve GCA dizilimleri kullanılmış ve bu dizilimlere ağırlıkça %2 oranında TiO_2 nanopartikül ilave edilmiştir. Hibrit kompozitlerin dizilimleri ve nanopartikül ilavesinin mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Kompozitlere çekme, eğilme ve yarı statik penetrasyon testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde CAG dizilimine sahip hibrit kompozit 453,575 MPa, AGC dizilimine sahip hibrit kompozit 473.175 MPa, GCA dizilimine sahip hibrit kompozit ise 474.375 MPa değerinde bir gerilme göstermiştir. Hibrit kompozitlere %2 oranında TiO_2 katkısı ise kompozitlerin maksimum gerilme miktarlarında olumlu bir artış göstermiştir. Eğilme testinde ise gerilme değerleri incelendiğinde CAG dizilimine sahip hibrit kompozit 688,553 MPa, AGC dizilimine sahip hibrit kompozit 877,501 MPa, GCA dizilimine sahip hibrit kompozit ise 935,793 MPa değerinde bir gerilme göstermiştir. Hibrit kompozitlere %2 oranında TiO_2 katkısı ise kompozitlerin maksimum gerilme miktarlarında olumlu bir artış göstermiştir. CAG diziliminde bu artış %6.1, AGC diziliminde %11.24 ve GCA diziliminde ise %16,64 MPa miktarında sağlanmıştır. En yüksek artış miktarının %16,64 ile GCA diziliminde olduğu görünmektedir. Yarı statik penetrasyon testinde ise test sonuçlarına göre GAC-N sıralamasında PSS değeri 110.073 MPa, GCA sıralamasında 97,75 MPa, AGC sıralamasında 79,06 MPa, AGC-N sıralamasında 88,83 MPa, CAG sıralamasında 73,17 MPa ve CAG-N sıralasında ise 81,87 MPa olarak tespit edilmiştir. Elyaf sıralamasının ve nanopartikül ilavesinin dayanım değerlerini etkilediği anlaşılmıştır**.** Genel sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Genel sonuçlar incelendiğinde elyaf türleri ve dizilimlerin mekanik özelliklere olan etkileri tespit edilmiştir. Kompozit üretilirken nanopartikül ilavesi bu mekanik özelliklerde olumlu bir artışa sebep olmuştur.

Çizelge 5.1 Genel sonuçlar

	Çekme Gerilmesi	Eğilme Gerilmesi	PSS
CAG	453,575 MPa	463,516 MPa	73,718
AGC	473,175 MPa	594,240 MPa	79,064
GCA	474.375 MPa	618,597 MPa	97,757
CAG-N	464.194 MPa	481,312 MPa	81,870
AGC-N	495,056 MPa	669,253 MPa	88,830
GCA-N	489.475 MPa	733,882 MPa	110,073

Hibrit kompozitlerin genel karekteristik ve mekanik özellikleri sahip oldukları elyaf türlerine ve elyaf dizilimlerine bağlı olarak değişmektedir. Çalışma sonucunda hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri, elyafların dizilimi ile orantılı olarak değişmektedir. Çizelge 5.2'de maksimum dayanım gösteren dizilimler verilmiştir. Cam elyafın en dışta olduğu sıralamalarda eğilme ve yarı statik delme kesme testinde görüldüğü gibi, maksimum gerilmenin GCA sıralamasında olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise cam elyafın birim şekil değiştirme kabilyetinin yüksek olmasıdır. Çekme testinde ise dizilim çok büyük bir farklılık yaratmamıştır. Çekme testinde kuvvet eksenel biçimde dağıldığından dizilimin bu testte herhangi bir önemi yoktur.

Çizelge 5.2 maksimum dayanım gösteren dizilimler

Test	Dizilim	Maksimum Gerilme
Çekme	AGC	473,175 MPa
Eğilme	GCA	618,597 MPa
Yarı statik delme kesme	GCA	97,757 MPa

Çizelge 5.3' te nanopartikül ilavesi olan kompozitlerin dizilim açısından maksimum dayanım gösterdiği dizilimler verilmiştir.

Çizelge 5.2 maksimum dayanım gösteren dizilimler

Test	Dizilim	Maksimum Gerilme
Çekme	AGC-N	495,056 MPa
Eğilme	GCA-N	733,882 MPa
Yarı statik delme kesme	GCA-N	110,073 MPa

Nanopartikül ilavesinin sonucunda dizilimlerde herhangi bir farklılık olmamıştır. Maksimum dayanım gösteren dizilimler nanopartikül ilavesi ile dayanım değerlerini arttırmıştır. Dizilimler açısından eğilme gerilmesi ve kesme gerilmesine

maruz kalan yapı elemanlarında GCA/GCA-N dizilimine sahip kompozit plakalar, Çekme gerilmesi etkisi altında olan yapı elamanlarında ise AGC/AGC-N dizilimine sahip kompozitler kullanılabilir.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışmada, hibrit kompozitlerde elyaf diziliminin ve nanopartikül ilavesinin, kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi konusunda önemli bir yerde olduğu görülmüştür. Üç farklı dizilimde ve nanopartikül ilaveli hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve bu çalışmanın daha ileriye gidebilmesi için tavsiye edilen öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Bu çalışmada farklı tür elyaflar kullanılarak hibrit kompozit üretilebilir ve farklı mekanik özellikleri incelenebilir.
- Farklı tür nanopartiküllerin ilavesi sonucunda nanopartiküllerin mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.
- Hibrit kompozitlerde elyaf sıralamaları değiştirilip, farklı kombinasyonlarda kompozitler üretilebilir.
- Farklı elyafların reçine emme kabiliyetleri araştırılıp bu farklar değerlendirilerek çalışma yapılabilir.
- Elyafların karekteristik özellikleri incelenerek, hibrit kompozitlerde bu karekteristik özelliklerin nasıl bütünleştiği tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

ARASAN, Ş. 2014. Hibrit kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

BAĞATIR, T. (2018). Grafen nanopartikül takviyesinin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması (Master's thesis, Batman Üniversitesi).

BERK, S., & AKKURT, İ. (2012). Nanopartikül: Geleceğin korkulu rüyası. Tuberk Toraks, 60(2), 180-4.

Bulut, M. ve Erkliğ, A. (2018). Lamine hibrit kompozit plakalar üzerinde yarı statik girinti etkisinin araştırılması. Malzemelerin Mekaniği, 117 , 225-234.

Bulut, M. ve Erkliğ, A. (2018). Lamine hibrit kompozit plakalar üzerinde yarı statik girinti etkisinin araştırılması. Malzemelerin Mekaniği, 117 , 225-234.

CAMARGO, P. H. C., SATYANARAYANA, K. G., & WYPYCH, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. Materials Research, 12(1), 1-39.

CHEON, J., LEE, M., & KİM, M. 2020. Study on the stab resistance mechanism and performance of the carbon, glass and aramid fiber reinforced polymer and hybrid composites. Composite Structures, 234, 111690.

ÇETİN, M. E., BAŞTOSUN, Y., TATAR, A. C., CETİN, M. H., DEMİR, O., ÖNAL, G., & AVCI, A. 2022. The effect of halloysite nanotube modification on wear behavior of carbon-aramid fiber reinforced hybrid nanocomposites. Polymer Composites, 43(1), 624-637.

DEMİRCAN, G., KİSA, M., OZEN, M., & ACİKGOZ, A.(2021). Quasi-Static Penetration Behavior of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Nanocomposites. Mechanics of Composite Materials, 57(4), 503-516.

DONG, C. (2020). Flexural properties of symmetric carbon and glass fibre reinforced hybrid composite laminates. Composites Part C: Open Access, 3, 100047.

DURGUN, İ. (2014). El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 15-16.

ERKENDİRCİ, Ö. F., & AVCI, A. (2020). Quasi-static impact resistance and damage mechanisms of polymer hybrid nanocomposites. Plastics, Rubber and Composites, 49(1), 25-34.

ESEN, B. (2011). Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen Nano Metal Oksitlerin Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi. Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 73s.

İMAK, A. (2018). Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının analizi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Karthik, K., Rajamani, D., Manimaran, A., & Udayaprakash, J. (2021). Evaluation of tensile properties on Glass/Carbon/Kevlar fiber reinforced hybrid composites. Materials Today: Proceedings, 39, 1655-1660.

Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi, 29, 38-45..

KHAYAL, OMES (2017). Kompozit lamine plakaların kusurları üzerine literatür taraması. Mikroskopi ve ultrastrüktür dergisi , 5 (3), 119-122.

KUMAR, S., NEHRA, M., DİLBAGHİ, N., TANKESHWAR, K., & KİM, K. H. (2018). Recent advances and remaining challenges for polymeric nanocomposites in healthcare applications. Progress in polymer science, 80, 1-38.

MARTİN, S. (2019). Investigation of tribological properties of graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites (Doctoral dissertation, Izmir Institute of Technology (Turkey).

MÉSZÁROS, L., DEÁK, T., BALOGH, G., CZVİKOVSZKY, T., & CZİGÁNY, T. (2013). Preparation and mechanical properties of injection moulded polyamide 6 matrix hybrid nanocomposite. Composites Science and Technology, 75, 22-27.

MOHANRAJ, V. J., & CHEN, Y. (2006). Nanoparticles-a review. Tropical journal of pharmaceutical research, 5(1), 561-573.

NARESH, K., SHANKAR, K., VELMURUGAN, R., & GUPTA, N. K. (2018). Statistical analysis of the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites. Thin-Walled Structures, 126, 150-161.

OH, J. H., & KİM, Y. G. (1997). Optimum bolted joints for hybrid composite materials. Composite structures, 38(1-4), 329-341.

RANGASWAMY, H., CHANDRASHEKARAPPA, M. P. G., PİMENOV, D. Y., GİASİN, K., & WOJCİECHOWSKİ, S. (2021). Experimental investigation and optimization of compression moulding parameters for MWCNT/glass/kevlar/epoxy composites on mechanical and tribological properties. journal of materials research and technology, 15, 327-341.

Sadeghi, M., & Pol, M. H. (2019). Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading. Journal of Sandwich Structures & Materials, 21(4), 1535-1556.

SAPİAİ, N., JUMAHAT, A., & MAHMUD, J. (2015). Flexural and tensile properties of kenaf/glass fibres hybrid composites filled with carbon nanotubes. Jurnal Teknologi, 76(3).

SAYER, M. (2009). Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Pamukkale Üniversitesi

Sebaey, T. A., & Wagih, A. (2019). Flexural properties of notched carbon–aramid hybrid composite laminates. Journal of Composite Materials, 53(28-30), 4137-4148.

SONG, JH (2015). Karbon/cam ve karbon/aramid lifleri kullanılarak hazırlanan lamine yüksek performanslı hibrit kompozitlerin eşleştirme etkisi ve çekme özellikleri. Kompozitler Bölüm B: Mühendislik , 79 , 61-66.

Şen, F., PALANCIOĞLU, H., & ALDA Ş, K. (2010). Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanları. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (elektronik), 7(1), 111-118. Sayer, M., & Bektaş, N. B. (2009). Darbe yükü altındaki hibrit kompozit plakalara sıcaklığın etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(3), 337-343.

TEHRANİ, M., BOROUJENİ, A. Y., HARTMAN, T. B., HAUGH, T. P., CASE, S. W., & AL-HAİK, M. (2012, November). Impact and Quasi-Static Mechanical Properties of a Carbon Fiber Reinforced Carbon Nanotube/Epoxy. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 45196, pp. 1315-1320). American Society of Mechanical Engineers.

THOSTENSON, ET, Lİ, C. VE CHOU, TW (2005). Bağlamda nanokompozitler. Bileşik bilim ve teknoloji , 65 (3-4), 491-516.
TOPTAŞ, E., & AKKUŞ, N. (2017). Filament sarma makinelerinde elektriksel direnç yöntemi kullanılarak karbon fiberlerin hasar tespiti. International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 93 (1), 671-679.
Ude, AU ve Azhari, CH (2019). bombyx mori fiber/cam-fiber/epoksi hibrit kompozit silindirik tüplerin yanal çarpışmaya dayanıklılık tepkisi-deneysel.
ÜNAL, A., & GÜLTEN, Z. PULTRUSION YÖNTEMİ İLE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ.
YAO, L., Lİ, W., WANG, N., Lİ, W., GUO, X., & QİU, Y. (2007). Tensile, impact and dielectric properties of three dimensional orthogonal aramid/glass fiber hybrid composites. Journal of materials science, 42(16), 6494-6500.