Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(1): 296-307 (2025)

ZrO_2 Katkılanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Esra ÖZTÜRK[1*] Erdem MERMER[2] Hanifi ÇİNİCİ[3]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye*

[3]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:12/11/2024
Düzeltme: 14/12/2024
Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Karbon Fiber
Epoksi Reçine
ZrO_2

Article Info

Research article
Received: 12/11/2024
Revision: 14/12/2024
Accepted: 25/12/2024

Keywords

Composites
Carbon Fiber
Epoxy Resin
ZrO_2

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, epoksi reçine içine farklı oranlarda ZrO_2 katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiştir. ZrO_2 katkısının yapısal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. / In this study, carbon fiber reinforced polymer composites were produced by adding different ratio ZrO_2 into epoxy resin and the effect of ZrO_2 addition on structural, thermal and mechanical properties was examined.



Şekil A: *Karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemi /* ***Figure A:*** *Production method of carbon fiber reinforced composites*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Karbon fiber takviyeli kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için reçine içine ZrO_2 tozu katkılanmıştır. / ZrO_2 powder was added into the resin to improve the thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites.*
- *Epoksi reçine içine % 0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO_2 tozu katkılanmıştır. / ZrO_2 powder was added into the epoxy resin at 0.5%, 1%, 1.5% and 2% weight ratios.*
- *ZrO_2 katkılanması ile kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özellikleri etkilenmiştir. /The structural, thermal and mechanical properties of the composites were affected by ZrO_2 doping.*

Amaç (Aim): *Karbon fiber takviyeli kompozitlere ZrO_2 katkılayarak kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini incelemektir. / To investigate the thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites by adding ZrO_2*

Özgünlük (Originality): *Literatürde kullanılmamış olan mikron boyutunda ZrO_2 tozu katkılanarak kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. / Thermal and mechanical properties of the composites were investigated by adding micron-sized ZrO_2 powder, which has not been used in the literature.*

Bulgular (Results): *En yüksek polimerleşme entalpi ve en yüksek ILSS değeri katkısız kompozitte elde edilmiştir. En yüksek çekme gerilimi %2 ZrO_2 katkılı kompozitte elde edilmiştir. / The highest polymerization enthalpy and the highest ILSS value were obtained in the undoped composite. The highest tensile stress was obtained in 2% ZrO_2 doped composite.*

Sonuç(Conclusion): *ZrO_2 katkısı kompozitlerin çekme gerilimini artırmış fakat ILSS ve polimerleşme entalpi değerlerini düşürmüştür. / ZrO_2 addition increased the tensile stress of the composites but decreased the ILSS and polymerization enthalpy values.*

*Corresponding author, e-mail: esra.ozturk9@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1583725

GU J Sci, Part C, 13(1): 296-307 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

ZrO_2 Katkılanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Esra ÖZTÜRK[1*] Erdem MERMER[2] Hanifi ÇİNİCİ[3]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye*

[3]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:12/11/2024
Düzeltme: 14/12/2024
Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Karbon Fiber
Epoksi Reçine
ZrO_2

Öz

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler özellikle havacılık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, epoksi reçine içine ZrO_2 katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiş ve ZrO_2 katkısının yapısal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, epoksi reçine içine % 0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO_2 tozu katkılanarak, el yatırma tekniği ile karbon fiber takviyeli kompozitler üretilmiştir. Üretilen numunelerin hacimsel hesaplamaları, shore D sertlik testi, DSC, çekme testi ve tabaklar arası kesme mukavemetinin belirlenmesi için eğme testi yapılmıştır. En yüksek hacimsel artış değeri %2 ZrO_2 katkılı numunede hesaplanmıştır En yüksek sertlik değeri 85 shore D olarak katkısız numunede ölçülmüştür. En yüksek çekme gerilimi %2 ZrO_2 katkılı kompozitte elde edilmiştir. En yüksek tabakalar arası kesme mukavemeti (ILSS) ve en yüksek polimerleşme entalpisi katkısız kompozitte gözlemlenmiştir.

Investigation of Structural and Mechanical Properties of ZrO_2 Doped Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites

Article Info

Research article
Received: 12/11/2024
Revision: 14/12/2024
Accepted: 25/12/2024

Keywords

Composites
Carbon Fiber
Epoxy Resin
ZrO_2

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer composites have an important place especially in the aviation industry.In this study, carbon fiber reinforced polymer composites were produced by adding ZrO_2 into epoxy resin and the effect of ZrO_2 addition on structural, thermal and mechanical properties was examined. Carbon fiber reinforced composites were produced by hand lay-up method by adding 0.5%, 1%, 1.5% and 2% weight ratio of ZrO_2 powder into epoxy resin. Volumetric calculations, shore D hardness test, DSC, tensile test and bending test was performed to determine the interlaminar shear strength (ILSS) of the produced samples were performed. The highest volumetric increase was calculated in 2% ZrO_2 doped sample. The highest hardness value was measured as 85 shore D in the undoped sample. The highest tensile stress was obtained in 2% ZrO_2 doped composite. The highest interlaminar shear strength (ILSS) and the highest polymerization enthalpy were observed in undoped composite.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozitler, farklı iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek oluşturduğu gelişmiş malzemelerdir [1]. Kompozitlerde, farklı malzemelerin üstün özelliklerinin bir araya gelmesi ile üretilen yeni malzeme ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır [2,3]. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek mekanik özelliklerle birlikte hafiflik ve düşük yoğunluk gibi avantaj sağladıkları için havacılık sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır [3,4].

*Corresponding author, e-mail: esra.ozturk9@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1583725

Kompozit malzemeler matris ve takviye fazı olarak iki ana bileşenden oluşur. Matris malzemesine göre, metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olarak 3 gruba ayrılır [5]. Polimer matrisli kompozitler düşük yoğunluk ve yüksek dayanım, hafiflik, üretim kolaylığı, düşük maliyet, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık başta olmak üzere birçok endüstride kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Polimerler iç yapılarına göre, termoplastik ve termoset olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır [2,6]. Termosetler, monomer moleküllerin kimyasal reaksiyon sonucunda çapraz bağlarla birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelen malzemelerdir. Kovalent bağlarla üç boyutlu olarak bağlandıkları için oldukça rijit bir yapıya sahiptirler. Kürleme sürecinde polimerizasyon reaksiyonu gerçekleşirken çapraz bağlar oluştuğu için termosetlerin ısıtılarak yumuşatılmaları ve şekillendirilmeleri mümkün değildir. Poliester, vinilester ve epoksi yaygın olarak kullanılan termosetlerdir [2,7,8]. Epoksi, reçine ve sertleştirici olarak iki bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin belirtilen oranlarda karıştırılması ve belirli bir sıcaklıkta kürlenmesi ile katı hale geçerler [3]. Epoksi reçinelerin büzülme oranı %2'den azdır ve tüm elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için uygundur. Havacılıkta genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar [9]. Kompozit malzemeler takviye malzemelerine göre de elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve hibrid kompozitler olarak 4'e ayrılabilir. Elyaf takviyeli kompozitler cam, grafit, karbon ve aramid fiber olarak ayrılır [4]. Karbon fiber, polimer matrisli kompozitlerde 1960'lardan beri modern bilim ve teknoloji için en önemli endüstriyel malzemelerden biri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Karbon fiberler, insan gözüyle görülebilen çok ince filamentlerdir çapı yaklaşık 5–10 μm'dir. Karbon fiberlerin termal genleşme katsayısı yaklaşık sıfır olduğundan malzemenin termal genleşmesini düşürürler. Karbon fiberler çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek termal kararlılık, yüksek iletkenlik ve korozyon direnci gibi mükemmel özellikleri nedeniyle kompozit malzeme kullanımı için öncelikli olarak tercih edilirler. Karbon fiber genellikle PAN (Poliakrilonitril), zift ve selülöz (Rayon)'dan elde edilir [10-15].

Literatürde yapılan çalışmalar, kompozitlerin ağırlığını arttırmadan ya da işlenebilirliğini olumsuz etkilemeden az miktarda (ağırlıkça %5'ten daha az) çeşitli katkı maddeleri eklenerek kompozitlerin performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir [16,17]. Farklı katkı maddelerinin polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde farklı etkiler gösterdiğini bulmuştur. ZnO, ZnF_2, ZnS ve $Zn(C18H35O_2)_2$ gibi birçok çinko bileşiğinin katkı maddesi olarak kullanılmasıyla aşınma oranının önemli ölçüde azalabildiği gözlemlenmiştir. Son zamanlarda SiC, SiO_2 ve TiO_2 katkı maddeleri kullanılmıştır. SiO_2 ve TiO_2 katkılanması kompozitlerin tribolojik özelliklerine etki ederken, SiC katkılanması kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerine etki ettiğini gözlemlenmiştir [18-20]. Cam, alüminyum oksit (Al_2O_3), magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$), kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) parçacıkları katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, kompozitlerin yüksek stabilite ve mekanik dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir [21]. Katkı maddesi olarak kullanılan grafen oksit nanopartiküllerin çatlak ilerlemesine etki ettiğini gözlemlenmiştir [22]. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisine çinko borat ve grafen tozları katkılanarak elde edilen polimer kompozitin mekanik özelliklerinde değişim meydana geldiği gözlemlenmiştir [23]. Polipropilen esaslı kompozit malzemelere alüminyum tozu katkılanmasıyla vizkozite değerlerinde değişiklikler gözlenmiştir [24]. Bor bileşikleri katkılanarak üretilen polimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinde artma gözlemlenmiştir [25]. Zirkonyum dioksit, yüksek mukavemet, yüksek kırılma tokluğu, mükemmel aşınma direnci, yüksek sertlik ve kimyasal direnç gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Bu sebeple ZrO_2 nanopartikülleri, gelişmiş performansa sahip kompozitler üretmek için katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Epoksilerin mekanik davranışını geliştirme ve bazı durumlarda özellikle tokluklarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir [26].

Bununla beraber, reçine içine mikron boyutunda ZrO_2 katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozit üretimi ile ilgili çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada, reçine içine farklı oranlarda ZrO_2 katkısının etkileri araştırılarak, termal ve mekanik özelliklerinin analiz edilmesiyle literatüre önemli bir katkı sağlamakta ve endüstriyel uygulamalara örnek teşkil etmektedir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak 300x300mm boyutlarında karbon fiber prepregler kullanılmıştır. Polimer matris malzemesi olarak LOCTITE EA 9396 AERO (Hysol EA 9396) epoksi

reçine kullanılmıştır. Epoksi, reçine ve sertleştirici olarak 2 bileşenden oluşur. Hysol EA 9396 düşük vizkozitelidir. Oda sıcaklığında saklama ve kürlenme özelliklerine sahiptir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gösterir. Partikül olarak 5µm'nin altında toz boyutuna sahip ZrO_2 kullanılmıştır.

2.2. Üretim Yöntemi (Production Method)

Bu çalışmada katkısız, %0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO_2 katkılı numuneler üretilmiştir. Belirtilen oranlarda ZrO_2, epoksi reçine içine katkılanarak Speed Mixer'da 2500 rpm'de 5 dk karıştırılmıştır. Karıştırılan numuneler kalıplara alınarak 23°C, 46°C, 66°C ve 86°C'de kürlenmiştir. Daha sonra aynı oranlardaki karışımlar el yatırma yöntemi ile 300x300mm boyutlarında kesilmiş olan karbon fiberlere 5'er kat serim yapılarak uygulanmıştır. Serimleri yapılan numuneler, 23°C'de 1 atmosferlik basınç altında vakum torbalama işlemi ile kürlenmiştir. Vakum, hava boşluklarının ortadan kaldırılmasına yardımcı olur ve reçinenin liflerin arasına nüfuz etmesini kolaylaştırarak fazla reçinenin de dışarı atılmasını sağlar. Şekil 1'de ZrO_2 katkılı reçinelerin Şekil 2'de karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 1. a) Speed mixer b) kalıba alınan karışım c) kürleme için etüv d) kalıptan çıkarılan numune (a)Speed mixer b) sample taken into mold c) oven for curing d) sample removed from mold)



Şekil 2. a) El yatırma yöntemi ile kompozit üretimi b) vakum torbalama (a)Composite production by hand lay-up method b) vacuum bagging)

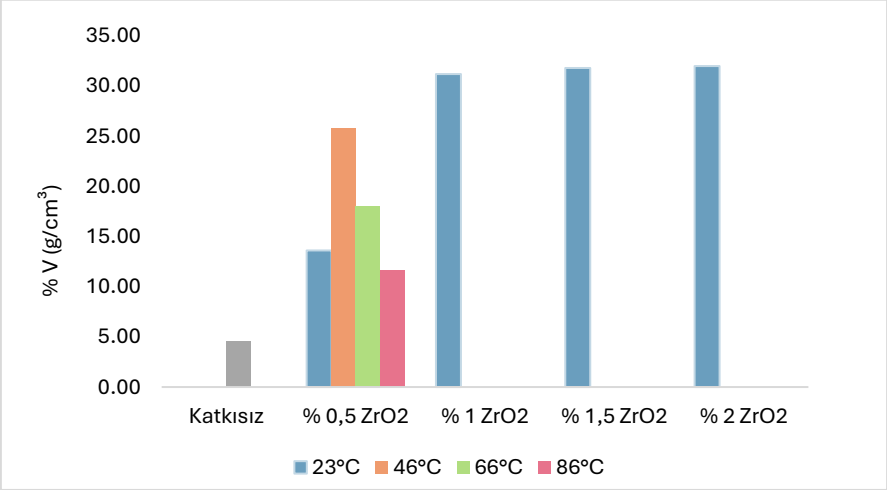
2.3. Karakterizasyon Teknikleri (Characterization Techniques)

ZrO_2 katkılı reçinelerin hacimsel hesaplamaları, arşimet prensibi ile ± 0.01 gr hassasiyetindeki terazi kullanılarak yapılmıştır. Shore D sertlik testi, TYPE D DUROMETER cihazı ile ASTM D2240 standartlarına göre yapılmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin DSC, çekme ve eğme testleri yapılmıştır. DSC testi Universal TA Instrument cihazı ile EN 6064 standartlarına göre, çekme testi INSTRON 34TM-30 cihazı ile ASTM D 638–10 standartlarına göre ve eğme testi INSTRON cihazı ile EN 2563 standartlarına göre yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

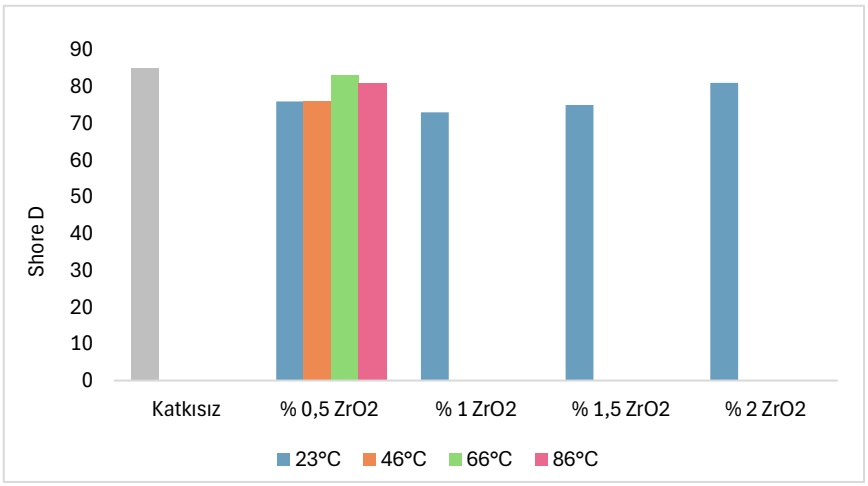
3.1. ZrO_2 Katkılı Reçinelerin Analizi (Analysis of ZrO_2 Doped Resins)

Hacimsel hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Şekil 3' te verilmiştir. En yüksek hacimsel artış %32 g/cm³ ile %2 ZrO_2 katkılanmış numunede elde edilmiştir. Katkılanmış numunelerin tamamında katkısızdan daha fazla hacimsel artış görülmüştür. Epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının hacimsel artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

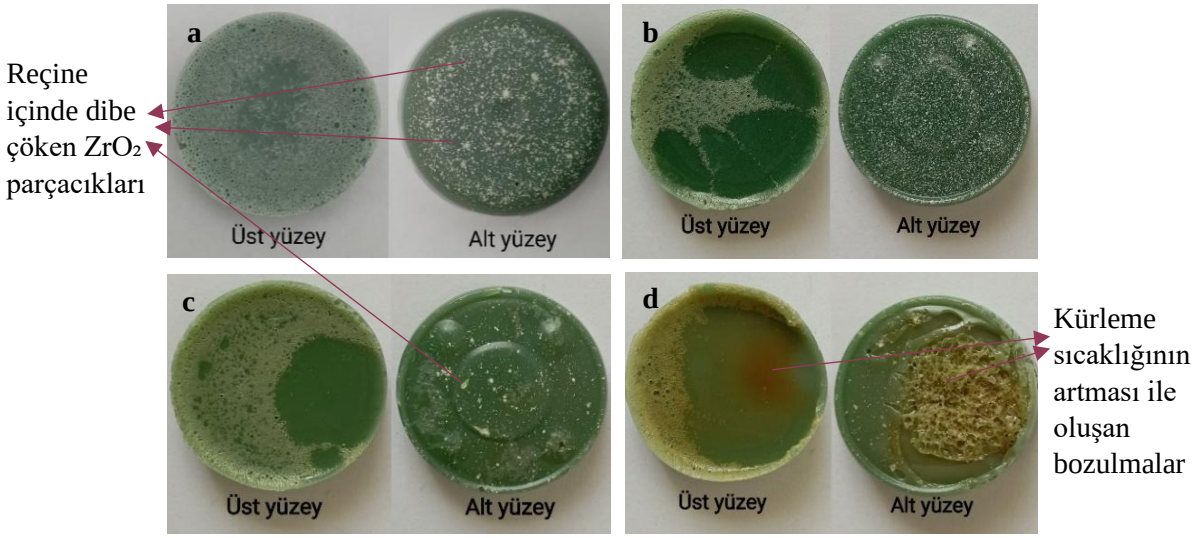


Şekil 3. Katkısız ve ZrO_2 katkılı reçinelerin hacimsel hesaplama değerleri (Volumetric calculation values of undoped and ZrO_2 doped resins)

Shore D sertlik ölçümlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sertlik değerleri Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek sertlik değeri 85 Shore D ile katkısız numunede ölçülmüştür. Epoksi reçine içine ZrO_2 katkısı numunelerin sertlik değerlerinde katkısız numuneye göre kısmi düşmelere sebep olduğu görülmüştür. Akıncı ve ark. yaptığı çalışmada ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ZrO_2 katkılı numuneler üretilmiş ve Shore D sertlik değerleri 79-82 arasında gözlemlenmiştir. ZrO_2 katkı oranı arttıkça numunelerin sertlik değerinde kısmi bir artış gözlemlenmiştir [26]. Bu çalışmadaki Shore D sertlik sonuçları ile literatürdeki sertlik sonuçlarının yakın olduğu görülmüştür. Literatürde ZrO_2 katkısı sertlik değerinde kısmi bir artış sağlarken, bu çalışmada kısmi bir düşmeye neden olmuştur. Bunun nedeni, literatürdeki çalışmada kullanılan toz boyutu 1µm'nin altındayken, bu çalışmada 5 µm'nin altındadır. Zirkonyum dioksitin küçük toz boyutunda katkılanması numune sertliğinde artış sağlarken, büyük toz boyutunda katkılanması kısmi düşmeye neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Katkısız ve ZrO_2 katkılı reçinelerin Shore D sertlik değerleri (Shore D hardness values of undoped and ZrO_2 doped resins)

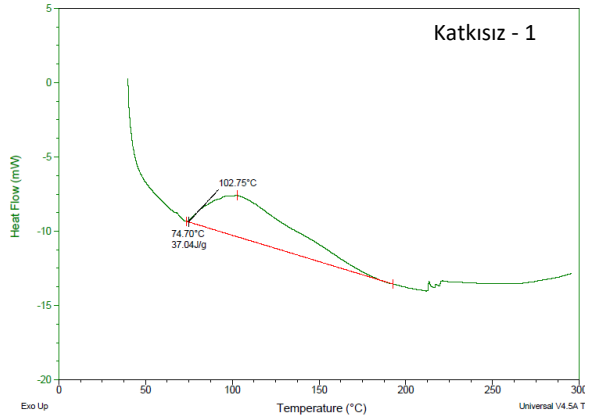


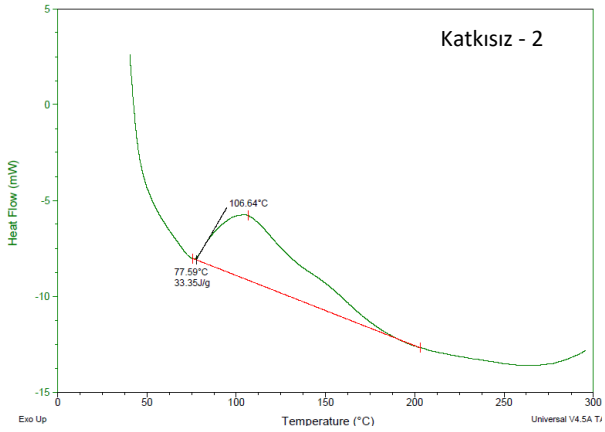
Şekil 5. %0.5 ZrO_2 katkılı numunelerin fotoğrafları a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C, d) 86°C (Photos of ZrO_2 doped samples)

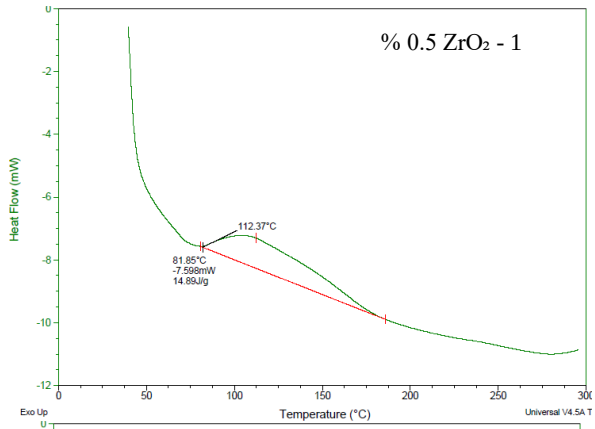
Reçinenin kürleme sıcaklığının artması, ZrO_2 partiküllerinin dibe çökme oranında azalma sağlarken, numune yüzeylerinde hasar oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması kürleme süresini kısalttığı için parçacıkların reçine içinde dibe çökmeden kürlenmesini sağlamıştır. Dibe çökme oranları ve sıcaklığın etkisiyle bozulmalar Şekil 5'te gösterilmiştir.

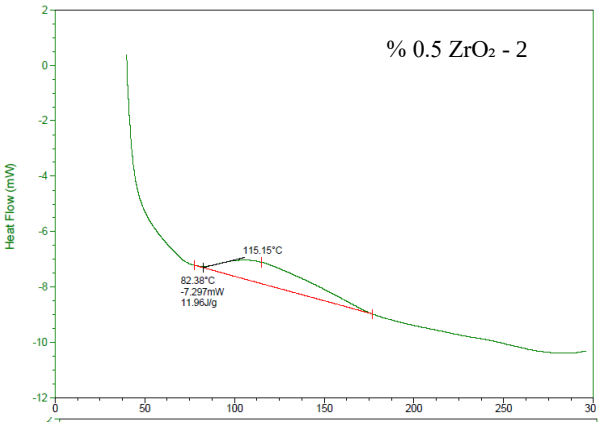
3.2. ZrO_2 Katkılı Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Analizi (Analysis of ZrO_2 Doped Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites)

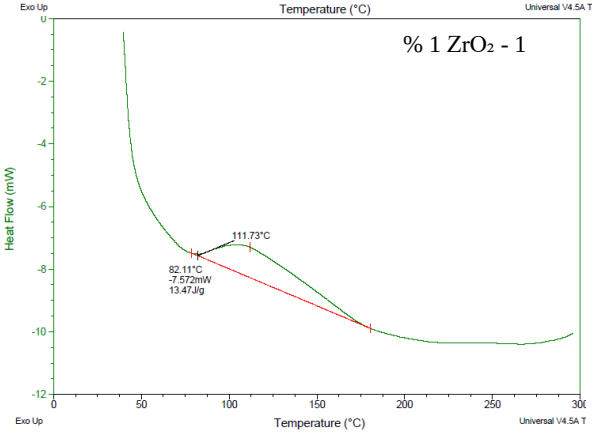
DSC testi ile polimerleşme sıcaklıkları ve polimerleşme entalpi değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 6'daki DSC grafiklerinde görülmektedir. Üretilen tüm kompozitlerde polimerleşme sıcaklık değerleri 102°C-113°C arasında değişmektedir. En düşük polimerleşme sıcaklığı 102.75°C ile katkısız kompozitte görülmüştür. Polimerleşme sıcaklığı, termoset polimerlerdeki çapraz bağların oluşum sıcaklığını vermektedir [27]. Dolayısıyla epoksi reçine içine ZrO_2 katkılanmasının çapraz bağların oluşum sıcaklığını kısmi oranda artırdığını göstermektedir. Ortalaması alınmış olan polimerleşme sıcaklıkları Şekil 7'de verilmiştir. ZrO_2 katkılanmış kompozitlerin polimerleşme entalpisi (ΔHp) katkısız numuneden düşük elde edilmiştir. En yüksek ΔHp değerine 32.20 j/g ile katkısız kompozitte ulaşılmıştır. Ortalaması alınmış ΔHp değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Dorigato ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine nano boyutta ZrO_2 katkısı ile çapraz bağ yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir [28]. Bu çalışmada da literatürdeki çalışma ile benzer olarak ZrO_2 katkısının termoset polimerlerdeki çapraz bağlara etki ettiği ve çapraz bağ yoğunluğunda azalmaya neden olduğu değerlendirilmiştir. Oluşan çapraz bağ ve açığa çıkan enerji doğru orantılı olduğu için çapraz bağ yoğunluğu azaldıkça ΔHp değerlerinin de azaldığı görülmüştür.

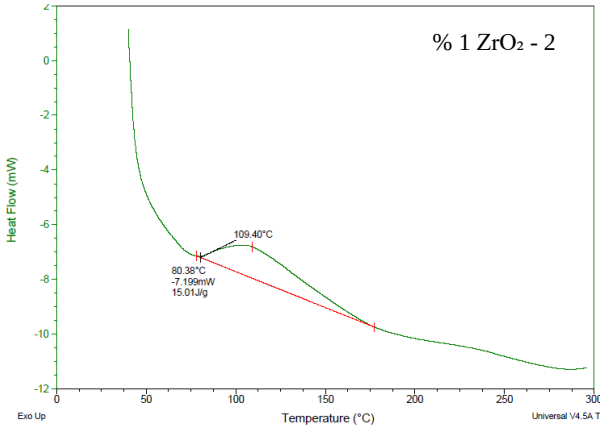

Katkısız - 1
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
102.75°C
74.70°C
37.04J/g

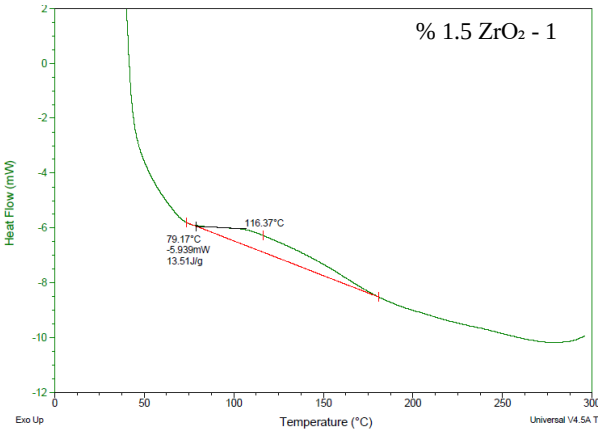

Katkısız - 2
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
106.64°C
77.59°C
33.35J/g

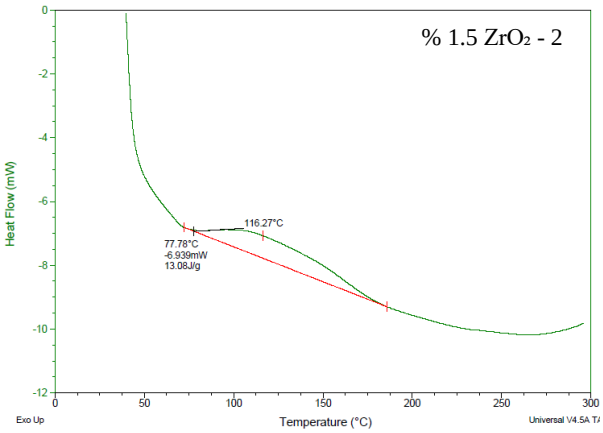

% 0.5 ZrO₂ - 1
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
112.37°C
81.85°C
-7.598mW
14.89J/g

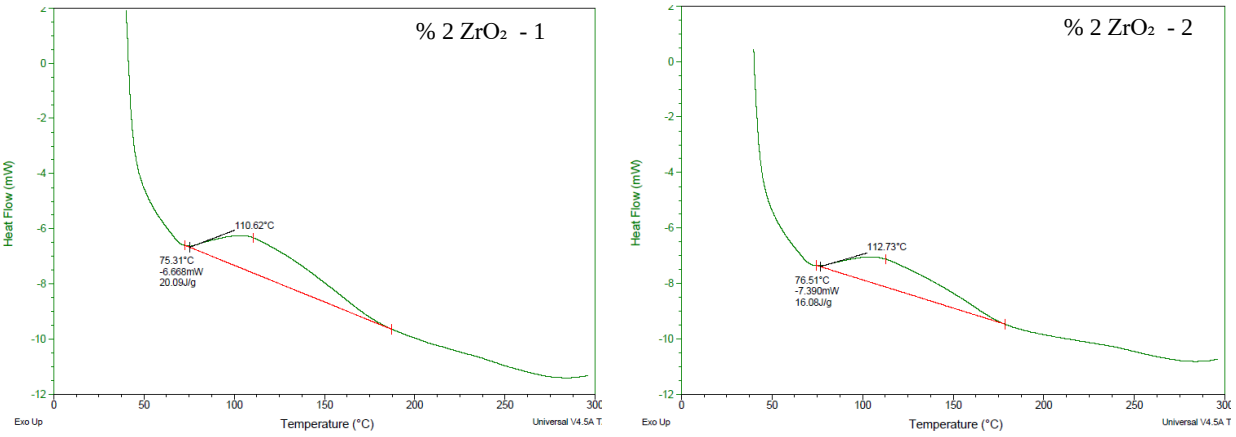

% 0.5 ZrO₂ - 2
Heat Flow (mW)
115.15°C
82.38°C
-7.297mW
11.96J/g


% 1 ZrO₂ - 1
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
111.73°C
82.11°C
-7.572mW
13.47J/g

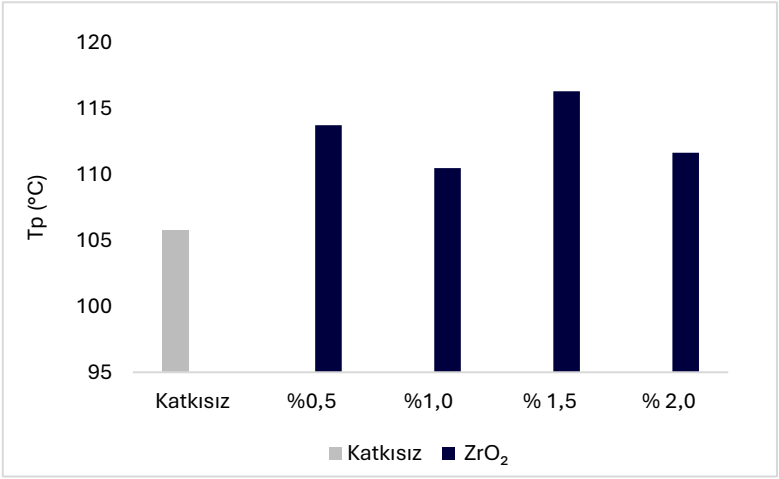

% 1 ZrO₂ - 2
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
109.40°C
80.38°C
-7.199mW
15.01J/g


% 1.5 ZrO₂ - 1
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
116.37°C
79.17°C
-5.939mW
13.51J/g

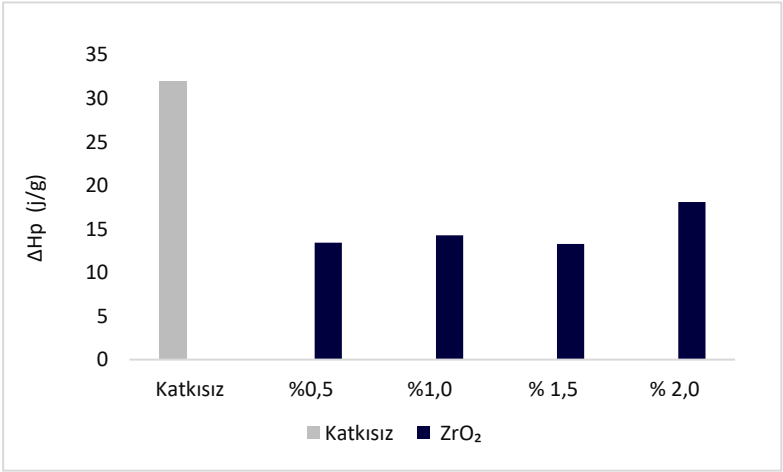

% 1.5 ZrO₂ - 2
Heat Flow (mW)
Temperature (°C)
Exo Up
116.27°C
77.78°C
-6.939mW
13.08J/g



Şekil 6. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin DSC grafikleri (DSC graphs of undoped and ZrO_2 doped composites)



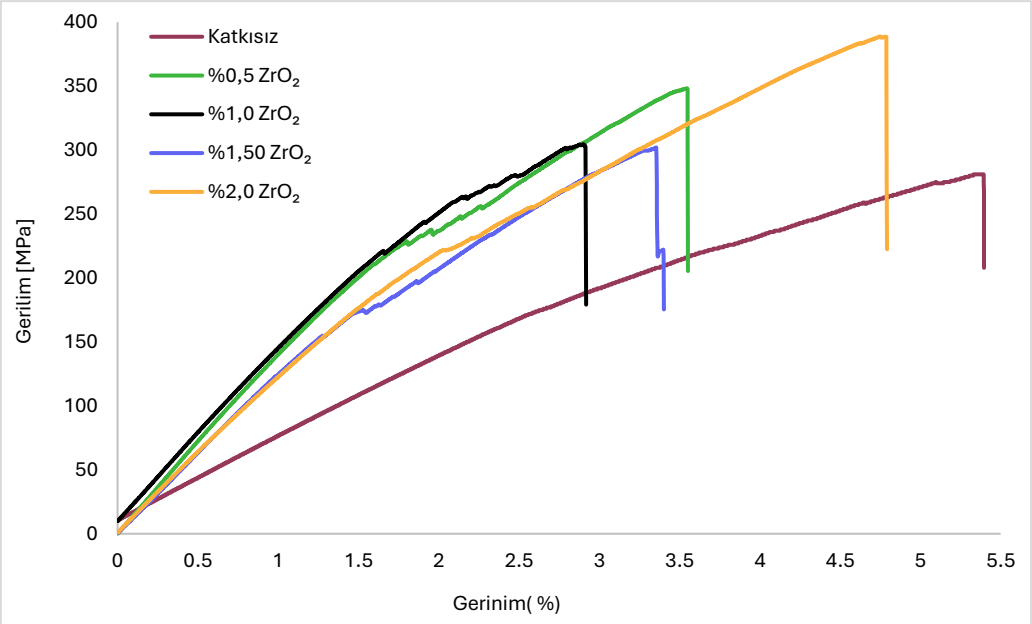
Şekil 7. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklıkları (Polymerization temperatures of undoped and ZrO_2 doped composites)



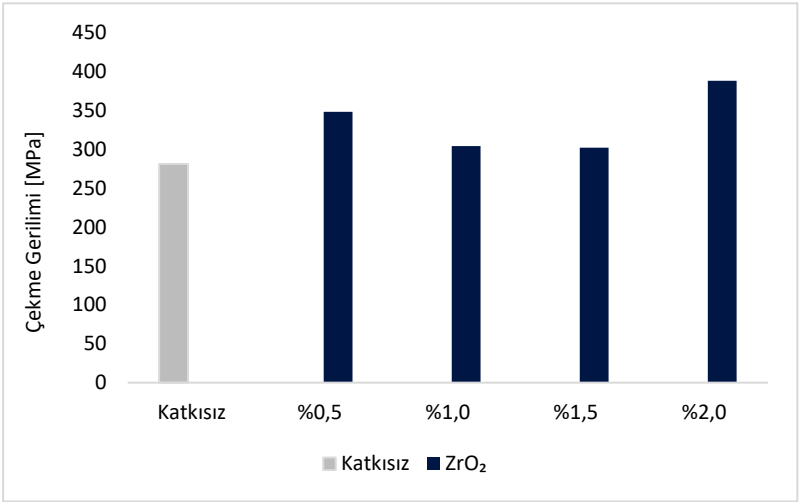
Şekil 8. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpisi (Polymerization enthalpy of undoped and ZrO_2 doped composites)

Çekme testinde gerilim-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 9'da gerilim-gerinim grafiği görülmektedir. En yüksek çekme gerilimi 388 MPa ile %2 ZrO_2 katkılanmış numunede gözlemlenirken, en düşük 281 MPa ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Şekil 10' da çekme gerilim değerleri verilmiştir. ZrO_2 katkılı tüm numunelerdeki çekme gerilim değerlerinin, katkısız numuneden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Rahmah'ın yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine nano boyutta ZrO_2 katkısının katkısız kompozite

göre çekme gerilim değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. %4, %6 ve %8 oranlarında katkılanan ZrO_2 katkı oranı arttıkça çekme gerilim değerleri de aşamalı olarak arttığı gözlemlenmiştir [29]. Elyaf-matris arayüzey bağı ne kadar iyiyse gerilim matristen elyafa daha iyi aktarılır [30]. Bu çalışmada, ZrO_2 katkı maddesi gerilimin elyaflara daha iyi aktarılmasını sağlamış ve bu yüzden kompozitlerdeki çekme gerilim değerlerinin arttığı görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalar da bunu desteklemektedir.



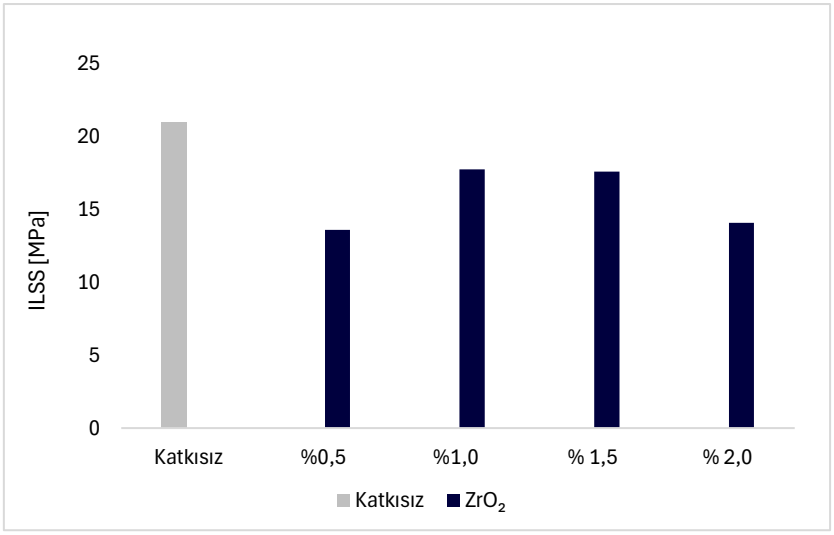
Şekil 9. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin gerilim- gerinim grafiği (Stress-strain graph of undoped and ZrO_2 doped composites)



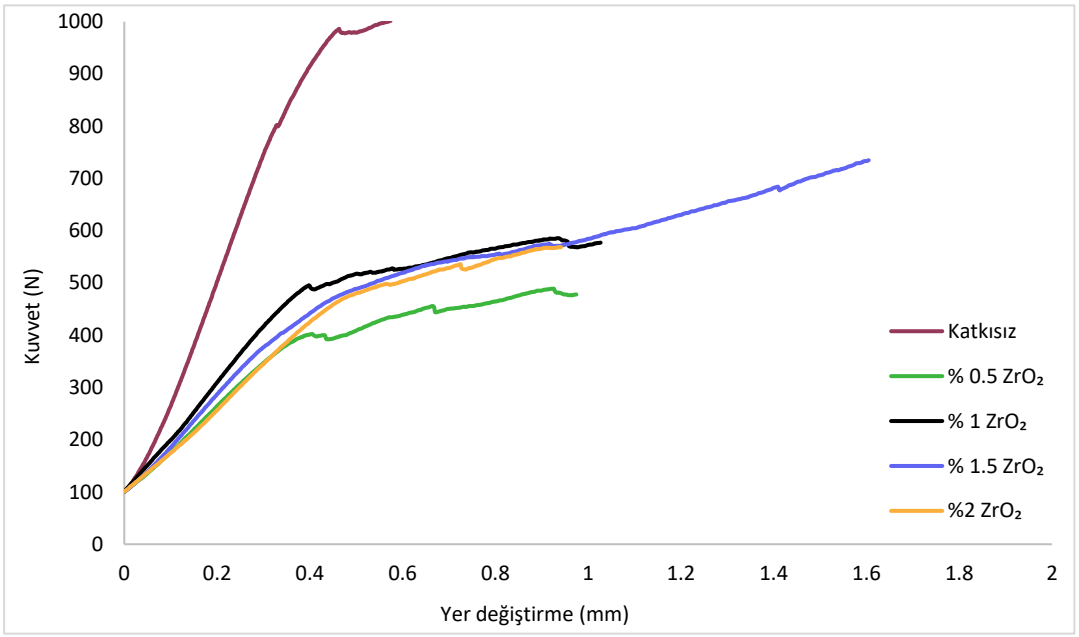
Şekil 10. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri (Tensile stress values of undoped and ZrO_2 doped composites)

Tabakalar arası kesme mukavemet (ILSS) değerleri eğme testi ile elde edilmiş ve elde edilen ILSS değerleri Şekil 11'de verilmiştir. En yüksek ILSS 21 MPa değeri ile katkısız numunede görülürken, katkılanmış tüm numunelerdeki ILSS değerlerinin, katkısız numuneden düşük olduğu görülmüştür. Bu sebeple epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının polimer kompozitlerdeki tabakalar arası kesme mukavemetini düşürdüğü tespit edilmiştir. Şekil 12'de kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Toorchi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %1, %2 ve %3 oranlarında ZrO_2 katkılanarak üretilmiş kompozitlerdeki ILSS değerlerinin katkısız kompozitten yüksek olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek ILSS değerine %2 ZrO_2 katkılanmış kompozitte ulaşılmış, %2'den

sonra ZrO_2 oranı arttığında ILSS değerinde düşme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni artan ZrO_2 oranı ile aglomerasyonun artması ve elyaf-matris arayüzey bağını zayıflatmasıdır [31]. ILSS değerleri elyaf ve matris arasındaki yapışkanlık derecesini göstermektedir [32]. Bu çalışmada ZrO_2 katkısı elyaf matris arayüzey bağına etki ederek ILSS değerlerinde düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmadan farklı sonuçlar elde edilmesinin nedeni farklı toz boyutları kullanılması olarak değerlendirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmada nano boyutta ZrO_2 kullanılırken, bu çalışmada mikro boyutta ZrO_2 kullanılmıştır. Nano boyuttaki tozlar arayüzey bağını artırırken mikro boyuttaki tozlar arayüzey bağının düşmesine neden olmuştur.



Şekil 11. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin ILSS değerleri (ILSS values of undoped and ZrO_2 doped composites)



Şekil 12. Katkısız ve ZrO_2 katkılı kompozitlerin kuvvet- yer değiştirme grafiği (Force-displacement graph of undoped and ZrO_2 doped composites)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, reçine içine farklı oranlarda ZrO_2 katkısının üretilen reçine numuneleri ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının hacimsel artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek hacimsel artış oranı %32 ile %2 ZrO_2 katkılı numunede gözlemlenirken, en düşük oran %4.5 ile katkısız numunede gözlemlenmiştir.
- Shore D sertlik ölçümlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 85 Shore D ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Epoksi reçine içine ZrO_2 katkılanması numunelerin sertlik değerlerinde kısmi düşmelere sebep olduğu görülmüştür.
- Reçinenin kürleme sıcaklığının artması, ZrO_2 partiküllerinin dibe çökme oranında azalma sağlarken, numune yüzeylerinde hasar oluşumuna neden olduğu görülmüştür.
- En yüksek polimerleşme entalpi değerine 32.20 j/g ile katkısız kompozitte ulaşılmıştır. ZrO_2 katkısının polimerleşme entalpisini düşürdüğü tespit edilmiştir.
- En yüksek çekme gerilimi 388 MPa ile %2 ZrO_2 katkılı numunede elde edilirken, en düşük 281 MPa ile katkısız numunede elde edilmiştir. Epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının polimer kompozitlerdeki çekme gerilimini arttırdığı tespit edilmiştir.
- En yüksek ILSS değeri 21 MPa ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Katkılı tüm numunelerdeki ILSS değerlerinin, katkısız numuneden düşük olduğu bu sebeple epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının polimer kompozitlerdeki tabakalar arası kesme mukavemetini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ZrO_2 katkı oranı %0.5'ten %2'ye kadar kullanılmıştır. Katkı oranı %1.5'tan %2'ye çıkarıldığında ILSS değerinde ciddi bir düşme görülmüştür. Artan katkı oranı ile aglomerasyonun arttığı ve ara yüzey bağını zayıflattığı şeklinde değerlendirilmiştir. Kumar ve ark. yaptığı bir çalışmada %2, %4 ve %8 oranlarında ZrO_2 katkılı kompozitlerde mekanik ve termal özelliklerin %4'e kadar yükseldiği %4'ten sonraki katkı oranında özelliklerin düştüğünü ve bunun sebebi olarak artan katkı oranı ile matris içindeki aglomerasyonun artması olarak göstermişlerdir [33]. Li ve ark. yaptığı çalışmada %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında nano ZrO_2 katkılı kompozitlerde, %3 katkı oranında mekanik özelliklerin maksimum değere ulaştığı ve %3'ten sonraki katkı oranlarında oluşan aglomerasyon ve arayüzey bağının zayıflaması ile mekanik özelliklerin düştüğü gözlemlenmiştir [30]. Bu çalışmada olduğu gibi literatürdeki çalışmalarda da artan ZrO_2 oranı ile aglomerasyon artmış ve elyaf-matris arayüzey bağına zarar vermiştir. Bu yüzden, bu çalışmada katkı oranı %2'de bırakılmış yüksek oranlara çıkılmamıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHOR'S CONTRIBUTIONS)

Esra ÖZTÜRK: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process of the article.

Erdem MERMER: Deneylerin planlanması ve uygulanmasını sağlamış, sonuçların değerlendirilmesi, makalenin yazımı ve son düzenlemelerinde katkıda bulunmuştur.

He provided the planning and implementation of the experiments. He contributed to the evaluation of the results, writing and last editing of the article.

Hanifi ÇİNİCİ: Makaleyi gözden geçirmiştir.

He reviewed the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Fan Q, Duan H and Xing X, "A review of composite materials for enhancing support, flexibility and strength in exercise'' Alexandria Engineering Journal 94, 90–103, 2024

[2] Yöney H, "El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007

[3] Yalman M. Kadir, Atar İ, Mengeloğlu F, "Epoksi esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine sodyum hidroksit ile modifiye edilmiş farklı güçlendirici malzemelerin etkisi", Turkish Journal of Forestry, 25(3), 290-301, 2024

[4] Evirgen K. Murat, "Havacılık Sektörü için Otoklavda Üretilen Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Polimer Kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Otoklav Basıncının Etkisi'' ,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2023

[5] Anthony K, "Advanced Composite Materials for Aerospace Applications'', Journal of Engineering and Scientific Research, 3(2), 1-4, 2024

[6] Barut E, "Farklı Seramik Katkılı Polimer Matrisli Karbon Fiber Kompozit Yapıların Özelliklerinin İncelenmesi'', Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016

[7] Yeo K. B, Hamidi H. H, Choong W. H, "Self-healing efficiency study of thermoset-thermoplastic polymer material'' , Materials Science and Engineering, 1217, 2022, doi:10.1088/1757-899X/1217/1/01200

[8] Demir, M. E, Çelik Y ve Kılıçkap H. E, "Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi'', Politeknik Dergisi, 22(4), 811-817, 2019

[9] Yavaş M. O, "Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı'', Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009

[10] Sharma M, Gao S, Mader E, Sharma H , Wei L. Y and Bijwe J, "Carbon fiber surfaces and composite interphases'', Composites Science and Technology, 102, 35–50, 2014

[11] Liu L, Jia C, He J, Zhao F, Fan D, Xing L, Wang M, Wang F, Jiang Z and Yudong H, "Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites'',Composites Science and Technology, 2015 doi: 10.1016/j.compscitech.2015.08.002.

[12] Newcomb B. A, "Processing, structure, and properties of carbon fibers'' , Composites: Part A, 44552016, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018

[13] Wanga M,, Kang Q and Pan N, "Thermal conductivity enhancement of carbon fiber composites'', Applied Thermal Engineering, 29, 418–421, 2009

[14] Shirvanimoghaddam K, Hamim S.U, Akbari M. K, Fakhrhoseini S. M, Khayyam H, Pakseresht A. H, Ghasali E, Zabet M, Munir K. S, Jia S, Davim J. P, Naebe M, "Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties'' Composites: Part A 92, 70–96, 2017

[15] Yetkin S. H, Ünal H ve Hatipoğlu G, "Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması'', Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 11(3), 744-755, 2023

[16] He H, Li K, Wang J, Sun G, Li Y and Wang J, "Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites'', Materials and Design, 32, 4521–4527, 2011

[17] Taşdemir M & Ulutaş E, "Düşük Yoğunluklu Polietilenin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerine Alaşımlı Demir Tozunun Etkisi'', Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Dergisi Part C, 12(3), 628-638, 2024

[18] Li F, Hu K, Li J and Zhao B, "The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene'', Wear, 249, 877–882, 2002

[19] Zhang M. Q, Ronga M.Z, Yu S. L, Wetzel B and Friedrich K, " Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites'' Wear, 253, 1086–1093, 2002

[20] Kaner S, "Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri'', Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 12(2), 605-614, 2024

[21] Güneş A & Deniz M. E, "Yumurta Kabuğu Takviyeli Polimer Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi'', BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 10 (2), 453-468, 2021

[22] Florek P , Król M , Jele ´n P and Mozgawa W, "Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Doped with Graphene Oxide in Light of Spectroscopic Studies'', Materials, 14, 1835, 2021

[23] Ulutaş E, Eker Gümüş B ve Taşdemir M, "The Effect of Graphene on the Mechanical Properties of

High Density Polyethylene (HDPE)/Zinc Borate Polymer Composite'', Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 11(1), 133-142, 2023

[24] Güldaşı A, Altuğ M, Temel S, "Aluminyum Tozu Takviyeli Polipropilenin Viskozite Değerlerinin İncelenmesi'', Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, 4(3), 147-158 2016

[25] Kılınçel M & Yılmaz E, "Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi'', Gazi Üniversitesi Gazi University Fen Bilimleri Dergisi Part:C, 12(3), 724-733, 2024

[26] Akinci A, Sen S. and Sen S., "Friction and wear behavior of zirconium oxide reinforced PMMA composites'' Composites: Part B, 56, 42–47, 2016

[27] Speight J.G. "Monomers, Polymers, and Plastics'' Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes, 499-537, 2011

[28] Dorigato A., Pegoretti A., Bondioli F. & Messori M., Improving Epoxy Adhesives with Zirconia Nanoparticles, Composite Interfaces 17, 873–892, 2010

[29] Rahmah N. M.,Comparing the Effects of ZnO and ZrO2 Nanomaterials on the Mechanical, Chemical, and Crystalline Properties of Epoxy Resin (DGEBA), Science des Matériaux, 48, 101-107, 2024.

[30] Li J., Peng C., Li Z., Wu Z. and Liac S., The improvement in cryogenic mechanical properties of nano-ZrO2/epoxy composites via surface modification of nano-ZrO2, The Royal Society of Chemistry, 6, 61393–61401, 2016

[31] Toorchi D., Khosravi H. and Tohidlou E., Synergistic effect of nano-ZrO2/graphene oxide hybrid system on the high-velocity impact behavior and interlaminar shear strength of basalt fiber/epoxy composite, Journal of Industrial Textiles, 0(0) 1–20, 2019

[32] Nayak R. K., Mahato K. K. and Ray B.C., Water absorption behavior, mechanical and thermal properties of nano TiO2 enhanced glass fiber reinforced polymer composites, Composites: Part A , 90, 736–747, 2016

[33] Kumar K., Ghosh P K., Kumar A. and Singh O., Enhanced Thermomechanical Properties of ZrO2 Particle Reinforced Epoxy Nanocomposite, JMEPEG, 30, 145–153, 2021