



# Bor Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Termal Özelliklerine Nano Bor İlavesinin Etkileri

## The Effects of Nano Boron Addition on the Thermal Properties of Boron Fiber Reinforced Polymer Composite Materials

Ayhan Şahin<sup>1\*</sup>, Hanifi Çinici<sup>2</sup>, Erdem Mermer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Üniversiteler mah. ODTÜ yerleşkesi. Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Çankaya/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup>Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17 Tusaş Merkez Yerleşke Kahramankazan/Ankara

Başvuru/Received: 22/06/2022

Kabul / Accepted: 30/09/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

### Öz

Bu çalışmada, elyaf bor fiber takviyeli prepreglerin (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape) epoksi reçine (Hexcel RTM6) kullanılarak serim yöntemi metodu ile tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler dokuz kat tabakalı nano bor ilaveli ve nano bor ilavesiz olarak iki farklı türde hazırlanmıştır. Bir grup numunede sadece epoksi reçine kullanılırken diğer grup numunede epoksi içerisine deneme yöntemi ile (akışkanlığa bakılarak) % 0.074 oranında nano bor katılmış ve otoklavda 24 saat kürlenerek tabakalı kompozit haline getirilmiştir. Oluşturulan tabakalı kompozit malzemeler, su jeti ile kesilerek Q800 test cihazında sıcaklık rampası (Temperature Ramp) metodu kullanılarak Dinamik Mekanik analizleri ve Q20 test cihazında EN 6064 standardına göre Diferansiyel Tarama Kalorimetre analizlerine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda epoksi reçineye katılan nano bor katkı tabakalı kompozit malzemenin termal mekanik değerlerinin aynı kaldığı ve epoksi reçine içerisine ilave edilen nano bor malzemesinin, bor fiber takviyeli kompozitlerin termal özelliklerini olumsuz etkilemediği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bor fiber kompozitlere nano bor ilave edilmesinin kompozitlerin, mekanik ve radar etkenleri altında performanslarında olumsuz etkilerinin olmayacağı değerlendirilmiştir.

### Anahtar Kelimeler

*“Bor prepreg, Nano bor, Dinamik mekanik analiz, Diferansiyel tarama kalorimetre”*

### Abstract

In this study, layered composite material was produced by the method of laying method using epoxy resin (Hexcel RTM6) of fiber boron fiber reinforced prepregs (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape). The composite materials produced were prepared in two different types with the addition of nano boron with nine layers and without the addition of nano boron. While only epoxy resin was used in one group of samples, 0.074% nano boron was added to epoxy in the other group of samples by experimental method (based on fluidity) and it was cured for 24 hours in an autoclave and turned into a layered composite. The layered composite materials created were cut by water jet and subjected to Dynamic Mechanical analysis using the Temperature Ramp method in the Q800 tester and Differential Scanning Calorimeter analysis in accordance with the EN 6064 standard in the Q20 tester. As a result of participating in the tests epoxy resin nano boron-doped composite material of epoxy resin is added into the values remain the same thermo and mechanical Nano-boron, boron does not adversely affect the thermal properties of fiber reinforced composites. Therefore, it has been evaluated that adding nano boron to boron fiber composites will not have negative effects on the performance of composites under mechanical and radar factors.

### Key Words

*“Boron Prepreg, Nano Boron, Dynamic Mechanical Analysis, Differential Scanning Calorimeter”*

## 1. Giriş

Bir kompozit malzeme, önemli ölçüde farklı makroskopik davranışa sahip iki veya daha fazla farklı bileşen ve her bir bileşen arasında (mikroskopik düzeyde) ayrı bir arayüz içeren bir malzeme olarak kabul edilir (George H. Staab.,1999; M. Balasubramanian., 2014). Teknolojik olarak en önemli kompozitlerden olan fiber takviyeli kompozitlerde, son derece yüksek özgül dayanım ve modül değerleri sağlanmaktadır. Lif oryantasyonu, içeriği ve dağılımı, mukavemet ve diğer özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sürekli lifler normal olarak hizalanırken, süreksiz lifler kısmen hizalanabilir veya rastgele hizalanabilir. Fiberlerin mekanik olarak elastikiyet modülüne etkisi fazla olup, rijitliği (sertlik) önemli derecede etkiler. Matrisin görevi fiberleri bir arada tutup, gelen yükleri fiberlere iletmektir. Fiberlerin ana matrise yerleştirilmesinde ve seçim aşamasında arayüz bağlanma, oryantasyon, hacimsel yoğunluk, fiber çap önemli etkenlerdir. Fiberlerin birçok çeşidi vardır. Bunlar; cam,elyaf,seramik,karbon,bor fiberlerdir. Bor fiberler kompozitler de kullanılan ilk yüksek performanslı fiberlerdendir. Buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile ısıtılmış çekirdek (Tel, altlık) üzerine bor kaplanarak üretilir. Fiberler arasında en yüksek fiber çapına sahiptir (0.1 ile 0.2 mm ve 125 ile 140 µm). Elastikiyet modülü yaklaşık 410 Gpa, çekme direnci yaklaşık 3450 Mpa' dır. Büyük çap değerinden dolayı yüksek sertliğe neden olur. Diğer yandan bor fiber takviyeli kompozitlerde fiber çapının büyük olması yüksek elastikiyet modülüne katkıda bulunur ve mükemmel basma gerilmesi sağlar (Mark E.Tuttle, 2013; Krishan K.Chawla, 2011; E Eryıldız et al., 2015;B Kalaycıoğlu et al., 2009). Polimerler genel olarak termoplastik ve termosetler olmak üzere iki tipe ayrılır. Termoset polimerlerde kimyasal bağlar çapraz bağlandığı için tekrar sıvı formuna dönüş olmaz. Termoset polimerler için en bilinen örnekler doymamış polyester ve vinly esterlerdir. Diğer yaygın termosetler epoksi ve fenolik reçinelerdir (S.T.Peters,1998). Epoksiler,esas olarak havacılık ve hava araçlarında kullanılırlar. Polyester ve vinly esterler ise yaygın olarak otomobil, denizcilik, kimyasal ve elektrik uygulamalarında kullanılırlar. Fenolikler, döküm kalıplama bileşiklerinde, poliamid, polibenzimidazol (PBI), polyphenylquinoxaline (PPQ), yüksek sıcaklık uzay uygulamalarında (250 °C – 400 °C), ,Naylon ( Naylon 6, Naylon 6,6 ), termoplastik polyester ( PET, PPT), polycarbon (PC) gibi termoplastik polimerler, enjeksiyon kalıplarında kullanılırlar. Poliamid-imid (PAI), Polieter eter keton (PEEK), Polisülfon (PSU), Polifenilen sülfüt (PPS) , Polietilenimin (PEI), sürekli fiberlerin ortalama yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır (P.K. Mallick,2007).

Kauçuk oluşumu (Jelleşmiş) ve camsı durumları epoksi gibi amorf polimerlerin karakteristiğidir. Bazı polimerler nispeten düşük sıcaklıklarda bazıları ise yüksek sıcaklıklarda camsı hale gelir ve sonradan genelde yeniden kauçuklaşır. Normal polimerizasyon sistemi camsı durumda kalır ve tasarlanması oldukça zordur. Camsı geçiş sıcaklığı oldukça önemlidir (Alan Baker et al., 1987). Havacılık ve uzay sanayinde yaygın kullanılan epoksiler en temel termoset matris malzemelerinden biridir. İstenilen özelliklere (vizkozite kontrolü, esneklik, ultraviyole koruma, kürlenme için vb.) göre farklı tipte epoksi reçineleri farklı katkı maddeleriyle katkılanılarak üretilirler. Epoksi reçineler polyesterler göre daha pahalıdır ancak daha iyi nem direncine, kürlenme sırasında daha düşük çekmelere (~ % 3) daha yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanım özelliklerine sahiptir. Kompozitlerin geliştirilmesinde ve çeşitli durumlar için matris malzeme olarak oldukça yoğun kullanılır (Suong V. Hoa, 2009). Havacılık-Uzay sektöründe Termoset, termoplastik, seramik matrisli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Michael Chun et al., 1992). Fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikleri etkileyen önemli faktörlerden bir tanesi de fiber yönleridir (P.K. Mallick,2007). Basma, çekme, kesme, dinamik mekanik analiz (DMA), diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) testleri fiber takviyeli kompozitlerin karakterizasyonu için genel olarak uygulanan testlerdir. Bunlar arasında termal analiz yapılarak mekanik özellikleri ile ilgili değerlendirme yapılabilecek analiz yöntemleri DMA ve DSC analizleridir. Dinamik mekanik analiz, zamanın bir fonksiyonu olarak numuneye uygulanan gerilme veya gerinimdeki değişiklik nedeniyle oluşan gerilme veya gerinme açısından numunelerin kinetik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. Dinamik mekanik analiz, numuneye sabit gerilme veya gerinme uygulanarak zamanın bir fonksiyonu olarak gerilme veya gerinimdeki değişim açısından viskoelastik özelliklerin değerlendirilmesiyle tanımlanır. Mekanik özellikleri zamanın bir fonksiyonu olarak ölçmek için de kullanılabilir (Mukesh Kumar Singh et al., 2022). Dinamik mekanik analiz (DMA) esasen bir gerilme veya gerinme modülasyonlu termo mekanik analiz (TMA) dir. Polimerlerin ve liflerin mekanik özelliklerini belirlemek ve cam geçiş sıcaklığını ve diğer ikinci dereceden geçişleri ( $\alpha$ ,  $\beta$ , vb.) ölçmek için yaygın olarak kullanılır (Michael et al., 2020). DSC ise kalorimetri, kalori ve ölçüm kombinasyonundan elde edilir. Termal analiz, malzemeye giden ve gelen ısı akışını ölçerek bir malzemedeki enerji değişikliklerini incelemek için kullanılır. Kalorimetri, tipik bir ilgi süreciyle bağlantılı entalpinin doğrudan tahminini yapmak için kullanılan temel bir tekniktir. Başka bir deyişle, cihaz, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numune malzeme geçişlerine bağlı sıcaklık ve ısı akışını düzenleyen bir termal analiz cihazıdır. Bir sıcaklık değişimi sırasında DSC, numune ile referans arasındaki sıcaklık farkına dayanarak numune tarafından yayılan veya emilen bir ısı miktarını ölçer (Mukesh et al., 2022). Bu çalışmada, Havacılık-Uzay sektöründe oldukça yaygın kullanılan fiber takviyeli polimer prepregerlerden üretilen tabakalı kompozit yapılarda ana matris olan polimer malzemeye tek yönlü bor fiber ile birlikte nano partikül bor katılarak hibrid takviyeli kompozit malzeme üretilmiş ve üretilen hibrit takviyeli kompozitlerin termal analiz yöntemi ile karakterizasyon yapılarak kompozit sektöründe yeni bir bakış açısı kazandırılmak istenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 2 farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Üretim sonrasında bu kompozitlerin bazı özellikleri analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır. Üretim sırasında kullanılan malzemeler ile ilgili veriler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Üretimde Kullanılan Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Basma Mukavemeti (Mpa)	Kesme Dayanımı(Mpa)
<b>Bor Fiber Prepreg</b> (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape)	2	1590	2930	110
<b>Nano Bor</b>	2.84	261	2583	180
<b>Kürlenmiş Reçine(RTM6)</b>	1.14	90	320	115

Çalışmada kullanılan bor fiber prepreg malzemesi (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape) kullanılmış, Reçine olarak HexFlow RTM6 epoxy kullanılmış, gerekli yerde reçineye nano bor eklenerek serim yöntemi ve otoklav kürlenme yaparak üretilmiştir.

Kompozit malzemenin elde edilmesi için ilk olarak ihtiyaç duyulan, soğutucudan çıkartılan reçinenin miktarı hesaplanmış ( Resim 1) oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra aynı reçineler oda sıcaklığında kuru bir ortamda katkılı-katkısız olarak Resim 2’de görüldüğü gibi 2 farklı türde üretilmiştir. Katkılı denemede 4 g epoksi reçineye 0.030 g nano bor eklenmiş, topaklanmayı engelleyecek şekilde homojen olarak karıştırılmıştır.

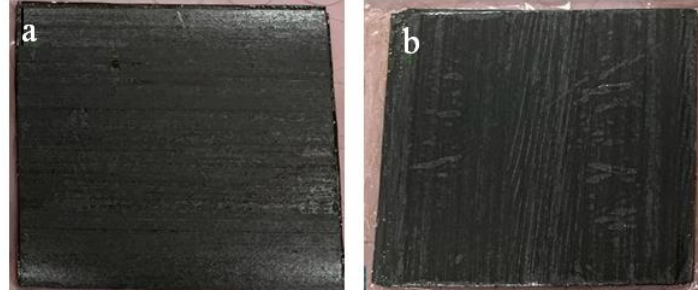


**Resim 1.** HexFlow® RTM6 Epoxy reçine



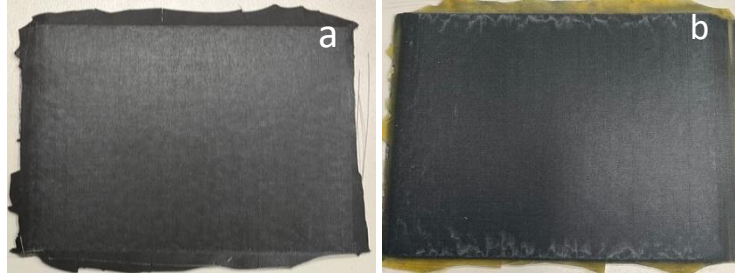
**Resim 2.** Üretimde kullanılan reçineler; a) Nano bor katkılı epoksi reçine b) Katkısız epoksi reçine

Kompozit malzemenin elde edilmesi için reçine hazırlandıktan sonra tek yönlü bor fiber prepreg aynı odada 9 kat olacak şekilde ve test numuneleri dikkate alınarak hacim miktarı hesaplanmış ve serim yöntemi ile otoklava hazır hale getirilmiştir. ( Resim 3. )



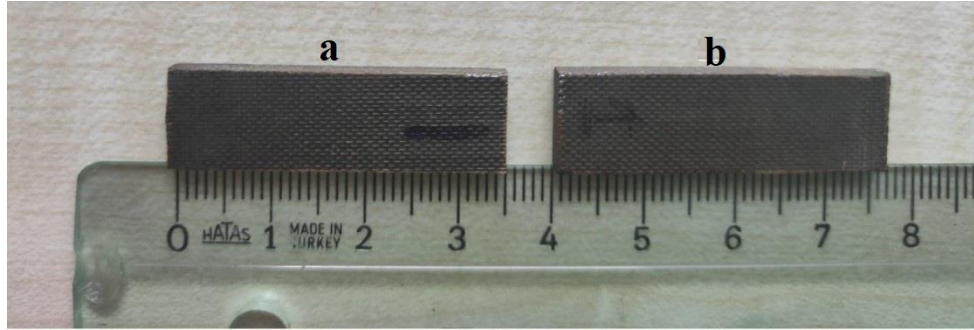
**Resim 3.** Otoklava hazır tabakalı kompozit malzemeler. a) Nano bor katkılı b) Nano bor katkısız

Resim 3'te verilen ve otoklava hazır halde üretilen kompozit malzemeler, 80 °C ön sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra 180 °C sıcaklıkta 15 mbar vakum altında 3 saat kürlenmesi için bekletilmiştir.( Resim 4.)



**Resim 4.** Son ürün tabakalı kompozit malzemeler; a) Nano bor katkılı tabakalı kompozit malzeme b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme.

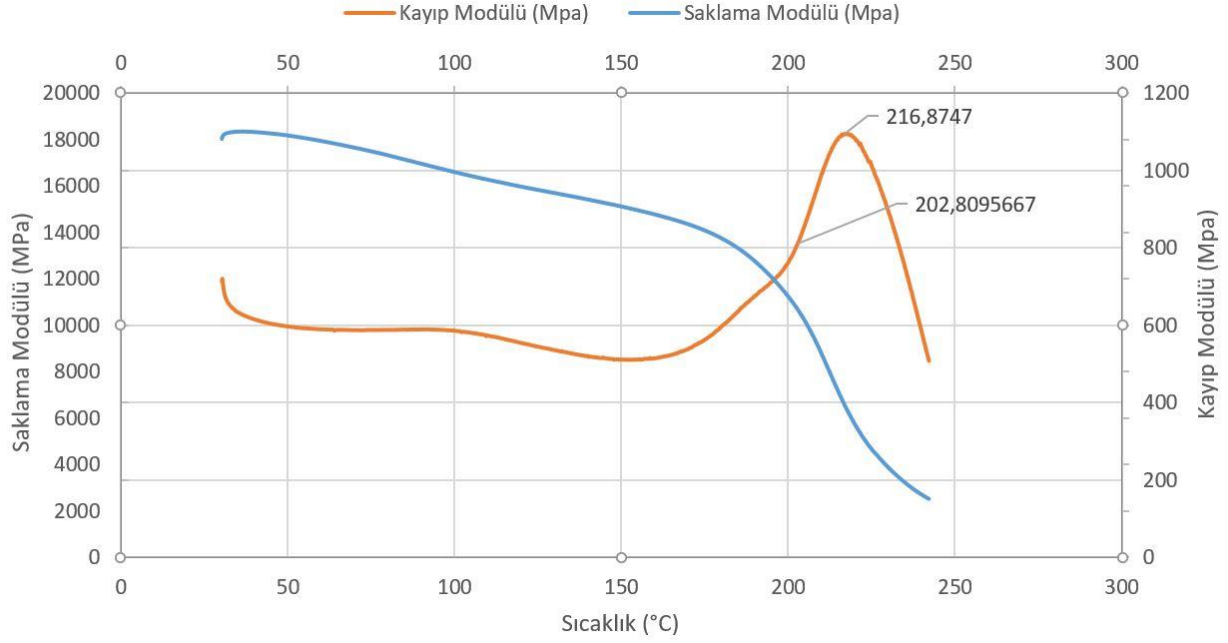
Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemeler fırından çıktıktan sonra çeşitli analizler için üç adet olmak üzere DMA için; 35x10.55x3.35 mm ölçülerinde, DSC içinse 5x5x3.35 mm ölçülerinde kesme tezgâhında elmas uçlu testere ile kesilmiştir. (Resim 5.)



**Resim 5.** Tabakalı kompozit malzeme ölçülü test numuneleri; a) Nano bor katkısız tabakalı kompozit malzeme test numunesi b). Nano bor katkılı tabakalı kompozit malzeme test numunesi

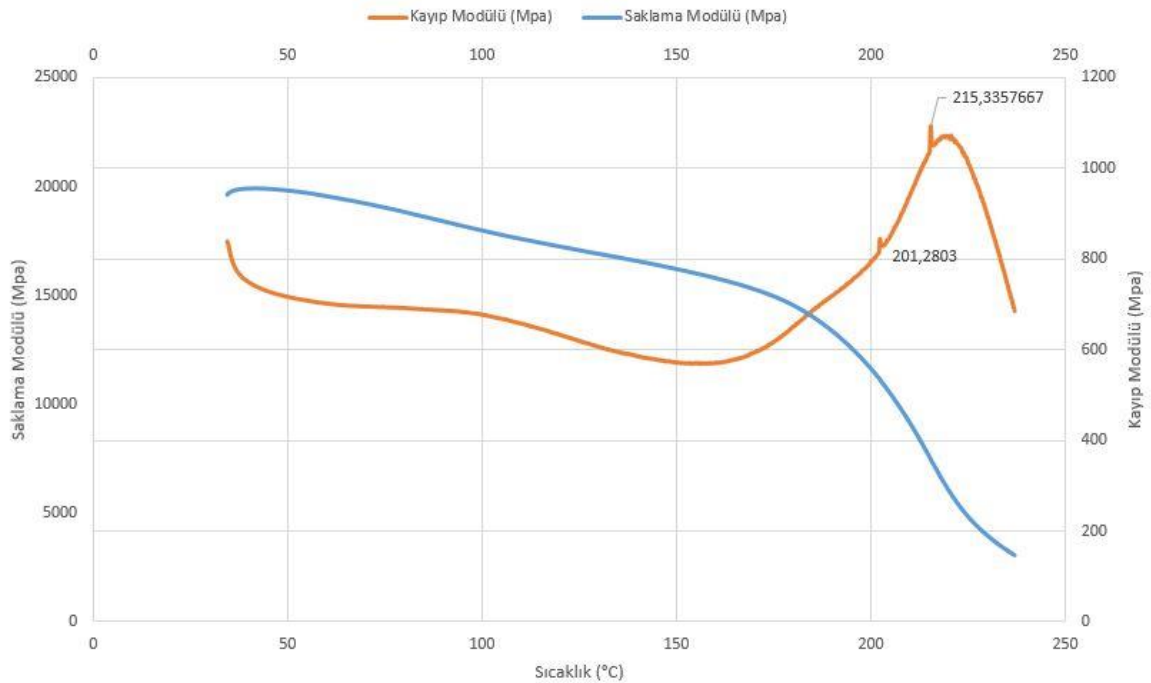
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bor fiber takviyeli polimer prepreglerden reçine, nano bor katkılı ve katkısız olarak iki farklı türde üretilen tabakalı kompozit malzemelere yapılan DMA ve DSC testi sonuçları birbiriyle mukayese edilerek incelenmiştir. DMA test sonuçları; Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te, DSC test sonuçları ise sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 'da gösterilmiştir.



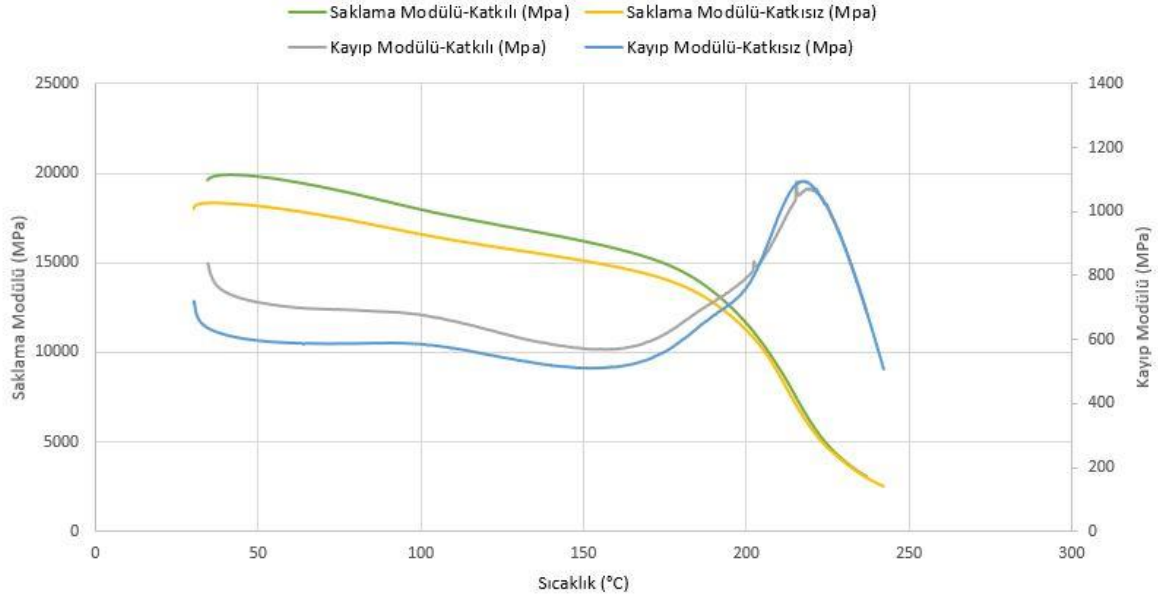
Şekil 1. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında camı geçiş sıcaklığı (Tg) başlangıç yaklaşık 202 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 216 °C olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 1)



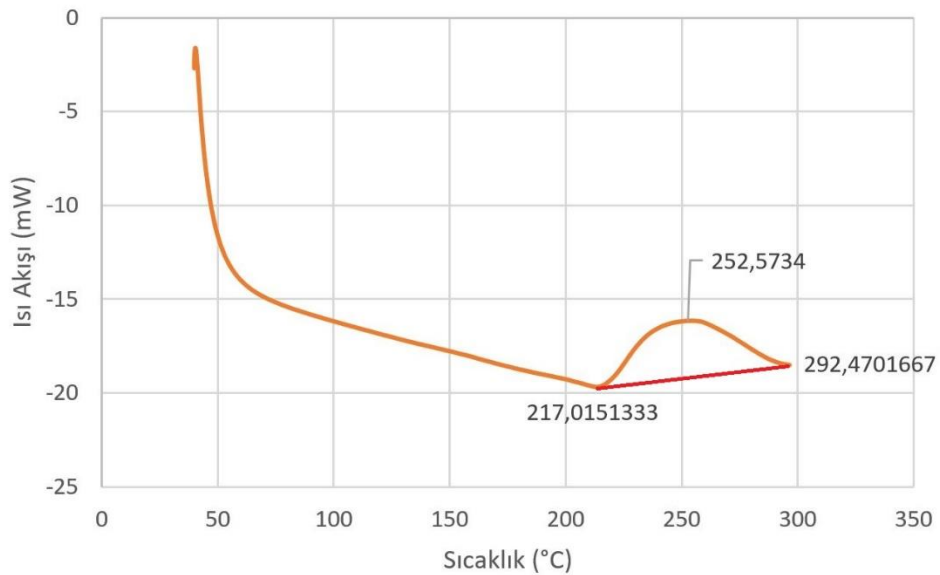
Şekil 2. Nano bor takviyeli Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

Nano bor katkılı üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında Tg başlangıç yaklaşık 201 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 215 °C olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 2)



**Şekil 3.** Nano bor takviyeli ve katkısız Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

Polimer dışı bir malzemede elastik deformasyon, uygulanan yük ile doğru orantılı ve gecikmesizin olur fakat polimer malzemelerde deformasyon doğrusal değildir ve bu malzemeler viskoelastik davranış gösterirler (Y. El Archi et al. , 2022). Polimer malzemeler camısı geçiş sıcaklığının üstünde plastik davranış gösterirler. Sonuçlarda katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde camısı geçiş sıcaklıkları görülmektedir. Karşılaştırma grafiklerine bakıldığında nano bor katkılı ve katkısız kompozit malzemelerde camısı geçiş sıcaklığı (Tg) başlangıç ve camısı geçiş sıcaklığı (Tg) kayıp başlangıç değerleri arasında 1-2 °C arasında fark olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3)

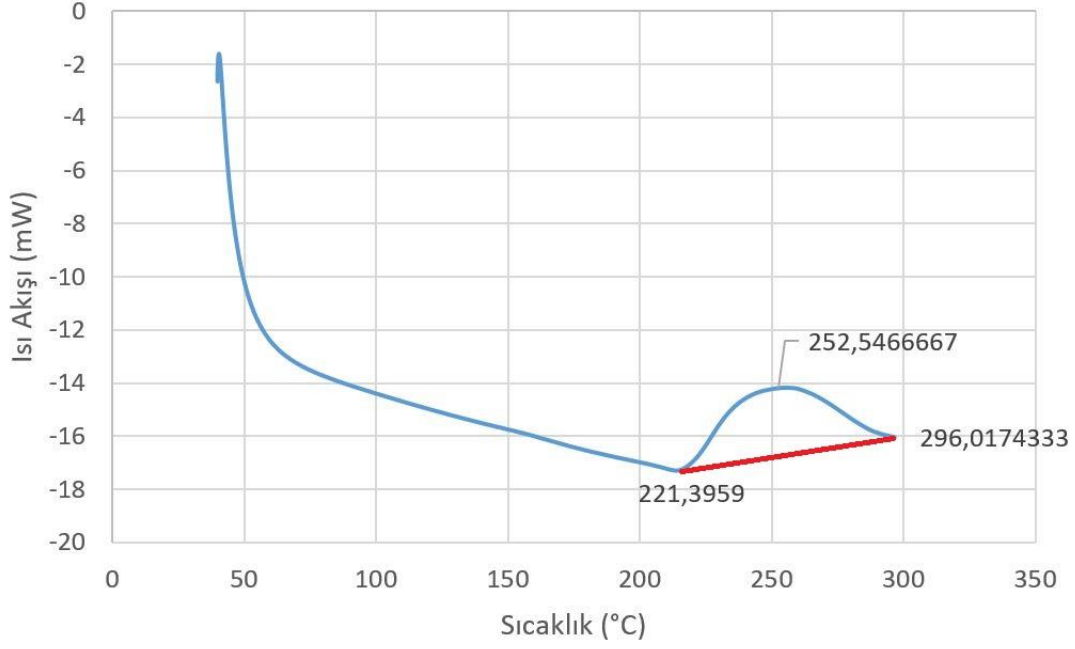


**Şekil 4.** Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.



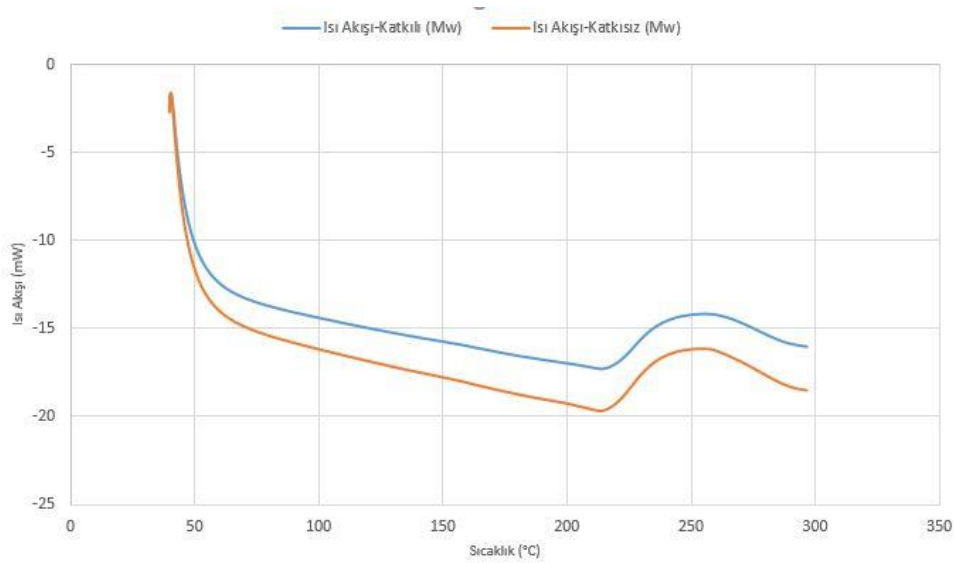
Grafikte camsı geçişi sıcaklığı sonu sıcaklığı (217,015133°C), kompleks zirve sıcaklığı (256,4781333 °C) ve kompleks sonu sıcaklığı (292,4701667 °C) arasındaki bölgenin alanı, öz ısı değerini vermektedir. Camsı geçiş sonu sıcaklığı ile kompleks sonu sıcaklığı çizgisi dikeyde yapmış olduğu açı miktarı ise, kürlenme oranını vermektedir (Joseph D.Menczel et al., 2020).

Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında, öz ısı değeri alan miktarı olan 9.667 J/g kürlenme oranı, kürlenme eğim derecesi olan %88.82 olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 4)



Şekil 5. Nano bor katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Nano bor katkılı tabakalı bor fiber takviyeli üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında, öz ısı değeri 9.241 J/g kürlenme değeri ise %89.13 olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 5)



Şekil 6. Nano bor katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi veya DSC, bir malzemenin ısı kapasitesinin ( $C_p$ ) sıcaklığa göre nasıl değiştiğini gösteren termal bir analiz tekniğidir. Bu teknikte bilinen kütlelerin bir örneği ısıtılarak veya soğutulurken ısı kapasitesindeki değişiklikler ısı akışındaki değişiklikler olarak izlenir. Böylece; eriyikler, cam geçişleri, faz değişimleri ve kürlenme gibi geçişlerin algılanmasını sağlar (Joanna Drzezdzon et al., 2018). Sonuçlarda nano bor katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde ısı akışı-Sıcaklık grafiği bakıldığında öz ısı ve kürlenme oranlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir ( Şekil 6 ).

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, tek yönlü bor fiber takviyeli polimer prepreglerden el yatırma yöntemi ile üretilen prepregler arası reçine olarak RTM6 epoksi ve RTM6 epoksiye partikül nano bor katılarak iki farklı tür tabakalı kompozit malzeme üretilmiş bu farklı malzemeler DMA ve DSC testleri karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan, DMA ve DSC testleri sonucunda üç test numunesinin matris malzemenin polimer olmasından dolayı viskoelastik davranış sergilediği ve üçü arasında DMA testlerinde camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değerlerinin 201.34°C, 203.11°C ve 199.58°C olduğu, DSC testlerinde kompleks zirve değeri 251.33°C, 251.04 °C, ve 250.66°C gözlemlenmiştir. Burada camsı geçiş sıcaklık başlangıç değerleri ve kompleks zirve sıcaklıklarının yakın olması üretimin stabil olduğu ve numunelerin uygun olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- Nano bor katkılı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan DMA testleri sonucunda camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değeri 200.06°C, 199.31°C ve 202.76°C olduğu DSC Testlerinde kompleks zirve değeri 250.38°C, 254.54 °C, ve 250.07°C gözlemlenmiştir. Burada değerlerin yakın olması numune üretimini doğrulamaktadır.
- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede ile tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksiye partikül nano bor katılan tabakalı kompozit malzemeye yapılan DMA ve DSC testleri sonucu karşılaştırıldığında camsı geçiş sıcaklığı başlangıç-kayıp modül, öz ısı, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme değerlerinin grafiklere bakıldığında yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Ana matris malzemeye katılan nano bor partiküllerinin epoksi ile arayüz bağlantılarının grafik değerlerinde fark olmamasından dolayı uygun olduğu anlaşılmıştır.
- Sonuç olarak, bu çalışmada epoksi içerisine nano bor ilave edilmesinin malzemelerin termal durumunun ve mekanik değerlerinin olumsuz yönde etkilemediği ve diğer performansların ortaya konulması konusunda yapılacak çalışmalarda kullanılma potansiyelinin olduğu ortaya çıkmıştır.

#### Referanslar

- Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. Composite Materials for Aircraft Structures (Second Edition), USA, AIAA Education Series,(1987), 55-67.
- Barış Kalaycıoğlu ve M. Hüsni Dirikolu (2009), Diksiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Yüksek Basınç Tankı Tasarımı
- Erdem Eryıldız, Ayşegül Akdoğan Eker (2015), Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları
- George H. Staab. Laminar Composites ,USA, Butterworth-Heinemann (1999), 1-20.
- Joanna Drzezdzon,Dagmara Jacewicz,Alicja Sielicka&Lech Chmurzynski (2018). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques.
- Joseph D.Menczel, William S.Kohl. (2020). Differential scanning calorimetry (DSC) in fiber research. Thermal Analysis of Textiles and Fibers,17-69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100572-9.00003-3>
- Krishan K. Chawla., Composite Materials (Third Edition) ,USA ,Springer, (2011) 7-51.
- Mark E. Tuttle. Structural Analysis of Polymeric Composite Materials (Second Edition), USA, CRC Press, (2013),16-21.
- M. Balasubramanian. Composite Materials and Processing ,USA, CRC Press (2014), 12-30.
- Michael Chun-Yung Niu . Composite Airframe Structures,Hong Kong, Conmilit Press (1992), 41-82.
- Michael Jaffe, Joseph D. Menczel. Thermal Analysis of Textiles and Fibers ,USA, WoodHead Pupliching(WP), (2020), 1-95.
- Mukesh Kumar Singh, Annika Singh. Characterization of Polymers and Fibers, USA, WoodHead Pupliching(WP), (2022),623.



P.K. Mallick. Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design (Third Edition), USA, CRC Press,(2007), 51-76.

S. T. Peters, Handbook of Composites (Second Edition), USA ,Chapman@Hall, (1998).

Suong V. Hoa. Principles of the Manufacturing of Composite Materials, Canada, DEStech Publications, (2009),45-97.

Y. El Archi ,N. Lahellec, S. Lejeunes, A. Jouan & B. Tranquart. (2022). Multiscale simulation and experimental analysis of damping in CFRP structures containing rubber.