

Balistik Zırh Uygulamaları İçin Al_3Ti ve TiB_2 Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Katman İçeren Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Muhammed Soner BAŞER^{1*}, Ömer SAVAŞ¹

¹Gemi Makinaları ve Gemi İnşaatı ABD / Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, YTU, Türkiye

*muhammedsonerbaser@gmail.com

(Received: 28 May 2025, Accepted: 04 June 2025)

(5th International Conference on Contemporary Academic Research ICCAR 2025, May 30-31, 2025)

ATIF/REFERENCE: Başer, M. S. & Savaş, Ö. (2025). Balistik Zırh Uygulamaları İçin Al_3Ti ve TiB_2 Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Katman İçeren Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(6), 1-8.

Özet – Bu çalışmada, savurma ve sedimantasyon döküm teknikleri kullanılarak tabakalı balistik malzeme üretimi amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak alüminyum, takviye elemanları olarak ise Al_3Ti ve TiB_2 partikülleri tercih edilmiştir. Bu partiküller, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini artırmaları nedeniyle seçilmiştir.

İlk aşamada, savurma döküm yöntemiyle Al_3Ti partikülleri içeren katmanlı bir yapı elde edilmiştir. Sonrasında, Al-Ti master alaşımına 1200 °C’de bor ilavesiyle TiB_2 partikülleri sentezlenmiş ve bu partiküller hem savurma hem de sedimantasyon tekniğiyle TiB_2 katmanına sahip balistik malzemeler üretilmiştir.

Üretilen numunelerin karakterizasyonu kapsamında, mikro yapı incelemeleri için optik mikroskop analizleri gerçekleştirilmiş; partikül dağılımı ve katman yapısı detaylı şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine dayalı yöntemle belirlenmiş; sertlik özellikleri ise Brinell testi ile değerlendirilmiştir.

Çalışma sonuçları, hem savurma hem de sedimantasyon döküm yöntemleriyle Al_3Ti ve TiB_2 takviyeli katman içeren kompozit balistik malzemelerin üretilebildiğini göstermiştir. Özellikle TiB_2 partiküllerinin daha küçük taneli yapısı ve yüksek sertlik değeri sayesinde, Al_3Ti ’ye kıyasla daha etkili bir takviye fazı olduğu tespit edilmiştir. Döküm teknikleri karşılaştırıldığında, savurma yöntemi partiküllerin merkezkaç kuvvetiyle daha homojen dağılmasını sağladığı ve daha yüksek takviye oranı sunduğu için avantajlı görülmüş, sedimantasyon yöntemi üretim sürecinin basitliği, düşük ekipman ihtiyacı ve büyük hacimli dökümlere olan uygunluğu nedeniyle endüstriyel ölçekli üretim açısından daha uygun bulunmuştur.

Sonuç olarak, TiB_2 partiküllerinin sedimantasyon tekniği ile üretilmiş katmanlara entegre edilmesi, özellikle zırh uygulamaları için yüksek sertlik ve performans sunması nedeniyle önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen bulgular, katmanlı balistik malzeme tasarımlarında hem takviye türü hem de üretim tekniğinin optimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler – Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler, Savurma Döküm, Al_3Ti , TiB_2

I. GİRİŞ

Bu doküman Teknolojik gelişmelerle birlikte, yeni patlayıcılar ve patlayıcı bazlı mermilerin gelişmesi, hafif zırh sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. İdeal bir zırh malzemesi, yüksek seviyelerde sertlik, elastik modül, kırılma tokluğu ve basma mukavemetine sahip olmalıdır. Günümüzde mevcut vücut zırhı malzemeleri seramikler, lamine kompozit yapılar ve balistik kumaşları içermektedir. B4C, SiC, Al₂O₃, alüminyum nitrür, TiB₂ ve Syndie (sentetik elmas kompozit) gibi bazı yapısal seramikler, personel ve araç koruma uygulamalarında umut verici malzemeler olarak tanınmaktadır. Düşük yoğunluk, güvenilirlik, üstün sertlik, basma mukavemeti ve artırılmış enerji absorpsiyon kapasitesi gibi özellikleri, mermilerin etkili bir şekilde aşındırılmasını ve bertaraf edilmesini sağlar [1]. Zamanla, malzeme bilimindeki ilerlemeler, monolitik seramiklerin yaklaşık beş katı koruma kabiliyeti sunan daha yeni ve dayanıklı kompozitlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu ileri malzemeler genellikle metal matris kompozitleri (MMC'ler) olarak kategorize edilir ve hem seramik hem de metal bileşenleri bir araya getirir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FGM'ler), kendine özgü özellikleri nedeniyle zırh teknolojileri için gelişmiş bir mühendislik çözümü olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Genellikle metal ve seramik bileşenlerden oluşan FGM'ler, bileşen malzemelerin hacim fraksiyonlarının tüm boyutlar boyunca kademeli veya sürekli olarak değişmesiyle karakterize edilir. Bu, fonksiyonel derecelendirilmiş tasarım sayesinde zırhlı montajların istenen özelliklerine uyacak şekilde malzeme özelliklerinin uyarlanmasına olanak tanır [2]. FGM'ler, seramik ve metalin belirgin özelliklerini tek bir hacimde birleştirir. Sert dış katman, mermiyi köreltme ve aşındırma konusunda etkili iken, yumuşak iç katman, darbe anında kinetik enerjisini emerek mermiyi durdurur [3]. Ayrıca, bitişik bileşenler arasındaki yumuşak geçiş, bileşenlerin bireysel başarısızlığını geciktiren stres yansıma dalgalarını hafifletmek için umut vericidir [4]. Bu şekilde, FGM'ler balistik tehditlere karşı etkili koruma sağlar ve yapısal bütünlüğü koruyarak yapısal çöküşü önler. Bu nedenle, FGM'ler, çoklu mermi darbelerine ve yüksek balistik performansla ihtiyaç duyulan zorlu ortamlarda zırh malzemesi için potansiyel adaylar olarak kabul edilir.

TiB₂, seramik bir malzeme olarak yüksek sertlik, basma mukavemeti, elastik modül ve balistik verimlilik gibi bir zırh malzemesi için gerekli olan çoğu özelliği sunduğu için zırh malzemesi olarak iyi bir seçenektir [5], [6], [7]. TiB₂ parçacıklarının yüksek mukavemeti, yüksek aşınma direnci ve düşük yoğunluğu, metal matris kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını artırmak için popüler bir tercih yapmaktadır [8]. Hongzhan Yi ve ark. 9.5% TiB₂ ilavesiyle A356 ve A132 alüminyum alaşımlarının etkin elastik modülünün arttığını bildirmiştir.

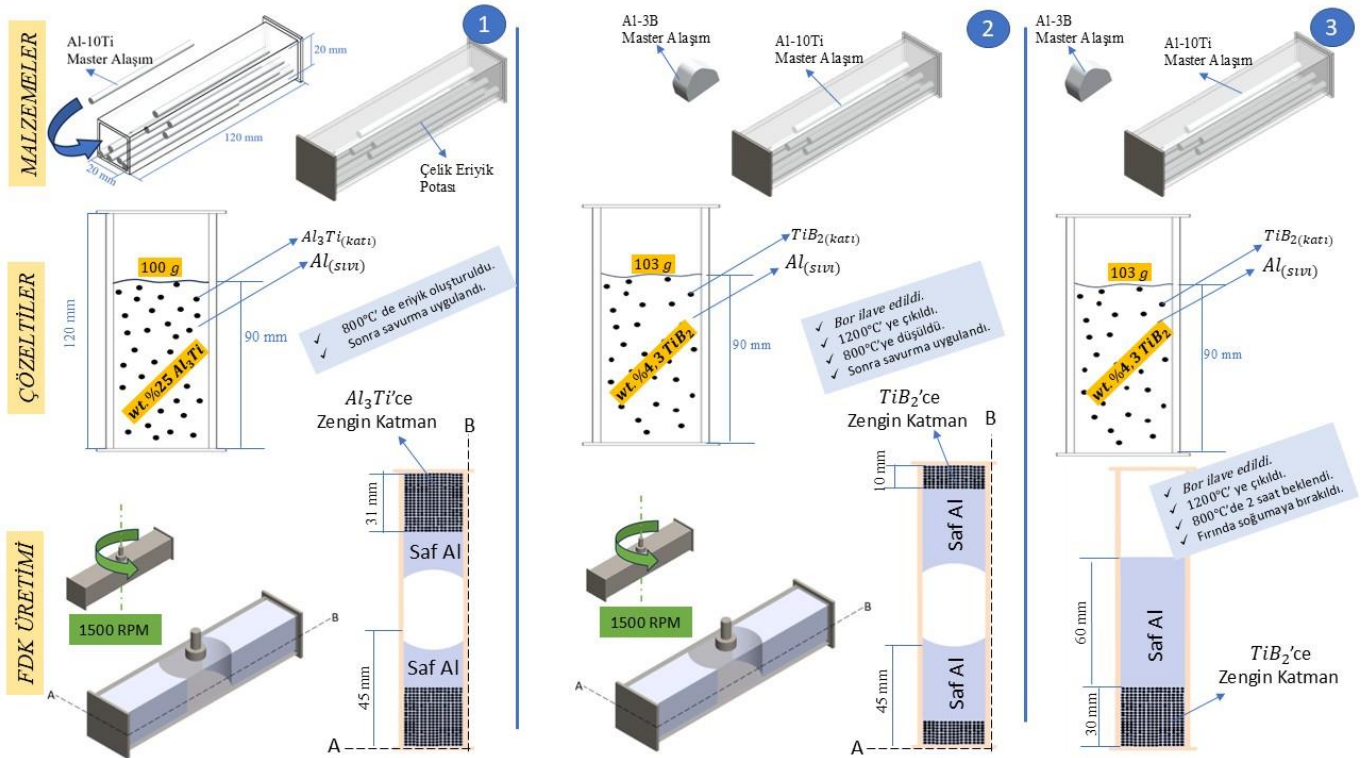
Benzer şekilde Al₃Ti ile ilgili literatür çalışmalarında takviye fazı olarak kullanıldığı ve hafif, mukavemetli metal kompozitler üretmek için sıkça kullanılan intermetalik bileşiklerden olduğu görülmüştür. Alüminyum anayapılı Al₃Ti takviyeleri kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, matris içerisine ilave edilen Al₃Ti partikülleri ile kompozitlerin sertlik ve aşınma direnci gibi birçok özelliğini geliştirdiği rapor edilmiştir [9].

Bu çalışmada, savurma döküm ve sedimentasyon (çöktürme) yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş TiB₂-Al ve Al₃Ti-Al matris kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu balistik performans açısından incelenmiştir. Üretilen numunelerin karakterizasyonu kapsamında, mikro yapı incelemeleri için optik mikroskop analizleri gerçekleştirilmiş; partikül dağılımı ve katman yapısı SEM analizi ile detaylı şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine dayalı yöntemle belirlenmiş; sertlik özellikleri ise mikrosertlik (Vickers) testi ile değerlendirilmiştir. Ölçülen yoğunluklara göre takviyeli tabakadaki ağırlıkça takviye yüzdeleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda üretilen katmanlı kompozitlerin hafif seviye zırh uygulamaları için üretilebilirliği ve işlevselliği bakımından değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

DeneySEL çalışmalar bölümü kompozitlerin üretimi ve üretilen kompozitlerin mikroskop ve imaj analizleri, SEM analizleri ve sertlik testleri yapılarak fonksiyonel derecelendirilmiş katman içeren malzemelerin karakterizasyonu hususunda iki ana bölümden oluşmaktadır.

A. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Üretimi



Şekil 1. Alaşımların Hazırlanması ve FDK Üretim Şeması [10], [11], [12], [13]

Yapılan çalışmada, üç farklı üretim yöntemi uygulanarak fonksiyonel derecelendirilmiş (FGM) tabakalı malzemeler üretilmiştir. Birinci üretim yönteminde, Şekil 1'de gösterildiği üzere, %25 oranında Al₃Ti içeren Al-Ti master alaşımından 100 gramlık numune çelik pota içerisine konularak 800 °C sıcaklıkta ergitme fırınında ergitilmiştir. Bu işlem sonucunda 'Al(s)-Al₃Ti(k)' fazlarını içeren bir ergiyik hazırlanmıştır. Elde edilen ergiyik, 1500 rpm dönme hızında savurma döküm yöntemi ile katılaştırılarak tabakalı yapı elde edilmiştir.

İkinci ve üçüncü üretim yöntemlerinde ise TiB₂ fazlarının in-situ sentezi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, %3 oranında Ti ve %1,3 oranında B elementi (%4,3 TiB₂ partikülleri) içerecek şekilde Al-10Ti ve Al-3B master alaşımları toplam 100 gram olacak şekilde çelik potaya alınmıştır. Bu alaşımlar, TiB₂ fazının oluşabilmesi için faz diyagramı göz önünde bulundurularak 1200 °C'ye kadar ısıtılmış ve homojen bir Al-Ti-B çözeltisi elde edilmiştir. Ardından sıcaklık 800 °C'ye düşürülerek, TiB₂ partiküllerinin in-situ sentezi gerçekleştirilmiş ve 'Al(s)-TiB₂(k)' yapısında bir ergiyik hazırlanmıştır.

İkinci üretim yönteminde bu ergiyik, 1500 rpm dönme hızında savurma döküm yöntemi ile katılaştırılmıştır. Üçüncü üretim yönteminde ise aynı ergiyik, 800 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle bekletilerek partiküllerin sedimentasyon yoluyla çökmesi sağlanmış ve ardından katılaştırılmıştır.

Ergitme ve katılaştırma işlemleri, Şekil 1'de gösterildiği gibi 1 mm kalınlığında ve 20×20×10 mm boyutlarında hazırlanmış çelik kalıplar (potalar) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sıvı alüminyumun çelik pota ile reaksiyona girmesini önlemek amacıyla potaların iç yüzeyleri, bor nitrür içeren spray seramik boya ile kaplanmıştır.

Üretim sonrasında, dökümler üzerinde FGM bölgeleri iki ayrı katman olarak incelenmiş ve ayrıca FGM olmayan bölgelerden de numuneler alınmıştır. Bu numuneler üzerinde optik mikroskopi, yoğunluk, faz oranları ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

B. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Karakterizasyonu

Optik analizler amacıyla hazırlanan kompozit numuneler, sırasıyla 150, 400, 600, 1000 ve 1200 grit silikon karbür (SiC) zımparalar kullanılarak mekanik olarak yüzey işlemine tabi tutulmuş; ardından 0.2 µm tane boyutuna sahip elmas süspansiyonu ile 15 dakika süreyle parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon, Clemex Vision görüntü analiz sistemine entegre edilmiş bir Olympus marka

optik mikroskop ile yapılmıştır. Ayrıca, aynı bölgelere ait karşılaştırmalı numuneler alınarak, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı yüzey morfolojisi incelenmiştir.

Yoğunluklar, numunelerin havadaki (kuru) ve sıvı içindeki (yaş) kütlelerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Arşimet düzeneğinde, referans sıvı olarak yoğunluğu 0,998 kg/mm³ olan saf su kullanılmıştır.

Katmanların hacimsel takviye yüzdesi, ölçülen yoğunluk değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, Denklem 1’de verilen karışım kuralı denklemi uygulanmıştır. Formüldeki V_f takviye fazının hacmini, ρ_f takviye fazının yoğunluğunu, V_m matris fazının hacmini, ρ_m matris fazının yoğunluğunu, ρ_c kompozitin toplam yoğunluğunu ifade eder.

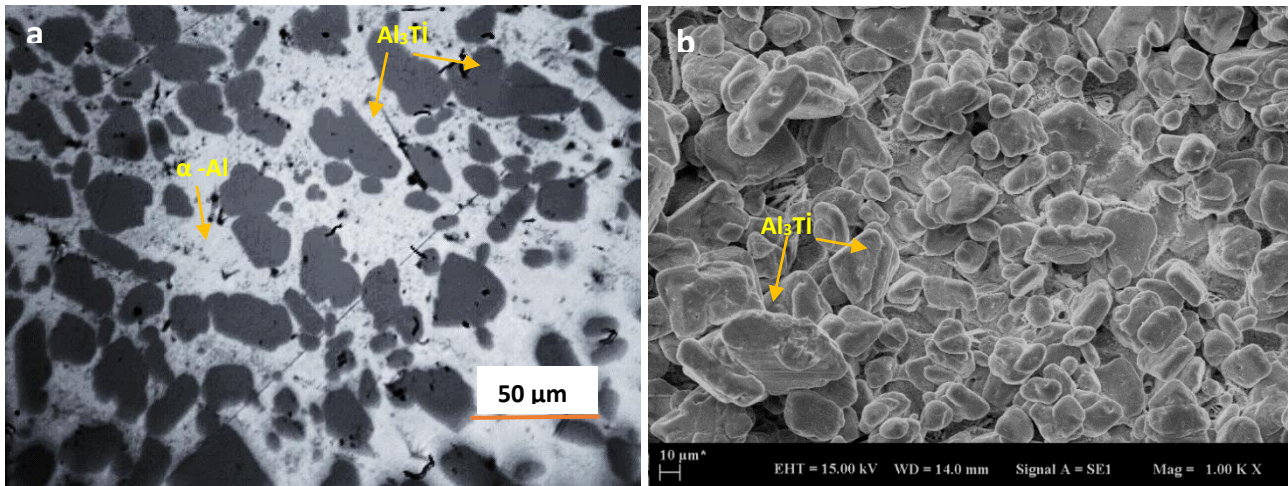
$$\rho_c = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \quad (2)$$

Sertlik değerleri Brinell sertlik ölçme tekniği kullanılarak yapıldı. Bu çalışmada 62,5 KN’lık bir kuvvet uygulanarak 2,5 mm çaplı bir uç yardımıyla malzemelerin sertlik değerleri alınmıştır.

III. BULGULAR

Yürütülen çalışmalar sonucunda, hem sedimentasyon hem de savurma döküm yöntemleri kullanılarak küçük ölçekli fonksiyonel derecelendirilmiş katmanlı kompozitlerin başarıyla üretildiği belirlenmiştir. Her üç döküm uygulamasında da takviye partiküllerinin kalıp içerisinde dip bölgeye doğru yönelerek yoğunlaştığı ve bu bölgelerde takviye yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Balistik uygulamalar için karakterizasyonu yapılan numunelerde, katmanlı yapının monolitik bir bütünlük içerisinde elde edildiği görülmüştür. Takviye partiküllerinin yoğunlaştığı dip bölgeler, "zengin katman" olarak tanımlanırken; takviyesiz, yalnızca ana fazdan oluşan üst bölgeler ise "fakir katman" olarak sınıflandırılmıştır. Bu yapı, fonksiyonel derecelendirme açısından istenilen katmanlı morfolojiyi sağlamış ve üretim yöntemlerinin hedefe uygunluk düzeyini ortaya koymuştur. Şekil 1’de görüldüğü üzere, takviyelendirilmiş katmanın kalınlığı kullanılan üretim yöntemine ve takviye fazına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Al–Al₃Ti kompozitinde takviye katmanı kalınlığı 31 mm olarak ölçülürken, savurma döküm yöntemiyle üretilen Al–TiB₂ kompozitinde bu değer 10 mm olarak tespit edilmiştir. Öte yandan, sedimentasyon yöntemiyle üretilen Al–TiB₂ kompozitinde takviye katmanı kalınlığı 30 mm’ye ulaşmıştır.

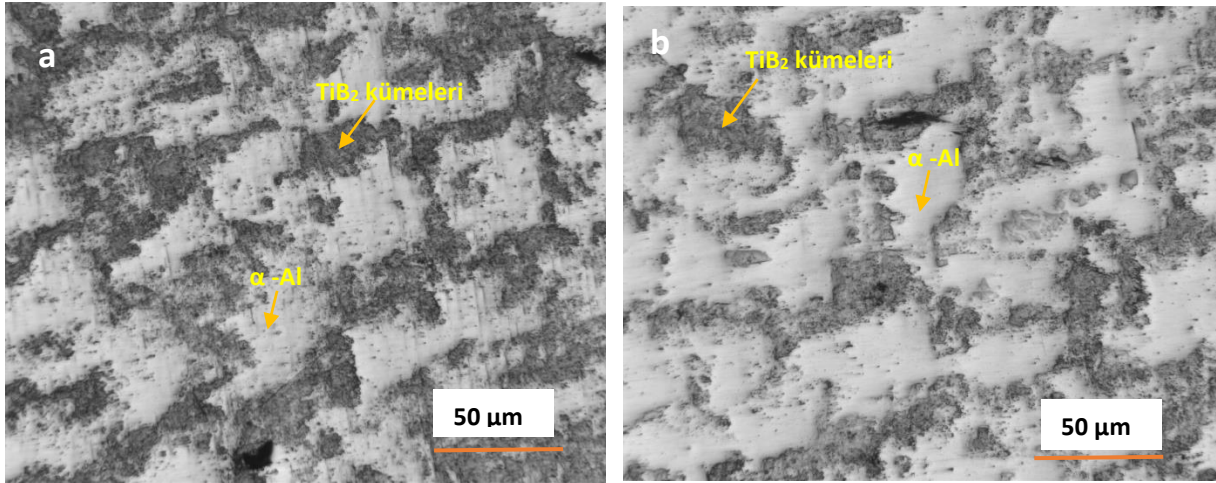


Şekil 2. Savurma Döküm Al₃Ti takviyeli zengin bölge a)Optik Görüntü b) SEM Görüntüsü

Al₃Ti takviyeli kompozitin zengin bölgesine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2a’da sunulmuştur. İlgili şekilde, beyaz renkte görülen alüminyum matris fazı içerisinde gri tonlarda Al₃Ti partiküllerinin dağıldığı gözlemlenmektedir. Al₃Ti partiküllerinin matrise homojen bir şekilde dağılmasının yanı sıra, savurma döküm işleminin etkisiyle belirgin bir katman oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, santrifüj

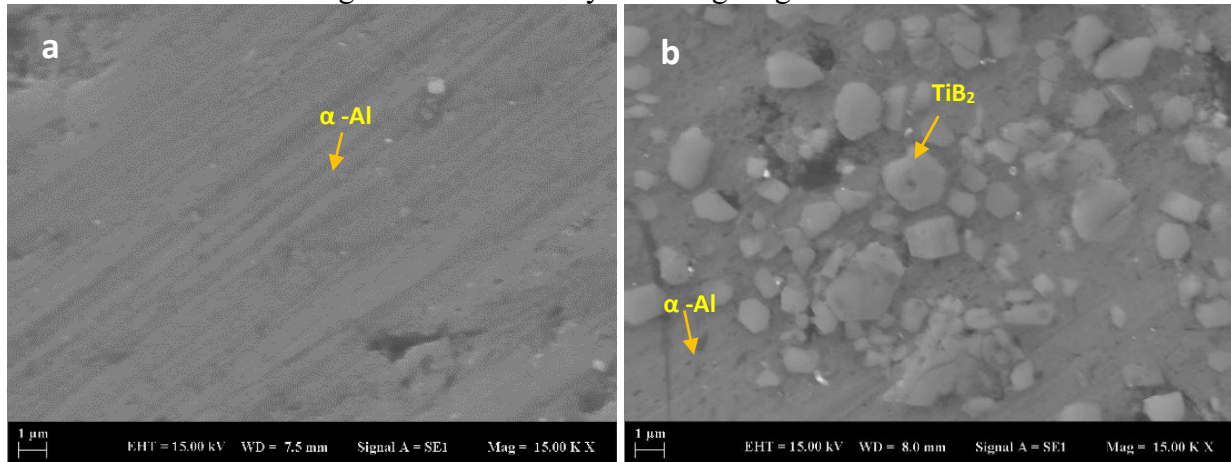
kuvvetinin Al_3Ti partiküllerini kalıbın dış duvarlarına doğru yönlendirdiğini ve bu bölgelerde partikül birikimine neden olduğunu ortaya koymaktadır. Bu birikimin muhtemel nedeni, Al_3Ti 'nin yoğunluğunun $3,4 \text{ g/cm}^3$, erimiş alüminyumun yoğunluğunun ise yaklaşık $2,3 \text{ g/cm}^3$ olmasıdır. Bu yoğunluk farkı nedeniyle, 800°C döküm sıcaklığında uygulanan santrifüj kuvveti, Al_3Ti partiküllerinin kalıbın dış çeperine doğru taşınmasına ve burada zengin bir takviye katmanını oluşturmaya yol açmıştır.

Şekil 2b'de, Al_3Ti içeren katmanın dağılımını ve mikroyapısal özelliklerini daha ayrıntılı olarak incelemek amacıyla numunelere %10 HCl çözeltisi ile derin dağlama işlemi uygulanmış, ardından elde edilen SEM görüntülerine yer verilmiştir. SEM görüntülerinde, Al_3Ti partiküllerinin tamamının yaklaşık olarak küresel bir morfolojiye sahip olduğu ve yüzeylerinin temiz olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, Al_3Ti partiküllerinin çaplarının yaklaşık $10\text{--}30 \mu\text{m}$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 3. a) Savurmda döküm yöntemi ve b) sedimentasyon yöntemi ile üretilen kompozitlerin TiB_2 takviyeli zengin gölgelerine ait mikroyapı görüntüsü.

Şekil 3a'da, santrifüj döküm yöntemiyle üretilen saf Al matrisli, TiB_2 partikül takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitin katmanlı bölgesine ait mikroyapı görüntüsü sunulmuştur. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, TiB_2 partiküllerinin beyaz renkteki alüminyum matris fazı içerisinde siyah renkte rastgele bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, partiküllerin boyutlarının mikroskobik çözünürlüğün altında olması nedeniyle ölçülemeyecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Şekil 3b'de, sedimentasyon tekniği ile üretilen Al- TiB_2 kompozitinin takviyeli katmanına ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Mikroyapı incelemesinde, TiB_2 partiküllerinin beyaz renkteki alüminyum matris fazı içerisinde siyah renkte ve ağ formunda bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu yapının oluşumunun, TiB_2 partiküllerinin çok küçük boyutlara sahip olması nedeniyle, alüminyumun katılaşması esnasında partiküllerin tane sınırlarına doğru itilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4. Sedimentasyon uygulanmış TiB_2 takviyeli kompozit SEM görüntüleri a) takviyisi ve b) Takviyeli Katman

TiB₂ yapılarının daha detaylı ve kapsamlı olarak incelenebilmesi amacıyla, sedimentasyon tekniği ile üretilen Al-TiB₂ kompozitin hem TiB₂ ile takviyeli hem de takviyesiz katmanlarından alınan SEM görüntüleri Şekil 4'te sunulmuştur. Görüntülerde, takviyeli bölgede gri renkteki alüminyum matris fazı içerisinde beyaz renkte TiB₂ partiküllerinin yer aldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4b). Buna karşılık, takviyesiz katmanlarda (Şekil 4a) TiB₂ partiküllerine rastlanmamıştır. Bu durumun muhtemel nedeni, Al(s)-TiB₂(k) çözeltinin 800 °C'de 2 saat süreyle bekletilmesi sonucunda, yoğunluğu 4,5 g/cm³ olan TiB₂ partiküllerinin, yoğunluğu 2,3 g/cm³ olan sıvı alüminyum içinde yerçekimi etkisiyle kalıbın alt kısmına çökeltimden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, SEM analizleri sonucunda TiB₂ partiküllerinin çaplarının 1–3 µm arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 1. Üretilen Kompozitlerin yoğunluk, takviye oranı ve sertlik değerleri

Üretim Tekniği	Katman	Yoğunluk (g/cm ³)	Takviye Oranı (%)	Sertlik (HB)
Al ₃ Ti–Al / Savurma	Fakir	2,70	0	27 ± 6
	Zengin	2,95	35 ± 2,0	75 ± 7
TiB ₂ –Al / Savurma	Fakir	2,70	0	29 ± 5
	Zengin	3,03	18 ± 1,5	60 ± 10
TiB ₂ –Al / Sedimentasyon	Fakir	2,70	0	30 ± 4
	Zengin	2,90	12 ± 1,3	55 ± 7

Tablo 1’de, farklı üretim teknikleri kullanılarak üretilen Al matrisli kompozit malzemelerin takviyeli ve takviyesiz bölgelerine ait Arşimet yöntemiyle belirlenen yoğunluk değerleri, bu değerlere göre hesaplanan takviye oranları ve ölçülen sertlik sonuçları sunulmuştur. Savurma yöntemiyle üretilen Al₃Ti takviyeli kompozitlerde, takviyesiz (fakir) katmanda yoğunluk 2,70 g/cm³ ve sertlik 27 HB iken, %35 Al₃Ti içeren zengin katmanda bu değerler sırasıyla 2,95 g/cm³ ve 75 HB’ye yükselmiştir. Benzer şekilde, TiB₂ takviyeli kompozitlerde zengin katmanlarda daha yüksek yoğunluk (3,03 g/cm³) ve sertlik (60 HB) elde edilmiştir. Sedimentasyon tekniğiyle üretilen TiB₂ takviyeli kompozitlerde ise bu artış daha sınırlı olmakla birlikte, %12 takviye oranıyla 2,90 g/cm³ yoğunluk ve 55 HB sertlik değerine ulaşılmıştır.

IV. TARTIŞMA

Kompozit malzemeler üretilirken 2 ayrı teknik kullanılmıştır: Savurma tekniği, Sedimentasyon tekniği. TiB₂ takviyeli Al matris çözeltiler her iki şekilde de üretilebilmiştir. Fakat savurma dökümde partiküller daha dar bir hacim içerisine sığarken, sedimentasyon ile çöktürme yapıldığında partikül dağılımı daha geniş bir hacimde yer almaktadır (Şekil 1). Bu durum literatüre uygun şekilde partikül katılaşmasının süreci ve süresine bağlı olmaktadır. J. Hashim ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada genel olarak kompozitlerde, takviye fazının dağılımı büyük ölçüde katılaşma süresine bağlı olduğunu belirtmişlerdir[14].

Bu çalışmada Al₃Ti partikülleri in-situ şekilde sentezlenmiş ve FDK üretmek için savurma tekniği uygulanmıştır. Partikül şekillerinin homojen bir dağılıma sahip olduğu ve küresel formda bulunduğu, şekil 2b’de SEM analizlerinde gözlemlenmektedir. Yoshimi Watanabe ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada, 1000 °C’de üretilen kompozitlerde, Al₃Ti partiküllerin, yaklaşık 20 µm’e kalınlıkta fleyk şeklinde olduğu ve savurma yönünde yönlendiği rapor edilmiştir.

Her 3 takviyede malzemenin sertlik ve yoğunluk değerinde literatür çalışmalarında olduğu gibi belirgin artışlar sağlamıştır. Rahul Gupta ve arkadaşları [16] ise yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımına sırasıyla %2.7, %5.4 ve %8.1 ağırlıkça Al₃Ti eklenmesi ile Brinell sertlik değerlerinin %50, %72 ve %103 oranında arttığını bildirmiştir. Shimaa El-Hadad [17] ile Yoshimi Watanabe ve arkadaşları [15] Alüminyum anayapılı Al₃Ti takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitleri, savurma döküm yöntemi ile ürettiklerini rapor etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada kompozitlerin sertliklerinin ve aşınma dirençlerinin önemli oranda değiştiği rapor edilmiştir.

Kompozit zırhta, balistik performans belirli balistik darbe mekanizmaları ile açıklanabilir. Takviyelendirilmiş tabaka, temas anında merminin kinetik enerjisini azaltarak merminin ucunda hasara neden olur. Bu ilk anda, kinetik enerji dağılımı gerçekleşir. İkinci aşamada ise sünek malzemeden yapılmış

destek plakası, kalan kinetik enerjiyi emerek merminin durmasını sağlar [18]. Bu bilgiler ışığında Al_3Ti ve TiB_2 takviyeli sert katman ve arka tarafta kalan Al matrisi metal kompozit malzemelerde balistik çarpışma mekanizmasına uygun bir yapıda üretildiği görülmektedir.

V. SONUÇLAR

1. Savurma dökümle üretilen Al_3Ti takviyeli kompozitte fakir katmanın yoğunluğu $2,70 \text{ g/cm}^3$, zengin katmanın $2,95 \text{ g/cm}^3$ olurken; TiB_2 takviyeli kompozitte bu değerler $2,70 \text{ g/cm}^3$ ve $3,03 \text{ g/cm}^3$, sedimantasyon yöntemiyle üretilen TiB_2 takviyeli kompozitte ise $2,70 \text{ g/cm}^3$ ve $2,90 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.
2. Savurma döküm yöntemiyle Al_3Ti takviyesinde %35, TiB_2 takviyesinde %18 oranında takviye sağlanırken; sedimantasyon yöntemi TiB_2 partiküllerini %12 oranında zengin katmana entegre etmiştir.
3. Savurma dökümle üretilen Al_3Ti takviyeli kompozitte fakir katmanın sertliği 27 HB, zengin katmanın 75 HB olurken; TiB_2 takviyeli kompozitte bu değerler 29 HB ve 60 HB, sedimantasyon yöntemiyle üretilen TiB_2 takviyeli kompozitte ise 30 HB ve 55 HB olarak ölçülmüştür.
4. TiB_2 partikülleri küçük tane boyutları ve yüksek sertliği nedeniyle daha etkili bir takviye fazı olarak değerlendirilirken, savurma yöntemi daha homojen dağılım sağlarken, sedimantasyon yöntemi büyük ölçekli üretim için avantajlı bulunmuştur.
5. TiB_2 partikülleri, daha küçük tane boyutları ($1-3 \mu\text{m}$) ve yüksek sertlik değerleri (60 HB – 55 HB) sayesinde Al_3Ti 'ye kıyasla balistik uygulamalar için daha uygun bir takviye fazı olup, özellikle sedimantasyon yöntemiyle üretilen TiB_2 takviyeli kompozitler, yüksek sertlik ve yoğunluk değerleriyle zırh malzemeleri için daha etkili bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] W. W. Chen, A. M. Rajendran, B. Song, and X. Nie, "Dynamic Fracture of Ceramics in Armor Applications," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 90, no. 4, pp. 1005–1018, Apr. 2007, doi: 10.1111/J.1551-2916.2007.01515.X.
- [2] P. Qiao, M. Yang, and F. Bobaru, "Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials: Review," *J Aerosp Eng*, vol. 21, no. 4, pp. 235–248, Oct. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(235).
- [3] A. Pettersson, P. Magnusson, P. Lundberg, and M. Nygren, "Titanium–titanium diboride composites as part of a gradient armour material," *Int J Impact Eng*, vol. 32, no. 1–4, pp. 387–399, Dec. 2005, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2005.04.003.
- [4] E. Balci, B. Sarikan, M. Übeyli, N. C.-K. Mater, and undefined 2013, "On the ballistic performance of the AA7075 based functionally graded material with boron carbide reinforcement," *kovmat.sav.skE Balci, B Sarikan, M Übeyli, N Camuşcu, RO YildirimKovove Mater, 2013•kovmat.sav.sk*, vol. 51, pp. 257–262, 2013, doi: 10.4149/km.
- [5] T. S. R. C. Murthy, B. Basu, R. Balasubramaniam, A. K. Suri, C. Subramanian, and R. K. Fotedar, "Processing and Properties of TiB_2 with $MoSi_2$ Sinter-additive: A First Report," *Wiley Online LibraryTSRC Murthy, B Basu, R Balasubramaniam, AK Suri, C Subramanian, RK FotedarJournal of the American Ceramic Society, 2006•Wiley Online Library*, vol. 89, no. 1, pp. 131–138, Jan. 2006, doi: 10.1111/J.1551-2916.2005.00652.X.
- [6] W. Wang, Z. Fu, H. Wang, R. Y.-J. of the E. C. Society, and undefined 2002, "Influence of hot pressing sintering temperature and time on microstructure and mechanical properties of TiB_2 ceramics," *ElsevierW Wang, Z Fu, H Wang, R YuanJournal of the European Ceramic Society, 2002•Elsevier*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221901004241?casa_token=jUMFgo2kST8AAAAA:eU3boveNMzd0EUV13VjxJW47rqC6d8a52HElb75ijdO-ERIEBNnAKBuzQeDumMF0aJqkW_JagQ
- [7] M. K. Ferber, P. F. Becher, and C. B. Finch, "Effect of Microstructure on the Properties of TiB_2 Ceramics," *Wiley Online LibraryMK Ferber, PF Becher, CB FinchJournal of the American Ceramic Society, 1983•Wiley Online Library*, vol. 66, no. 1, p. C-2-C-3, 1983, doi: 10.1111/J.1151-2916.1983.TB09974.X.
- [8] N. Kumar, G. Gautam, R. K. Gautam, A. Mohan, and S. Mohan, "Synthesis and Characterization of TiB_2 Reinforced Aluminium Matrix Composites: A Review," *SpringerN Kumar, G Gautam, RK Gautam, A Mohan, S MohanJournal of The Institution of Engineers (India): Series D, 2016•Springer*, vol. 97, no. 2, pp. 233–253, Oct. 2016, doi: 10.1007/S40033-015-0091-7.

- [9] C. Tijun, L. Jian, H. Y.-R. & Development, and undefined 2009, "Casting fabrication of in situ Al₃Ti-Al composites and their wear behaviors," *CiteseerC Tijun, L Jian, H YuanResearch & Development, 2009•Citeseer*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=21936d51c0698d27ca230c31e2b1cb02f417eb1f>
- [10] Ö. S.-I. L. and Tribology and undefined 2020, "Fabrication and characterization of TiB₂-reinforced functionally graded aluminum matrix material," *emerald.comÖ SavaşIndustrial Lubrication and Tribology, 2020•emerald.com*, vol. 72, no. 10, pp. 1147–1152, Nov. 2020, doi: 10.1108/ILT-12-2019-0538/.
- [11] E. T. Y. Yildiz, Ö. Savaş, M. S. Başer, and E. Kocaman, "Abrasive wear behavior of functionally graded Al₃Ti reinforced aluminum matrix composite," *SpringerETY Yildiz, Ö Savaş, MS Başer, E KocamanChina Foundry, 2025•Springer*, vol. 22, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1007/S41230-024-3147-1.
- [12] A. Makalesi Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB *et al.*, "Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al Kompozitlerin Üretimi Üzerine Bir Çalışma," *dergipark.org.trÖ Savaş, ÖF DemirokDüzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2020•dergipark.org.tr*, vol. 8, no. 3, pp. 1829–1839, Jul. 2020, doi: 10.29130/DUBITED.648333.
- [13] Ö. S.-M. R. Express and undefined 2019, "The production and properties of Al₃Ti reinforced functionally graded aluminum matrix composites produced by the centrifugal casting method," *iopscience.iop.orgÖ SavaşMaterials Research Express, 2019•iopscience.iop.org*, doi: 10.1088/2053-1591/AB562C/META.
- [14] J. Hashim, L. Looney, M. H.-J. of M. Processing, and undefined 2002, "Particle distribution in cast metal matrix composites—Part I," *Elsevier*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000985?casa_token=GTZuROfO7D8AAAAA:DAVJbYiPcUuuc88fqERp8gRaqAtqv2G9rT1fd2CqDBLLRvGbKIPuet9y5Ds2jKXRqhN5CGuu6w
- [15] Y. Watanabe, Q. Zhou, H. Sato, T. Fujii, and T. Inamura, "Microstructures of Al-Al₃Ti functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method and centrifugal in situ method," *Jpn J Appl Phys*, vol. 56, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.7567/JJAP.56.01AG01/META.
- [16] R. Gupta, G. Chaudhari, B. D.-C. P. B. Engineering, and undefined 2018, "Strengthening mechanisms in ultrasonically processed aluminium matrix composite with in-situ Al₃Ti by salt addition," *ElsevierR Gupta, GP Chaudhari, BSS DanielComposites Part B: Engineering, 2018•Elsevier*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817328883>
- [17] S. El-Hadad, H. Sato, E. Miura-Fujiwara, Y. W.- Materials, and undefined 2010, "Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force," *mdpi.comS El-Hadad, H Sato, E Miura-Fujiwara, Y WatanabeMaterials, 2010•mdpi.com*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/3/9/4639>
- [18] S. Sadanandan, J. H.-I. journal of impact, and undefined 1997, "Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminium armours subjected to oblique impact," *ElsevierS Sadanandan, JG HetheringtonInternational journal of impact engineering, 1997•Elsevier*, Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X97000195>