

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AL15SN MATRİSLİ B4C TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN TOZ
METALURJİSİ YÖNTEMLE ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS UÇAR

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ZÜLKÜF BALALAN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZGÜR ÖZGÜN

BİNGÖL-2025

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZİN BAŞLIĞI

Zülküf BALALAN danışmanlığında, Yunus UÇAR tarafından hazırlanan bu çalışma 23/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Zülküf BALALAN *İmza* :

Üye : Prof. Dr. Mehmet YAZ *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ömer EKİNCİ *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tez yazma süresi boyunca bilgi, birikimlerini, tecrübelerini paylaşan, yol gösteren ve en küçük yardımı esirgemeyen tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Zülküf BALALAN ve ikinci tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN'e, deneysel çalışmalarında birçok yardımı olan Dr. Öğr. Üyesi Ömer EKİNCİ'ye teşekkür ederim.

Tez izleme sınavlarım esnasında yaptıkları yönlendirmeler ve katkılarından dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. MEHMET YAZ ve Dr. Öğr. Üyesi ÖMER EKİNCİ, hocalarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne, babama ve kardeşlerime tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı, ayrıca tüm üniversite hayatı boyunca yardımlarını esirgemeye değerli Dr. Rıdvan UÇAR, Dr. Selim ÖZDEMİR ve Dr. Muammer EKMEKÇİ hocalarıma da özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER TABLOSU	v
TABLolar LİSTESİ	v
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. Metal Matrisli Kompozitler.....	6
3. TOZ METALURJİSİ.....	9
3.1. Tozların veya Toz Alaşımların Karıştırılması.....	10
3.2. Toz partiküllerinin Preslenmesi.....	11
4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	16
4.1. Alüminyum Alaşım Serileri ve Simgeleri	16
5. KALAY VE ALAŞIMLARI.....	19
6. BORKARBÜR FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	21
6.1. Sertlik	22
6.2. Aşınma Dayanımı.....	22
6.3. Yoğunluk	22
6.4. Elektriksel Direnç.....	22
6.5. Mekanik Özellikler.....	23
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
10. KAYNAKLAR.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μm	:	Mikrometre
EDS	:	Enerji Dağılımlı X Işını Spektrometresi
HV	:	Vickers Sertliği
MMK	:	Metal Matrisli Kompozitler
Mpa	:	Megapaskal
PMK	:	Polimer Matrisli Kompozitler
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
SPS	:	Spark Plazma Sinterleme
XRD	:	X-Işınları Difraktometresi
Sn	:	Kalay
B_4C	:	Bor Karbür
Al	:	Alüminyum
M.Ö	:	Milattan Önce
Al_2O_3	:	Alümina
SiC	:	Silisyum Karbür
T/M	:	Toz Metalurjisi
Pm	:	Pikometre
ASTM	:	American Society Of Testing And Materials
GPa	:	Gigapaskal
$^{\circ}\text{C}$	:	Derece Santigrat

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 3.1.	Toz partiküllerin bilyalı karıştırma değirmeni.....	11
Şekil 3.2.	Spark plazma sinterleme üretim yönteminin şematik gösterimi (Üstünova, 2012).....	13
Şekil 3.3.	T/M üretim yöntemiyle kompozit malzeme üretim görüntüsü (Torralba at el. 2003, Tekmen 2006).....	14
Şekil 4.1.	Bor-Karbon ikili denge diyagramı (Üstünova, 2012).....	21
Şekil 7.1.	Deneylelerin yapım aşamalarının sırası verilmiştir.....	25
Şekil 7.2.	Deneylelerde kullanılan Alüminyum ve B4C tozunun SEM görüntüleri; a) Al tozu, b) B4C tozu.....	26
Şekil 7.3.	Turbula Karıştırıcı.....	27
Şekil 7.4.	Presleme sırasındaki değerlerin kontrol edildiği ünite ve çıkan numenlerin fotoğrafları.....	27
Şekil 7.5.	SPS işleminin yapıldığı makine.....	28
Şekil 7.6.	Zımpara ve parlatma makinesi.....	29
Şekil 7.7.	SPS’de hazırlanan numuneler.....	29
Şekil 7.8.	Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.....	30
Şekil 7.9.	Üç nokta eğme test cihazı.....	31
Şekil 8.1.	Ölçülen numunelerin yoğunluk grafiği.....	32
Şekil 8.2.	Üretilen kompozitlerin XRD paternleri.....	34
Şekil 8.3.	Numunelerin SEM görüntüleri; a) AlXSn5B4C, b) AlXSn10B4C, c) AlXSn15B4C, d) AlXSn20B4C.....	35
Şekil 8.4.	AlXSn20B4C numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler.....	36
Şekil 8.5.	AlXSn5B4C numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler.....	37
Şekil 8.6.	Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri.....	38
Şekil 8.7.	Üretilen kompozit numunelerin; a) eğilme dayanımları, b) %uzama değerleri.....	40

Şekil 8.8.	Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; a)	
	AlXSn5B4C, AlXSn10B4C.....	42
Şekil 8.8.	(Devam): Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; c)	
	AlXSn15B4C d) AlXSn20B4C.....	43

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	Alüminyum işlem alaşımlarında simgeleme dizisi (Deschams, at el. 2001).....	17
Tablo 4.2.	Üretilen malzemelere uygulanan bazı temel işlemler.....	18
Tablo 5.1.	Kalay elementinin genel özellikleri tablosu (tr.wikipedia.org).....	19
Tablo 6.1.	Bor karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri özet halinde sunulmuştur. (Karadağ, 2017)	24
Tablo 7.1.	Üretilen kompozit malzemelerin ağırlıkça % olarak kimyasal bileşimleri	26
Tablo 8.1.	Yoğunluk değerleri	33

AL15SN MATRİSLİ B4C TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMLE ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU

ÖZET

Yapılan çalışmada, spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak farklı oranlarda B₄C takviyesi ile dört farklı Al₁₅Sn alaşım matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Bu kompozitler, argon gazı atmosferinde 580°C sıcaklıkta, 34 MPa basınç altında grafit kalıplar kullanılarak 4 dakika süreyle sinterlenmiştir. Üretilen bu malzemelerin mikroyapı, mekanik özellikleri ve yoğunlukları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri XRD, SEM ve SEM/EDS teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellik incelemeleri ise üç nokta eğilme testi ve sertlik ölçümü ile yapılmıştır. Üretilen kompozitlerde en yüksek bağıl yoğunluk değerine %95,50 ile Al₁₅Sn-5B₄C numunesinde ulaşmıştır. B₄C takviye oranının artmasıyla bağıl yoğunluk değerlerinin bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Üretim sırasında yüksek argon atmosferi kullanıldığından herhangi bir oksit bileşiği oluşmamıştır. XRD ve SEM analizlerinde, üretilen kompozitlerde Al₁₅Sn matrise takviye edilen B₄C fazları belirgin bir şekilde görülmektedir. Daha önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, Al ve alaşımlarına kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Artan B₄C takviye oranı, mukavemet değerlerini artırırken süneklikte azalmaya neden olmuştur.

Anahtar kelime: Kompozit Malzemeler, Spark Plazma Sinterleme, Yoğunluk, Mikrosertlik

AL15SN MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMLE ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU

ABSTRACT

In the study, four different Al15Sn alloy matrix composite materials were produced with varying amounts of B₄C reinforcement using the Spark Plasma Sintering (SPS) method. These composites were sintered for 4 minutes at a temperature of 580°C and a pressure of 34 MPa, using graphite molds under an argon gas atmosphere. The microstructure, mechanical properties, and densities of the produced materials were examined. Microstructure analyses were conducted using XRD, SEM, and SEM/EDS techniques. Mechanical property tests were performed through three-point bending and hardness measurements. The highest relative density value of 95.50% was achieved in the Al15Sn-5B₄C sample. It was observed that the relative density values slightly decreased as the B₄C reinforcement ratio increased. Since a high argon atmosphere was used during production, no oxide compounds were formed. In XRD and SEM analyses, the B₄C phases reinforced in the Al15Sn matrix were clearly visible in the produced composites. Compared to previous studies, higher hardness values were achieved in the Al alloys. The increased B₄C reinforcement ratio improved strength but led to a decrease in ductility.

Keyword: Composite Material, Spark Plasma Sintering, Density, Microhardness

1. GİRİŞ

Metal ve metal benzeri ürünlerin kullanımı M.Ö. 6. yüzyıla dayanmaktadır. Antik çağ metalleri olarak da bilinen bu metaller şu şekillerde sıralanabilir; altın (M.Ö. 6000), bakır (M.Ö. 4200), kurşun (M.Ö. 3500), kalay (M.Ö. 2750), eritilmiş demir (M.Ö. 1500) şeklinde sıralanmıştır. Bu metallerin yanı sıra yüzyıllar süre gelen ve bulunan bazı metaller alüminyum, kalay, bakır, çinko, kurşun, nikel ve içinde demir ve türevi bulunmayan endüstriyel metallerdir. Yaygın olarak endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanılmaya başlanmış, bu metaller arasında en çok kullanılan metal ve metal alaşımları günlük yaşantımızın neredeyse her alanda kullanımı artırılmıştır.

Toz metalurjisi, toz boyutundaki malzemeleri farklı yöntemlerle bir araya getirilmesi, bir araya getirilen malzemeleri presleme tekniği kullanılarak üretilmesi yöntemidir. Bu üretim yöntemi, son formuna çok benzer boyutta ikincil talaşlı imalat uygulanmasına gereksinimi duymayan veya talaşlı imalatla daha az gereksinim duyan malzemelerin üretilmesini sağlar. Toz Metalurjisi yöntemi diğer üretim yöntemlerine göre daha az sorunların oluşmasından dolayı kullanılmaktadır. Bu yöntem ile malzeme tozlarının bir araya getirilmesi işe yaramaya daha uygun ürünler haline getirilmesi ve kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabilmesidir (Ekici, 2012; Nas, 2013). Bunun yanı sıra tozların birleştirilmesini kolaylaştırmak ve sıkıştırmak, sıkıştırılmış tozlara ergime sıcaklığının altında belirli bir sıcaklık ve basınç uygulanarak malzeme üretilmesidir (Torralba at el. 2003; Tekmen, 2006). Sıcak presleme; yüksek performans, dayanım ve dayanıklı malzemeler için ya da sinterleme özelliği düşük olan malzemelerin özelliklerini güçlendirmek için uygun bir üretim yöntemidir (Upadhyaya, 2002). Başka bir özelliği sıvı faz yöntemi ile üretilmeyen malzemelerin üretiminde kullanılmakta olup, birçok oksit ve karbür seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır (Al_2O_3 , SiC, B_4C vd.).

Kompozit malzeme, malzeme bilimcilerin tanımlamasına göre iki veya daha fazla malzemenin mikro boyuta karışımına ve diğer kesintisiz faz içerisinde fiziksel ve kimyasal olarak ayrı bir faz içeren ve birbirlerininkinden ayrı yapı gösteren malzemelerdir. Yani kompozit malzemeler iki veya daha fazla malzemenin birbirlerinin benzer özelliklerinin

birleştirmesini sağlamak amacıyla bir araya getirilmesine ve birbiri içerisinde çözünmemesinden meydana gelmektedir. Bu bağlamda metal alaşımları, seramik, mineraller ve plastik kopolimerler gibi malzemeleri de içermektedir.

Kompozitler, geleneksel malzemelere oranla dayanım/özgül ağırlıkları daha yüksek çıkan malzeme sınıfıdır. Diğer bir deyişle elastisite modülleri kendini oluşturan matris alaşımına oranı daha yüksektir. Birden fazla kompozit, kendisinde olması istenilen (aşınma, korozyon, elektriksel, termal vb.) özellikleri gösterecek şekilde üretebilmektedir. Kompozitlerin malzemelerin bu yapıları nedeniyle, son birkaç yılda otomotiv, havacılık, uzay sanayi ve nükleer enerji alanlarında, geleneksel malzemelere göre kullanımı nispeten giderek artmaktadır (Sur ve Kayabaşı, 2019).

İlk kompozit malzeme kullanımından bugüne kadar başka şekillerde de yıllar boyunca kullanılmış malzemelerdir. Örnek saman ve çamur tuğlalar, kâğıt ve beton, kemik ve ahşap vb. doğal olarak ortaya çıkmış kompozitlerdir. Kompozit malzemeler teknolojik sorunların da yıllarca çözümü olmakta ama bu malzemeler 1960'larda polimer matrisli kompozitlerin (PMK) bulunmasıyla endüstrinin ve sanayinin ilgisini çekmektedir. 1960'lardan bu günlere kadar kompozit malzemeler mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları otomotiv parçaları, spor eşyaları, uzay gemisi parçaları, tüketici malzemeleri, petrol ve denizcilik endüstrisi gibi türlü uygulamalar için tasarımı yapıp üretilmektedirler (Altınsoy, 2009).

Günümüzde artan teknolojik gelişmeler sonucunda daha hafif, daha dayanıklı kompozit malzemelere olan ihtiyaç her gün artmakta olup bu ihtiyaçlardan dolayı farklı element ve bileşikler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, birden çok malzemenin egemen yapılarına sahip olan matris ve takviye elemanından meydana gelen yeni malzeme oluşturan çeşitleridir. Kompozit malzemeler matris malzemeye göre; seramik, metal veya polimer matrisli kompozitler biçiminde sınıflandırılabilir. Kompozit matris malzemesi olarak (magnezyum, titanyum, alüminyum, bakır, kalay, vb.) gibi metaller kullanılmaktadır. Takviye olarak; titanyum karbür, titanyum nitrür, alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, bor karbür ve bor nitrür gibi ileri teknoloji seramikler olarak kullanılabilir (Öztop ve Gürbüz, 2018; Şenel, 2020).

MMK (metal matrisli kompozitler), son 20 yıldır otomotiv sektöründe ticari olarak kullanılmaktadır. Bu açıdan incelendiğinde MMK; yüksek mukavemetleri, yüksek spesifik modülleri, düşük ısıl genleşme katsayıları ve aşınmaya karşı iyi direnç özelliklerine sahip olduklarından dolayı otomotiv sektöründe daha fazla kullanıma sunulmuştur (Kumdalı, 2008).

Alüminyum, kolaylıkla oksitlenen ve çoğunlukla yeryüzünde alüminyum oksitleri şeklinde bulunmaktadır. Bu yapısından dolayı birçok bilim ve teknoloji alanlarında kullanımına neden olmuştur. Doğada bulunan daha ağır kalkeritler, tellür gibi bileşikler daha az araştırılmasının nedeni yeryüzünde daha az bulunmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyum, dünyada en çok bulunan 3. elementtir (Franz at el. 2015; Ekinci, 2021). Alüminyum, nerede ise sonsuz bir şekilde geri dönüştürülebilen çevreye uyumlu bir elementtir (Zamzami at el. 2017).

Yapılan bu çalışmalar göz önüne de bulundurularak alüminyum, kalay alaşımının birçok özelliklerinden dolayı ikili veya üçlü alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Bu özelliklerden bazıları daha az maliyet, düşük ergime sıcaklığı ve yüksek performans sağlaması nedenlerinden dolayı tercih edilmektedirler. Son 20 yıla bakıldığında metal matrisli kompozit malzeme üretimi diğer birçok üretim yöntemlerine göre daha kullanışlı ve malzemelerde oluşan gerekse içyapı gerekse yüzey hatalarının daha az olmasından dolayı tercih edilmektedir. Yapılan bu çalışmada spark plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle Al-15Sn matrisli ve B₄C takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Farklı parametrelerle üretilen kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri karakterize edilmişlerdir. Mekanik özellikler için sertlik ve üç nokta eğilme testlerinden yararlanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde ise SEM ve SEM/EDS incelemeleri ile XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular önceden yapılmış çalışmalarla karşılaştırılarak literatüre kazandırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Alüminyum alaşımları hafif, darbe direncin yüksek, iyi korozyon direncin ve geri dönüştürülebilir olması bu özelliklerden dolayı otomobillerde, uçaklarda, yüksek hızlı trenlerde ve deniz taşıtlarında kullanılmaktadır (Li at el. 2018). Otomobil sanayisinde alüminyum alaşımları kullanılarak taşıtların yakıt tüketimini azaltmaktadır (Milani at el. 2016). Alüminyum ulaşım araçlarında yaygın olarak uçak, otomobil ve bisikletlerde kullanılır. Korozyona karşı dirençli olduğundan yiyecek ve içecek sanayisinde, içecek kutuları, mutfak folyoları ve ambalaj malzemesi olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi; toz halindeki metalleri belirli oranlarda karıştırmasını sağlamak, oda sıcaklığı koşullarında hassas kalıplara doldurmak, istenilen yöntem ve değerlere uygun basınçlarda preslenmesini yapmak ve kontrollü atmosferde sinterlenme işlemi ile parça üretme tekniğidir. Üretilen parçalarda istenilen başka özelliklere ulaşmak için presleme yapıldıktan sonra kalibrasyon, çapak alma, ısıt işlemler, parlatma ve zımparalama gibi işlemlerde uygulanabilir (Yıldırım, 1999).

Toz metalurjisi; toz metal üretim yöntemi diğer metal üretim yöntemlerinden farklı olmasına rağmen seramik malzeme üretim yöntemine daha çok benzemektedir. Her iki yöntemde de tozların kalıp içinde preslenmesiyle üretimine başlanılır. Oluşturulan bu şekiller istenilen mukavemet dayanımına ulaşmak için fırınlanması yapılmaktadır (Somunkıran, 1999). Bir kısım parçalar bu işlemleri tekrarlı şekilde; yeniden presleme, plastik veya yağ emdirme, düşük ergime sıcaklığı olan metal veya alaşım eklemek, ısıt işlem veya yüzey kaplama işlemlerine tabi tutulmaktadır. Toz metalurjisi başka bir ifade ile tozların, ön (tam veya yarım) alaşımlama, yani tozların yağlayıcılarıyla birlikte karıştırılarak uygun sıkıştırma tekniklerini ve uygun sıcaklık kullanılarak istenilen şekilde üretilmeleri, üretilen bu malzemelerin sürelerini de kapsayan çok çalışma gerektiren malzeme üretme yöntemidir (Öveçoğlu, 1997).

T/M üretim tekniği son birkaç yıldır kullanımı arttan modern olarak sayılabilecek imalat yöntemidir. Çok küçük parçacıkları birbirine bağlayan ve daha büyük parça haline getirme işlemidir. Bu üretim yönteminin kendine özgü yöntemlerle daha küçük, parça detayı çok

olan ve diğer üretim yöntemleriyle üretilmesi zor olan parçalarının seri üretilmesini sağlayan toz metal ve malzeme üretme tekniğidir (Benjamin, 1974). Bu üretim yöntemi metalurji ve malzeme bilimi alanlarında önemli bir alan oluşturmaktadır. Böylelikle, toz örselemek(zedelemek), MMK sıcak iken metallere uygulanan presleme gibi çeşitli olayları (dövme, haddeleme, vb.) toz metalurjisi teknolojisi ile kullanımını daha fazla genişleterek bu üretim alanını gün geçtikçe daha da yaygınlaştırmasını sağlamaktadır (Taner, 2000).

Toz metalürjisi üretim yöntemi metal matrisli kompozit malzeme üretme yönteminde de daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Seramik parçacıkların sıvı metal tarafından ısıtıldığı fark edilince, toz metalürjisi kompozit malzeme üretim yöntemi ilk kez kullanımı ve geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu üretim yönteminde genellikle parçacık ve kesikli (whisker) takviye elemanları toz haldeki metaller kullanılarak metal matrisli kompozit malzemeler oluşturulmuştur. En çok kullanılan takviye elemanları silisyum karbür, grafit, titanyum karbür ve en fazla kullanılan matris malzemeleri alüminyum, titanyum, bakır elementleridir (Şahin, 2000).

İlk kez kullanımı Mezopotamya bölgesine dayandırılmaktadır. Kalay çok eskiden beri bilinen ve kullanılan bir metaldir. İlk kalay içeren alaşımlar M.Ö. 2.500-3.000 yıllarına dayanmaktadır. En önemli ve daha ekonomik kalayın yeryüzündeki minerali kassiterittir. SnO_2 yoğunluğu 6,8-7,1 g/cm³, sertliği (mohs) 6-7, rengi kahverengi ve kahverengisiyahtır. Kalayın elde edildiği bazı minareler Stannit, Frankit, Confieldit Teallit ve sülfid gibi minerallerinden daha az miktarlarda kalay elde edilmektedir. Kalay malzeme kaplamacılıkta, alaşımlamada ve kimyasal maddeler yapımında kullanılmaktadır. Otomotiv motor yataklarında, kaporta, radyatör, yağ, hava filtrelerinde, Uçak ve gemi endüstrisi, kimya, sağlık ile elektrik ve elektronik sanayisinde ve birçok alanda da kullanılmaktadır (Karahana, 2019). Kalaysız çelik, cam, kâğıt ve plastikler tenekelerdeki kalay elementin yerine alüminyum elementi kullanılmaktadır.

İlk defa bor karbür bileşiği 1934 yılında keşfedilmiştir. 1950 yıllarından sonra bor karbürün özellikleri ve yapımı ile alakalı detaylı araştırmalar yapılmıştır (Sur ve Kayabaşı, 2019). En önemli özelliği sıcaklık değişimleri ile birlikte yapısından kaynaklanan sertlik ve mekanik düşüşlerin olmamasıdır. Tüm bu sebeplerden dolayı bor karbür elektrot malzemesi olarak, kesme takımlarında, aşınma dayanımı ve yüksek sertlik gerektiren

alanlarda, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu, nedeni ile nükleer reaktörlerde, refrakter malzemelerde, mekanik, kimyasal ve bu özelliklerinden dolayı ileri teknoloji alanında daha çok kullanılabilir bir malzeme olması düşünülebilmektedir. Bor karbür aşınma dayanımını artırdığı için metal matrisli kompozit malzemelerde yoğun olarak kullanılmaktadır (Yöntem, 2019). Sanayide siyah elmas olarak bilinen bor karbür birçok bor alaşımı arasından en çok pazar payına sahip olan bor bileşiği olarak kullanılmaktadır. Bor karbür elmas, kübik bor nitrürden sonra en sert 3. Malzemedir (Karadağ, 2017). Yüksek sertliği, yüksek ergime sıcaklığı, düşük yoğunluğu, kimyasal maddelere karşı direnç gösterebilmesi ve önemli mekanik özellikleri nedeniyle bor karbür önde gelen ileri teknoloji malzemelerindendir. Çok kararlı yapısından dolayı asit ve bazlar ile reaksiyon girmemektedir. Mohs sertlik derecesinde bor karbür 9,32 (mohs) sertliktedir (Karadağ, 2017). Alüminyum; üretimde, imalata, tasarımda ve çelikler için alaşım malzemesi olmak birlikte yerkürede en fazla kullanılan malzemelerden biri haline gelmiştir (Heinen at el. 2014). Yüzyılın son çeyreğinde, yeryüzden alüminyumun tüketimi ve değeri artmıştır (Siewert at el. 2018).

2.1. Metal Matrisli Kompozitler

Kompozit malzemelerin tanımı en geniş anlamda; çok kristalli yapısı ve birçok metal, metal dışı parça ve partikülün bir araya gelmesi olarak ifade edilebilmektedir. Bu nedenden dolayı bir malzemenin kompozit sayılabilmesi için teknik olarak malzemeyi alaşımlardan ayırmak için kısaca aşağıdaki özellikleri taşıması gerekmektedir:

- Farklı bileşenler ile kimyasal olarak birbirinden farklı en az iki malzemenin birleşiminden oluşmalıdır.
- Kompozit gereci oluşturan malzemeler 3 boyutlu şekilde birleşmelidir.
- Kompozit, kendisini oluşturan elemanların tek başına sahip olamadıkları özelliklere sahip olmalıdır.

Kompozit malzemeleri oluşturan bileşen gruplarının çoğu farklı malzemelerden oluşmaktadır. Bu gruplar seramik, metal, polimer, cam ve elastomerler gibi kompozit malzemeyi oluşturan farklı gruptaki malzemelerden ikiden fazla malzemenin bir araya getirilerek daha iyi özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir (Clyne and Withers, 1993). Kompoziti oluşturan malzemelerin iç yapısını ve özelliklerini koruyarak, bir arada

bulunmalarına rağmen birbiri ile tamamen çözünmez ve ayrıca iki malzeme arasında bir ara yüzey oluşturmaktadırlar (Akbulut, 2001). Bu bilgileri referans olarak kompozit malzemeleri şu şekilde tanımlayabiliriz: Kompozit malzeme, belirli özellikleri elde etmek için makro ölçülerde farklı bileşim ve şekle sahip iki veya daha fazla makro bileşenin bir arada bulunduğu, bileşenlerin özelliklerini devam ettirdikleri için fiziksel olarak belirlendiği malzeme sistemidir (Akbulut, 2001; Kumdalı, 2008).

Kompozit malzemenin kullanılacağı yerlerdeki çevre koşulları, sıcaklık, korozyon, mukavemet ve maliyet gibi özellikleri göz önünde bulundurularak matris malzemesinin seçilmesi ona göre yapılmaktadır. Matris elemanın fiziksel, kimyasal özelliklerinin daha iyi seçilmesi, kompozit malzemeye uygun değerlerde faydalı olarak sağlamaktadır (Clyne and Withers, 1993).

İlerleyen teknolojik malzemelerinin bir dalı olan metal matrisli kompozitler genelde olarak yüksek sıcaklıklarda, diğer malzemelerin kullanılması uygun olmayan alanlarda ve yerlerde kullanılmaktadırlar. MMK'lerin avantajlı olmasının nedeni farklı mukavemet ve rijitlik değerlerini sağlayacak şekillerde üretilibilmeleridir. Bu kompozit malzemeler, ilerleyen teknolojik ihtiyaçtan dolayı yüksek (elastik modülü, mukavemeti, aşınma dayanımı) ve düşük yoğunluklu malzeme özelliklerini karşılamak için en çok çalışma yapılan malzeme sınıflarından biridir (Yılmaz at el. 1996; Kumdalı, 2008).

Metal matrisli kompozit malzemeleri oluşturan ana malzeme metal ve metal alaşımlarıdır. Takviye elemanı genelde karbürler, nitrürler veya metal grupları olabilmektedir. Bu malzemeler matris ve takviye elemanın ön plana çıkan özelliklerine göre seçilmesi ve oluşturulan malzemede istenilen özelliklerin mükemmel yakın veya daha üstün özellikler elde etmek için kullanılmaktadır (Ay, 2014; Işık, 2014). Havacılık endüstrisi ve feza endüstrisi MMK malzemelerin en fazla kullanıldığı yerler olmaktadır (Biçer, 2015).

Metal matrisli kompozit malzemelerin avantajları; aşınma ve yorulma dayanımı, termal ısıya dayanıklılığı, mukavemetli olması, elastisite modülünün yüksek olması, termal genleşme katsayılarının düşük olması, geri dönüştürülebilmesi, akışkanlıklarının düşük olması, elektriği ve ısıyı daha fazla iletebilmesi avantajlarındandır (Biçer, 2015; Işık, 2014).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminin; karmaşık olması, maliyetinin yüksek olmaması, üretimde kullanılacak ekipmanların bulma sıkıntısı bu üretim yönteminin dezavantajlarından bazılarıdır (Biçer, 2015). Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri temel olarak sıvı hal prosesi, katı hal prosesi, in-Situ prosesidir (Karadağ, 2017). MMK malzemelerin üretim yöntemlerinden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

Toz metalurjik yöntem

Sıvı-hal prosesleri (Ergiyik metal yöntemleri)

Karıştırma

Yarı-katı döküm

Basıncılı-basınçsız infiltrasyon

Sprey çöktürme

In-situ yöntemi

3. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi, metal, seramik ve polimer tozlarının belirli basınç, sıcaklık sürelerde tutularak katı parçalar üretme tekniği olarak ifade edilmektedir. Başka bir ifade ile çeşitli toz halindeki malzemelerden arzulanan şekil, biçim, özellik ve kullanılacak yerlere göre işlenebilirliği olan parçalar üretme tekniğidir. Bu üretim yöntemi sayesinde döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi yöntemlerle üretilmesi daha zor olan çeşitli alaşımları daha kolay bir biçimde ürün haline getirilebilmesidir. Ergime sıcaklığı diğer metallere göre daha yüksek olan (molibden, tungsten, platin, karbon, vb.) metallerde parça üretimi bu üretim tekniği ile daha kolay olmaktadır. Bu üretim yönteminin kullanılması ile dökümde oluşan yolluk, besleyici kısmından kaynaklanan kayıpları ve talaşlı imalatta meydana (kesimde fazla parça veya malzeme kayıpları) gelen kayıpları önleyebilmektedir. T/M yöntemi malzemelerdeki kayıpları azaltması, işçiliğin daha az olması ve daha ekonomik bir üretim sağlamaktadır. Toz metalurjisi dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızlı bir şekilde gelişmektedir. Bu gelişmeler 1991 yılı verilerine göre ülkemizde toplam demir esaslı malzeme üretimi yaklaşık 3000 ton üretilmiştir. Bu üretim ilk başta otomotiv sanayisi olmak üzere, beyaz eşya, daha dayanıklı tüketim malları, elektronik sektörü, savunma sanayi ve daha birçok sektörel kullanıma yönelik yapılmaktadır (Özgün, 2007).

T/M yöntemi genellikle, takviye elemanı partiküllerine sahip matrisli alaşımların tozlarının karışması, preslenmesini ve katı hal sinterlemesini içermektedir. Bu, matris ve takviye elemanı arasındaki reaksiyonun az olmasının sebebinin düşük sıcaklık veya yeterli sıcaklığın kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Daha İyi bir mikroyapı elde etmek için karışımın bütün partiküllerinin homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir (Torralba at el. 2003).

Toz metalurjisi birçok farklı metal işleme yöntemi arasındaki en farklı üretim yöntemidir. Buda yüksek kaliteli, karmaşık parçaların daha ekonomik bir biçimde üretilebilmesi toz metalurjisini tercih etmeye sürüklemiştir. Toz metalurjisi, toz halindeki şekil, boyut, paketlenme özelliği farklı tozları sağlam ve daha yüksek performans sağlayan parçalara dönüştürmektedir. Bu uygulanan T/M işlemleri şekillendirme, presleme, sinterleme ile ısı

işlem bölümlerini içermektedir. Bu üretim yöntemi diğer üretim yöntemlerine oranla daha düşük enerji tüketmesi, malzeme kullanımı ve daha az maliyetli otonom işlemleri gibi aşamaları daha verimli halde kullanmaktadır (Akın, 2006; Torralba at el. 2003). Yüksek mukavemet düşük tolerans ile diğer üretim yöntemlerine oranla oldukça avantajlıdır.

Avantajları;

- İstenilen malzeme özelliği ayarlanabilme
- Boyutlar kontrollü bir şekilde elde edilebilir
- Yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemelerin üretilebilmesi
- Yüzey kalitesinin yüksek olması

Dezavantajları;

- Toz fiyatının yüksek olması

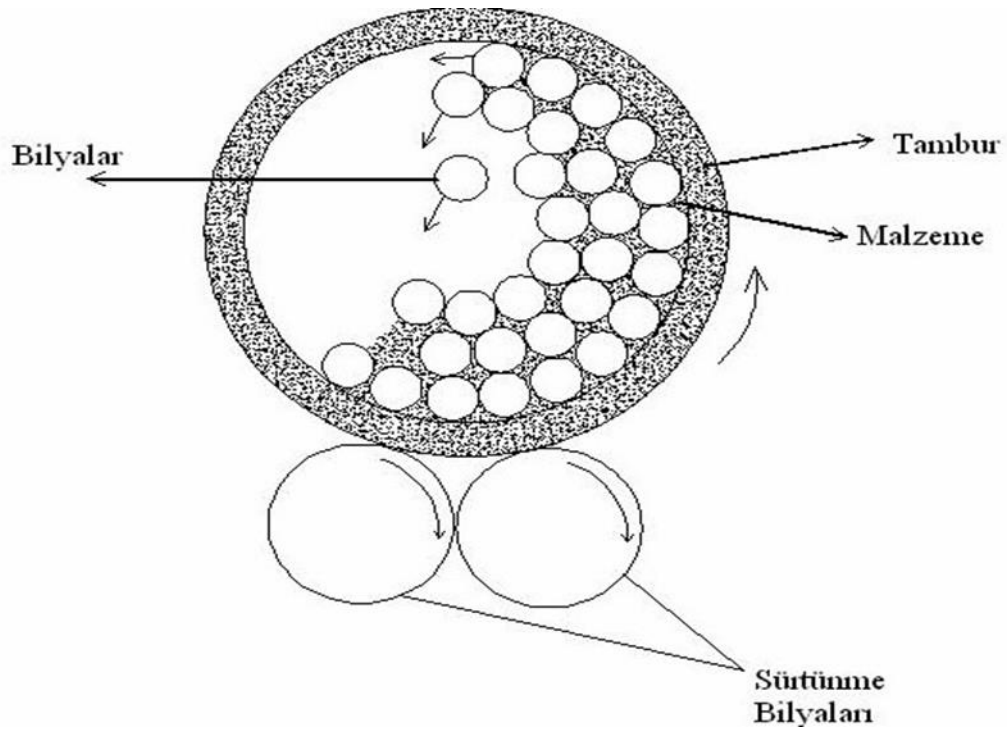
Dövülmüş metallerde mukavemet ve süneklik gibi özellikler yüksek iken toz metalürjisinde bu özellikler düşük çıkabilmektedir (Umur, 2017).

3.1. Tozların veya Toz Alaşımların Karıştırılması

Tozların karıştırılması; metal tozları karıştırmanın amacı homojen tane boyut oluşmasını sağlamak ve presleme işleminin kolaylaştırılması için de yağlayıcı malzemeler ilave edilmektedir. Bu İşlemin ana sorunu, tozların içerisinde oluşan nem, taşıma sırasında oluşan segregasyon gibi olayları ortadan kaldırmaktır. Malzemeler taşınırken veya taşıma sırasında küçük tanelerin aşağı çökmesi, alaşımın preslenmesi ve sinterlenmesi sırasında sorunlar oluşturmaktadır. Karıştırma sırasında oluşan fazladan nem miktarına bağlı aglomerasyonun oluşmasını önlemek amacıyla karışım yapılmadan düşük sıcaklıklarda toz kurutması yapılabilmesidir (Tan vd. 1998). Toz bileşimlerinin homojen bir dağılım oluşturma ve karıştırma aşaması başlangıç kademesi olarak kabul edilmiştir. Bu aşamada, metal tozlara alaşım elementleri eklenerek, uygun karıştırıcı yardımı ile malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirilebilmektedir (Akın, 2006). Karışım oluşturmadan önce tozlar dikkatlice tartılır ve yağlayıcılar eklenilir, bu işlemlerden sonra karıştırma makinesinde karıştırılmaktadır. Karıştırılan tozların tane boyutları ve biçimleri eklenen alaşım miktarı ve kalitesini önemli derecede etkilemektedir.

Yağlayıcıların eklenmesi ön şekillendirme, kalıplama ve zımbalama aşınmalarını azaltacak, bundan dolayı tozların şekillendirilmesi kolaylaşacak ve malzeme kalıptan

kolayca çıkarılabilecektir. Karıştırıcı türü, karıştırma süresi ve karıştırma devri gibi faktörler karışımın kalitesini etkileyen parametrelerdir. Karıştırıcılar genellikle elektriksel ve fazladan oluşan yağlanmayı gidermek için bilyalı değirmenler veya atritör değirmenleri kullanılmaktadır. Karıştırma süresi, karışımın homojen dağılması için önemli olmaktadır. Genellikle karıştırma süresi malzemenin türüne göre değişmekle beraber belirli bir süreden sonra karışımın süresi etkili olmayacaktır (Sağırlı, 1990).



Şekil 3.1.1. Toz partiküllerin bilyalı karıştırma değirmeni

3.2. Toz partiküllerinin Preslenmesi

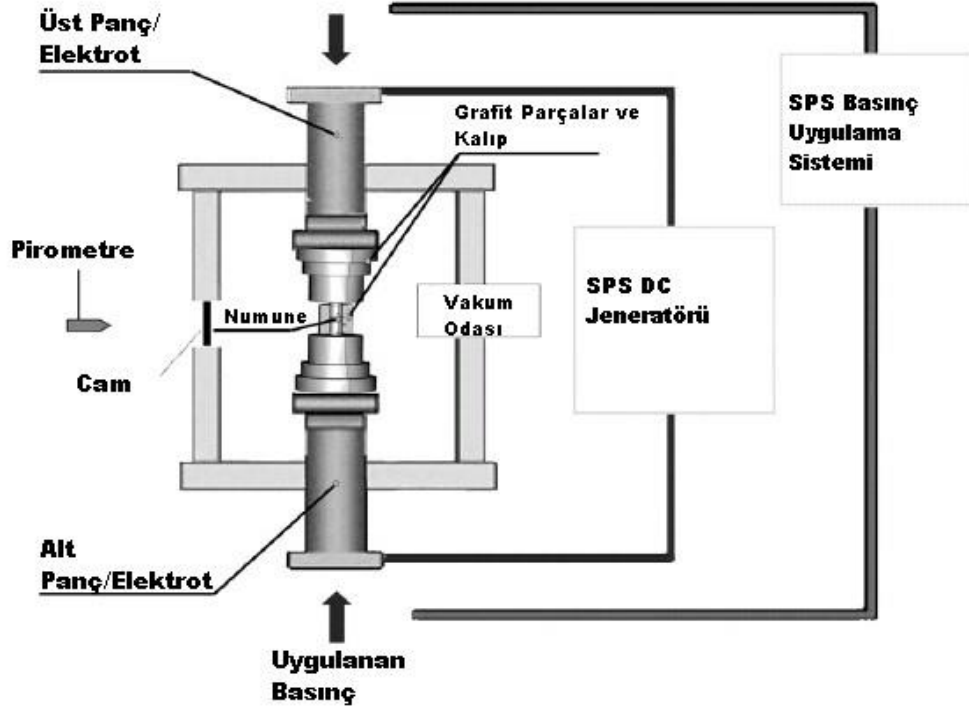
Toz preslemenin temel amacı, malzeme veya alaşımlara ham yoğunluk ve dayanım özelliklerini kazandırmaktır. Presleme, belirli yük altında serbest halde bulunan toz parçacıklarını istenilen şekille ve biçime ulaştırmak için toz halindeki parçaları kaynaklama işlemi olarak tanımlanmaktadır. Farklı presleme teknikleri olmakla birlikte en yaygın sıkıştırma yöntemi bir metal kalıp içerisinde 300-800MPa arasındaki herhangi bir (malzeme türüne bağlı olarak) basınç altında genellikle aksenal presleme yapılmaktadır. Bu üretim tekniği ile üretilen malzemelerin dayanımı; presleme ve sinterleme yapıldıktan sonraki yoğunluklarını doğrudan ilgilendirmektedir. Sıkıştırma sırasında tozlar, kalıba

doldurulurken sadece yerçekimi etkisiyle düzensiz ve rastgele köprücükler kurularak dökülmektedirler. Bu işlem yapılırken toz parçacıkları arasında boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukları gidermek için kalıbı titreterek toz partiküllerinin homojen dağılımını sağlamaktır. Bu aşama paketlenme aşaması olarak adlandırılırken, bu aşamadan sonra kalıp veya presleme makinesinin hareket etmesi sonucunda toz metaller sıkıştırılmaya alınmaktadır. Belirtilen basınç aralıklarında toz parçacıkları önce elastik deformasyona sonrada plastik deformasyon (şekil değiştirme) geçirmektedirler. Deformasyon geçiremeyen metaller (sünek malzemeler) kırılmaya uğrarlar. Kayma deformasyonu, malzemenin yüzeyindeki parçacıkların hareket etmesi sonucu meydana gelen şekil değişimleri, malzeme yüzeyindeki toz parçalarının simetrik ve asimetrik kuvvetlerinin sonucunda meydana gelmektedir. Deformasyon sonucunda toz parçacıkları birbirlerine bağlanarak gruplar oluştururlar. Diğer bir taraftan da malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakalarını kırmaktadırlar. Gerçekleşen bu olaylara deformasyon aşaması denilmektedir.

Toz partiküllerinin birbirine bağlanması sırasında şekil değişimine uğramış olan toz partiküllerinin arasındaki mesafeden toz partiküllerinin birbirine bağlanma alanları da artmış olmaktadır. Bu toz partiküllerinin Sıkıştırma sonucu adhezyon kuvveti artan ve deformasyon yeteneği kalmayan toz partikülleri soğuk kaynak olmaktadır. Bu işlemler gerçekleştikten sonra sıkıştırma aşaması tamamlanmıştır (Palacı, 2001; Sağırılı, 1990).

Spark Plazma Sinterleme Yöntemi: Sıcak presleme üretim yöntemine benzer şekilde malzemelere yüksek sıcaklıkta dikey kuvvet uygulanarak sıkıştırılması, yoğunlaştırılması, sinterlenmesi ve malzemelerin birleştirilmesi sistemidir. Spark plazma sinterleme yönteminde deney malzemesinin ısıtılması işlemi, numunenin alt üst tarafından temas eden grafit kalıplar yardımı ile enerji ileten üretim yöntemidir (Üstünova, 2012). Bu üretim sistemi yüksek elektrik akımı, toz partikülleri arasından geçerek dakikada 500°C'ye ulaşabilmektedir. Bu ısıtma sayesinde diğer üretim yöntemlerine göre düşük sinterleme sürelerine ulaşmamızı sağlamaktadır. Spark plazma sinterleme yöntemiyle seramik, kompozit ve metalik malzemeler dışında termoelektrik yarı iletken parçaların ve polimer malzemelerin sinterlenme işlemlerini mümkün hale getirmektedir. Bu üretim yöntemi yüksek toz yoğunlaşması elde etmek için darbeli doğru elektrik akımı ve tek taraflı basınç ile birlikte uygulanmaktadır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi toz partikülleri grafit kalıplara yerleştirilmektedir. Spark plazma sinterleme işlemi, basınç uygulanarak doğrudan akımının

çok kısa zamanlı açılıp kapanması ve kesikli akım sinterleme işlemidir. Toz partikülerine, doğru akımın (kesikli) tekrarlı açılıp kapanması, numunede bölgesel yüksek sıcaklıklı ısınma noktaları oluşturmalarını sağlamaktadır (Üstünova, 2012).



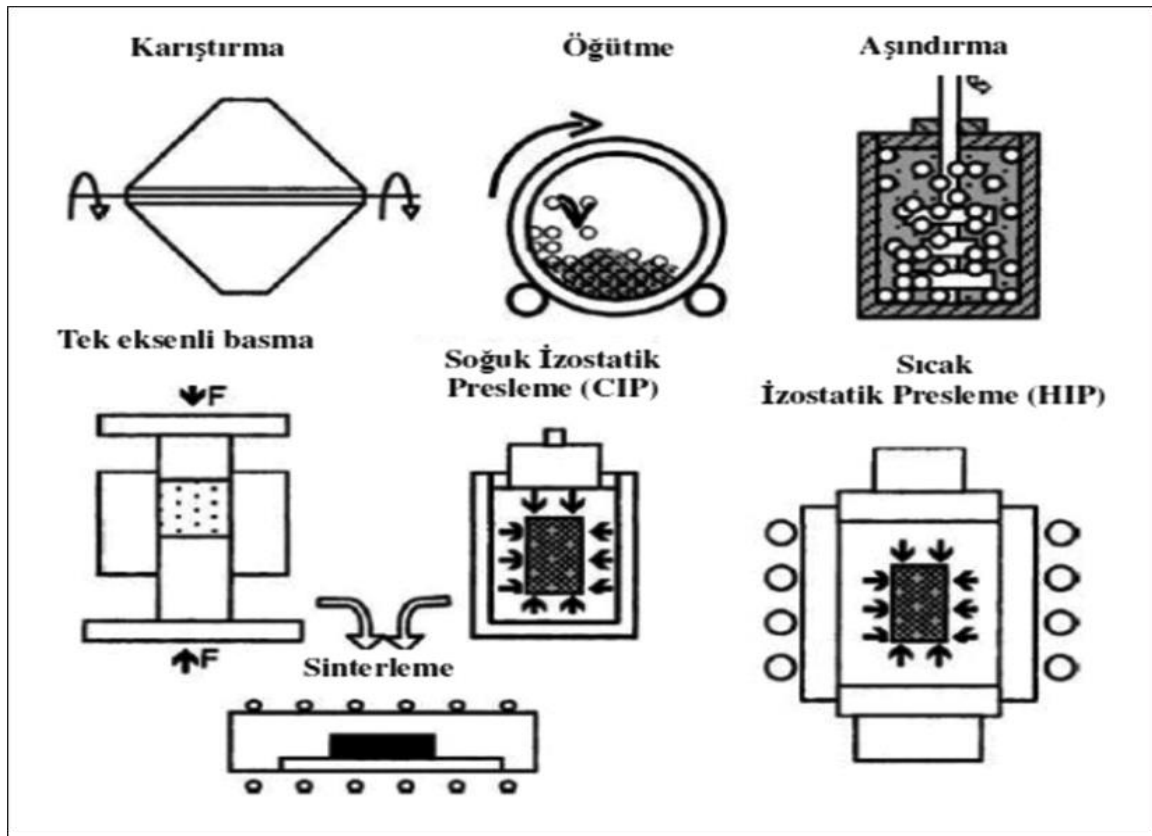
Şekil 3.2.1. Spark plazma sinterleme üretim yönteminin şematik gösterimi (Üstünova, 2012)

Spark plazma üretiminin avantajları: Sinterleme zamanının kısa olması (5-20dk.), yüksek sıcaklıktan dolayı daha temiz parça yüzeylerinin oluşumu, daha yüksek ısıtma-soğutma hızları (30000 °C/saat), daha kolay üretim yapılabilmesi, tane büyümesinin düşük olması (Üstünova, 2012).

Çift Etkili Presleme: Bu presleme yönteminde kalıp sabit, alt ve üst kuvvet uygulayan kısımlar hareketli olan pres uygulama yöntemidir. Bu yöntem ile yüksekliği daha fazla olan ve tek aşamalı parçaların sıkıştırılmasında kullanılır. Bu yöntem ile ince parçaların üretimi de yapılabilir. Yöntemin özelliği ise parça içinde yoğunluğun homojen veya homojene yakın olmasıdır.

İzostatik Presleme: İzostatik preslemede sıkıştırma basıncı gaz ya da sıvı ile yapılmakta olup parçanın her tarafına eşit bir şekilde uygulanmaktadır. Bunun nedeni her taraftan eşit yoğunluk, büzülme ve mukavemet sağlamaktır.

Sıcak Presleme: Bu yöntemde malzeme parçalarının preslemesi ve sinterleme işlemleri bir arada gerçekleştirilir. Bu yöntem toz şeklindeki parçalar ya da daha önceden şekillendirilmiş metal malzemeler preslenmektedir (Sağırlı, 1990; Akın, 2006). Sıcak Presleme üretim yönteminin geleneksel toz pekiştirme yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar; tek seferde tozların preslenmesi, presleme ve sinterlenme olayını aynı anda gerçekleştirebilmesi, sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulanması, birçok alanda kullanılan dayanıklı iş parçalarının teorik yoğunluğa ulaşılabilmesinden dolayı bu üretim yönteminin avantajları arasında sayılmaktadır (HPP 1998).



Şekil 3.2.2. T/M üretim yöntemiyle kompozit malzeme üretim görüntüsü (Torralba at el. 2003, Tekmen 2006)

Sıcak Presleme tekniğinin kullanıldığı uygulama alanları şunlardır;

- Hafif kompozitler
- Manyetik kayıt başları
- Aşınmaya dirençli malzemeler
- Yüksek performans manyetikleri
- Yarı iletken kaplama hedef malzemeleri
- Yapay implantlar
- Zırh delici malzemelerin üretilmesinde kullanılması ve benzeri alanlar şeklinde sıralanabilir (Ergün 2006).

Bu üretim tekniğinde presleme ve sinterleme işlemi aynı anda yapıldığından tekrardan sinterleme işlemi gerektirmeyebilmektedir. Ayrıca iç yapısı düzgün çıkan malzemelerin, yoğunluğu yüksek, daha az maliyet ve oksitlenmeyen seramiklerin üretilmesinde sıcak presleme tekniğinin avantajları arasında sayılmaktadır (Somunkıran vd. 2011). SP yönteminin dezavantajı sürecin yavaş işlemesi, kullanılan kalıp malzemesi nedeni ile sıcaklığın kontrolünün zor olmasındandır.

4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum alaşımları; magnezyum, silisyum, bakır, mangan, titanyum, kalay olmakla birlikte bu elementler alüminyum alaşımları olarak en çok kullanılan metaller olarak gösterilebilmektedir. Fakat alüminyum elementlerine alaşım olarak çok fazla sayılabilecek element ve bileşikler bulunmaktadır. Birçok özellik ve faktörlerden dolayı oluşabilecek şartlardan bağımlı ve bağımsız alaşımlar oluşmaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri alüminyum elementinin Al^{+1} , Al^{+2} , Al^{+3} elektron gruplarıyla alaşım oluşturmamasından dolayıdır. Yapılan araştırmalara bağlı olarak alüminyum elementinin yansıtma alaşımlarının başında gelen ve bunun sebebinin dünyada bulunma çokluğundan kaynaklanmaktadır. Kalay alüminyum alaşımları bazı makine parçalarında sürtünmeyi azaltmak için kullanılmaktadır. Kalay ergime sıcaklığı düşük olduğundan ($232^{\circ}C$) alaşım içerisinde kolayca yayılmaktadır. Yatak ve burç malzemesi olarak kullanılmakta olup, bu çalışma şartlarında aşırı ısındığından sürtünen yüzeylerde kısa süreli yağlama sağlamaktadır (Berker Işık, 2021).

4.1. Alüminyum Alaşım Serileri ve Simgeleri

İşlenebilir alüminyum ve alüminyum alaşımları için dünyada en çok kullanılan simgeleme dizisi Amerikan Standartlar Birliğinin belirlediği simgelemedir. Amerikan Alüminyum Birliği tarafından kullanılan bu simgeleme 1957’de standart hale getirmiştir. Bu standartlaşmış simgelerde dört rakam kullanılan bir sayılma çizelgesine çizilmiştir. Bu dört rakamlı sayısal simgenin birinci rakamı, hangi alaşım elementi içeren alüminyum alaşımı olduğunu göstermektedir (Deschams, at el. 2001; Durmuş, vd. 2009).

1XXX serisi, sağdan ilk iki rakam saf alüminyumun %99,00’ünü belirtirken, Sağdan ilk iki rakam da alüminyum arılık değerini belirtmektedir. 1XXX dizisindeki soldan ikinci rakam ise (%99,00) özel olarak denetlenen saflık (empürite) elementlerinin oranını belirtir, 1’den 9’a kadar değişiklik göstermektedir. Örnek olarak 1062 numunesindeki alaşımın içinde bulunan saf alüminyum ve arılık değerinin en az %99,62 olduğunu belirtmektedir.

1062'deki 0 ise geri kalan %1,00- %0,62 = %0,38 içinde özellikle bilinen hiçbir elementin olmadığını göstermektedir.

Tablo 4.1.1. Alüminyum işlem alaşımlarında simgeleme dizisi (Deschams, at el. 2001)

Simge	Temel Alaşım Elementi
1xxx	Alaşımsız alüminyum
2xxx	Bakırlı alüminyum alaşımı
3xxx	Manganezli alüminyum alaşımı
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum + Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Kalay ve diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan dizi

2XXX ile 8XXX'e kadar olan element serisi tablo 3'de belirtilen alaşımlarla kullanılmaktadır. İlk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri simgeler. Özellikle bilinen alaşımların sayısı, 1 ile 9 arasındaki bir rakamla simge sayısının ikinci rakamı olarak kullanılır. 7065 örneğinde özellikle denetlenen hiçbir alaşım elementi bulunmayan bir Al-Zn alaşımını simgeler.

9XXX serisi yalnızca deneysel olarak geliştirilmekte olan elementler için kullanılmaktadır. Üretilmeye başlandıktan sonra da 9XXX serisinden alınır ve en uygun gerçek simge grubuna verilmektedir. Alaşım standartlaşana kadar serinin önüne X konulmaktadır. İşlenebilir alüminyum alaşımları; ısıtılabilir ve ısıtılmayan alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılırlar (Deschams, at el. 2001, Durmuş, vd. 2009). Isıtılabilir alaşımlar ve özellikleri artırılabilen 2XXX, 4XXX, 6XXX, 7XXX alaşımlı serilerdir.

3XXX ve 5XXX serilerine ısıtıl işlem uygulanamamaktadır. Bu iki serinin ısıtıl işlem tabii tutulmamasının sebebi bileşimlerindeki mangan ve magnezyumdan kaynaklanır. Bu iki seri alaşım soğuk işleme uygulanarak gerilim sertleşmesine uğratılırlar. Döküm veya sınıflandırmak için elde edilen alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıtıl işlem şekillerine ek olarak verilen bir veya birkaç harf ile tanımlanmaktadır (Durmuş, vd. 2009).

Tablo 4.1.2. Üretilen malzemelere uygulanan bazı temel işlemler

Simge	Temel işlem
F	Fabrikasyondan sonraki hali
O	Tavllanmış- Yalnızca işlenir alaşımlar
H	Rekristalizasyon temperleme sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı
W	Çözelti, ısıtıl işlemi uygulanmış- doğal yaşlananlar
T	F, O ve H dışındaki etkileri meydana getirmek için ısıtıl işlem görmüş

5. KALAY VE ALAŞIMLARI

Kalay atom numarası 50 olan iki allotropa sahiptir. Beyaz renkli olan kalay tetragonal kafes yapısından dolayı kolayca soğuk şekillendirilebilmektedir. Bu tetragonal kristal kafesi sayesinde (13°C'den 232°C'ye kadar) kararlıdır, bu sıcaklık altındaysa kübik hale dönüşmektedir. Kalay erime noktası düşük metal olarak, oda sıcaklığının (25°C'nin altında) bile yeniden kristalleştiği olduğu için çekme, haddeleme, presleme gibi şekillendirme işlemleri uygulandığında pekleşme gerçekleşmez. En çok kullanılan kalay alaşımları yumuşak lehimler ve yatak metalleridir. Kalay en fazla Güney Doğu Asya ve Bolivya'da bulunmakta olup, cevher zenginleştirme işlemleri genelde çıkarıldığı ülkede yapılmaktadır. Dünyada yaklaşık 300.000 t/yıl olan tüketimin 250.000 tonu yeryüzünden karşılanırken, 50.000 tonu geri dönüşümden kazandırılmaktadır ([www. Uslularhade.com](http://www.Uslularhade.com)).

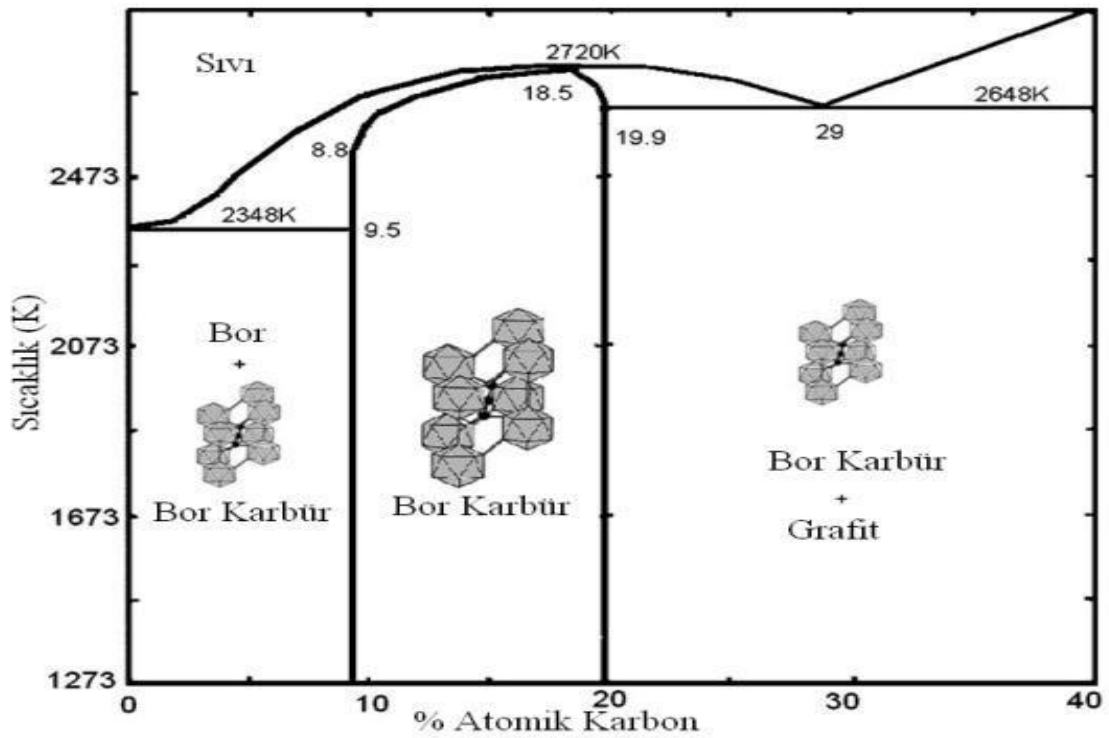
Tablo 5.1. Kalay elementinin genel özellikleri tablosu (tr.wikipedia.org)

Görünüş	Gümüşümsü gri
Kütle numarası	118,710(7) g/mol
Elektron dizilimi	Kr 4d10 5s2 5p2
Yoğunluk	(beyaz) 7,265 g/cm ³
Sıvı hâldeki yoğunluğu	6,99 g/cm ³
Ergime noktası	505,08 °K - 231,93 °C
Kaynama noktası	2875 °K - 2602 °C
Kristal yapısı	Tetragonal
İyonlaşma enerjisi	708,6 kJ/mol
Atom yarıçapı	145 pm
Isıl iletkenlik	66,8 W/(m·K)
Isıl genleşme	22,0 µm/(m·K) (25°C'de)
Mohs sertliği	1,5
Brinell sertliği	51 MPa

Bu zamanda birincil kalay yataklarından çıkarılan element sadece kalay olması halinde işletilebilir olarak kullanılmaktadır. Bu birincil %1-1,5 kalay elementinin yanında Pb, W, Cu, Ag gibi elementlerin eldesi söz konusudur. Kalay, (%99,8) A sınıfı, (%99,95-99,98) elektrolitik Sn, (%99,6) sert kalay, teknik kalay (%99) olarak sınıflandırılmaktadır. Kalay alaşımlarının en önemli bileşiği, bakır ile yaptığı bronz renkli, (%10-5 kalay) içeren antimuan ve bakırla yaptığı babbitt beyaz renkli metallerdir. (ASTM) American Society of Testing and Materials 1982-1984 yıllarında, en iyi A sınıfı kalay eldesi için; en az kalay %99,85 ve %0,030 en fazla bizmut içerebilir, sınırlaması getirmiştir. Alaşımlı lehimler; (%95 kalay, %5 antimuan), (%95 kalay, %5 gümüş) ve (%70 kalay, %30 kurşun) karışımlarından elde edilmektedir.

6. BORKARBÜR FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Yerkürede bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra şu an kullanılan ve bilinen en sert üçüncü malzemelerdendir. Yüksek sertlik ve ergime sıcaklığı, yoğunluğu düşük, kimyasal malzemelere direnç göstermesi ve mekanik özellikleri nedeni ile B_4C ileri teknoloji malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerinden dolayı bor karbür koruma malzemesi ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Üstünoğlu, 2012). Kimyasal bileşimi kararlı olması nedeni ile asit ve bazlar ile tepkimeye girmemektedir. Karbür ve nitrürler buharlaşıpken bor karbür farklı özellik göstererek $2450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de eriyerek sıvı hale geçmektedir. Bor-karbon sistemindeki tek bileşik bor karbürdür.



Şekil 4.1. Bor-Karbon ikili denge diyagramı (Üstünoğlu, 2012)

Yüksek verimli bor karbür için B/C oranını çok iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Üretilen bor karbürde en iyi sertlik elde etmek için B/C oranının 4 olması gerekmektedir. Bu bor-karbon oranı miktarı geçildiğinde malzemenin sertliğinin düşmesine neden olmaktadır (Üstünova, 2012).

6.1. Sertlik

Bor karbürün sertliği 20 ila 78 GPa arasında olan bor karbür bileşiği için vickers sertliği 32 GPa olarak kabul edilmiştir. Bor karbür sertliğini yüksek sıcaklıklara dayanmış olup, yapılan çalışmalarda 1300 °C'ye kadar sertliğinin değişmediği gözlemlenmiştir (Üstünova, 2012).

6.2. Aşınma Dayanımı

Bor karbürün yüksek sertliğinden dolayı aşınma direnci de yüksek çıkmaktadır. Bor karbürün aşınma dayanımı diğer sert malzemelerin aşınma dirençleri ile karşılaştırıldığında elmas 0,613 ile aşınma dayanımı en yüksek bor karbür 0,422, silisyum karbür 0,314 olarak değerlendirilmiştir (Üstünova, 2012).

6.3. Yoğunluk

Bor karbürün yoğunluk değeri bor ve karbon oranına bağlı değişiklik gösterir, misal B_4C 'ün yoğunluğu $2,52 \text{ gr/cm}^3$, $B_{13}C_2$ 'ün yoğunluğu $2,488 \text{ gr/cm}^3$ ve $B_{10,5}C$ 'ün yoğunluğu $2,465 \text{ gr/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Malzeme içerisinde bor oranının artması alaşım yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Yoğunluğunun azalmasının nedeni borun atom ağırlığının karbon atom ağırlığından daha az olmasından kaynaklanmaktadır (Üstünova, 2012).

6.4. Elektriksel Direnç

Elektriksel direnç açısından bor karbür, 0,2-10 ohm.cm elektriksel dirence sahiptir. Bor karbürün elektriksel direnci yüksek sıcaklıklarda düşmektedir. Örnek olarak 25°C sıcaklıkta 10 ohm.cm elektriksel direnç oluşurken 1600°C sıcaklıkta 0,2 ohm.cm'e kadar

düştüğü görülmüştür. Bor karbürün diğer özellikleri gibi karbon-bor oranı ilavesine göre değişiklik göstermektedir (Üstünoğlu, 2012).

6.5. Mekanik Özellikler

Bor karbür bileşiği mukavemet-yoğunluk yapısından incelendiğinde çok önemli bir malzeme grupları arasında gösterilmektedir. Bunun nedeni yüksek mukavemetin kristal yapıdaki atomların kovalent bağlarla oluşmasından kaynaklanmaktadır. Sıcak presleme ve mikro yapı bor karbürün mukavemet değerlerini etkileyen faktörler olup, bor elementini alaşımlara eklemek mukavemet değerlerini artırmaktadır. Sıcak preslenen malzeme numuneleri 300-500 MPa arasında eğme mukavemetine uğratılmaktadır. 600-1000°C sıcaklıklar arasında yapılmış olan eğme deneylerinde oksitlenmeden dolayı bor karbürün mukavemeti azalmaktadır. Mukavemet kaybını engellemek için alaşıma Si ve Al elementleri katılmaktadır. Bu alaşım eklemeleri oksitlenmeyi engelleyerek yüksek sıcaklıklardaki bor karbürün mukavemet kaybını önlemektedir.

Tablo 6.1. Bor karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri özet halinde sunulmuştur. (Karadağ, 2017)

Mol Ağırlığı	55,25 gr/mol
Renk	Siyah
Teorik Yoğunluk	$2,52 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$
Ergime Sıcaklığı	$2470 ^\circ\text{C}$
Kristal Yapısı	Rhombohedral
Termal iletkenlik katsayısı	28-16 K(W/m.K)
Mikro sertlik	31,5 GPa
Young Modülü	427 GPa
Poisson Oranı	0,17-0,21 ν
Eğme Mukavemeti	340 MPa
Basma Mukavemeti	1660 MPa
Çekme Mukavemeti	73 MPa
Kırılma Tokluğu	$2,9\text{-}3,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
Elektriksel Direnç	$\sim 1000 \rho \cdot 10^8 (\Omega\cdot\text{m})$

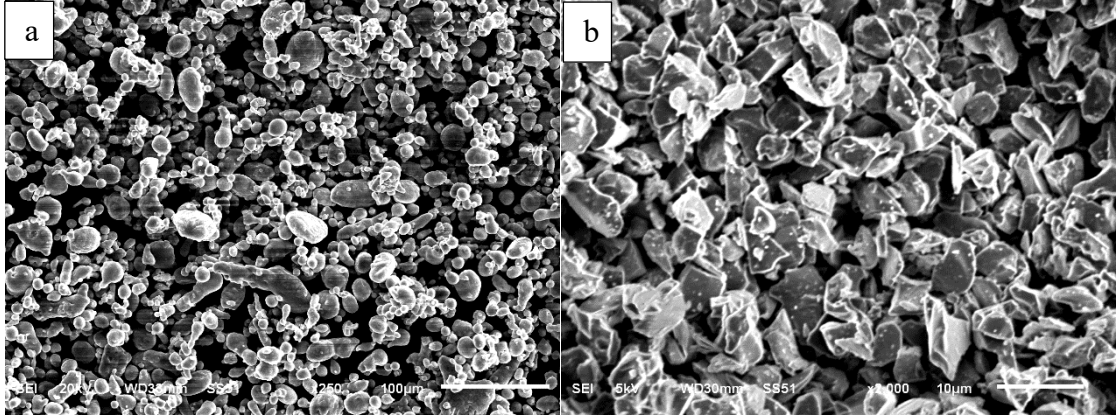
7. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler, aşağıdaki şemaya göre uygulanmıştır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Deneylerin yapım aşamalarının sırası verilmiştir

Deneyisel çalışmalarda, Sigma-Aldrich'ten temin edilen, saflık derecesi %99'un üzerinde olan Al, Sn ve B₄C tozları kullanılmıştır. Al tozunun partikül boyutu 30 µm, Sn tozunun 10 µm ve B₄C tozunun partikül boyutu 5 µm'nin altındadır. Şekil 7.2'de, Al ve B₄C tozlarının SEM görüntüleri sunulmuştur. Al tozunun küresele yakın bir morfolojiye sahip olduğu; B₄C tozunun ise keskin köşeler içeren düzensiz şekilli parçacıklardan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan Alüminyum ve B₄C tozunun SEM görüntüleri; a) Al tozu, b) B₄C tozu

Hazırlanan kompozit toz karışımları ağırlıkça kimyasal bileşimleri % cinsinden Tablo 7.1'de verilmiştir. Bu hesaplamalar, matrisi oluşturan Al-Sn alaşımında kalay oranının %15'te sabit kalacağı şeklin de yapılmıştır. Diğer bir ifadeyle garklı oranlarda B₄C takviyesi yapılarak Al-15Sn alaşım matrisli kompozitler için toz karışımları hazırlanmıştır.

Tablo 7.1. Üretilen kompozit malzemelerin ağırlıkça % olarak kimyasal bileşimleri

Numune Adı	Al	Sn	B ₄ C
Al15Sn-5B ₄ C	80,75	14,25	5
Al15Sn-10B ₄ C	76,5	13,5	10
Al15Sn-15B ₄ C	72,25	12,75	15
Al15Sn-20B ₄ C	68	12	20

Tablo 7.1'de belirtilen karışımları elde edebilmek için, tozlar 10⁻⁴ hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra çelik bilya eklenerek, Şekil 7.3'te gösterilen turbula karıştırıcıda 100 boyunca dakika karıştırılmıştır.



Şekil 7.3. Turbula Karıştırıcı

Karıştırılan tozlar, argon gazı atmosferinde 580°C sıcaklık ve 34 MPa basınç altında, Şekil 7.4'te gösterilen grafit kalıplar kullanılarak 4 dakika boyunca spark plazma sinterleme (SPS) ünitesinde sinterlenmiştir.



Şekil 7.4. Presleme sırasındaki değerlerin kontrol edildiği ünite ve çıkan numenlerin fotoğrafları



Şekil 7.5. SPS işleminin yapıldığı makine

Hazırlanan toz karışımlarının ulaşabilecekleri teorik yoğunluklar karışımlar kuralına (rule of mixtures) göre hesaplanmıştır (Denklem 1). Üretilen numunelerin yoğunlukları, yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak 0,0001 hassasiyetli terazide Arşimed prensibine göre ölçülmüştür (Denklem 2). Numunelerin Arşimed prensibine göre elde edilen yoğunluk değerleri teorik yoğunluk değerlerine bölünerek bağıl yoğunluk değerleri hesaplanmıştır (Denklem 3).

$$\text{Theoretical density (g.cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Total mass}}{\text{Total volume}} = \frac{(\text{Al mass}) + (\text{Sn mass}) + (\text{B4C mass})}{\left[\frac{\text{Al mass}}{\text{Al density}}\right] + \left[\frac{\text{Sn mass}}{\text{Sn density}}\right] + \left[\frac{\text{B4C mass}}{\text{B4C density}}\right]} \quad (7.1)$$

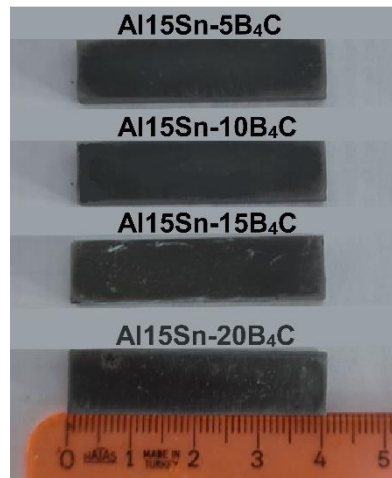
$$\text{Measured density (g.cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Weight in the air}}{(\text{Weight in the air}) - (\text{Weight in the water})} \quad (7.2)$$

$$\text{Relative density (\%)} = \frac{\text{Measured density}}{\text{Theoretical density}} \times 100 \quad (7.3)$$



Şekil 7.6. Zımpara ve parlatma makinesi

Zımparalama işlemi, SiC zımpara kağıtları kullanılarak sulu ortamda, Şekil 7.5'te gösterilen zımpara ve parlatma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi için 1 μm 'lik elmas süspansiyon kullanılmıştır. Mikroyapı incelemesi için metalografik numune hazırlama işlemi sonrasında numuneler 1,5 ml HCl (1,5%), 2,5 ml HNO₃ (2,5%), 1 ml HF ve 95 ml H₂O karışımından oluşan solüsyonla dağlanmıştır (Şekil 7.6).



Şekil 7.7. SPS'de hazırlanan numuneler

Mikrosertlik ölçümleri, Vickers yöntemiyle AOB marka cihazda 300 g yükün 15 saniye uygulanması ile yapılmıştır (Şekil 7.7).



Şekil 7.8. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

Üç nokta eğme testi, Şekil 7.8'de gösterilen Shimadzu marka 50 kN'luk test cihazında, 1 mm/dak hız ve her bir kompozisyon için 3'er numune kullanılarak yapılmıştır.

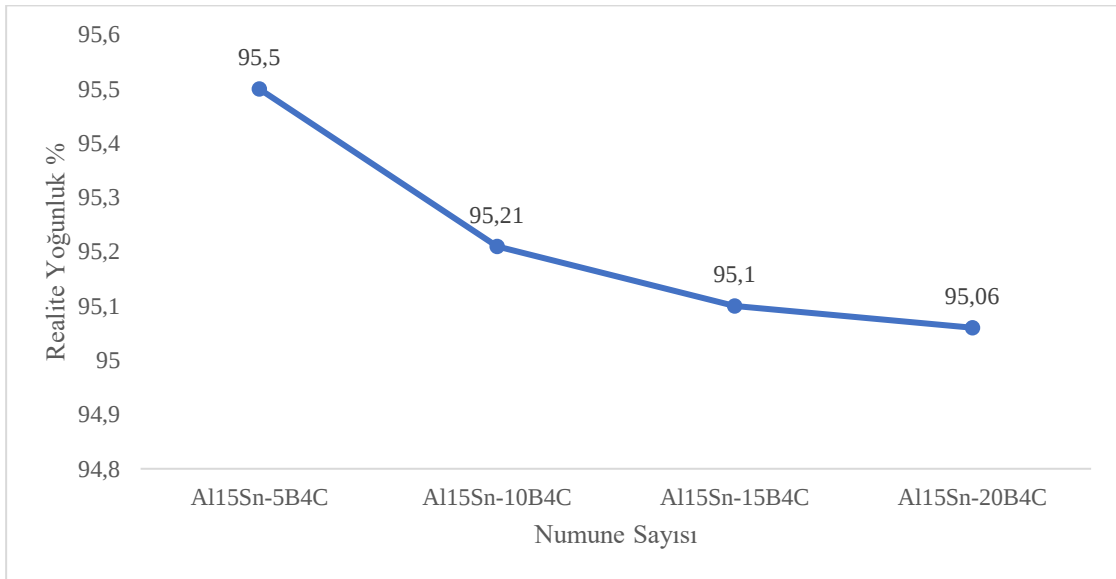


Şekil 7.9. Üç nokta eğme test cihazı

XRD analizi, 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızıyla ve Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$) kullanılarak Rigaku marka Miniflex 600 cihazında yapılmıştır. SEM ve SEM/EDS incelemeleri ise, JEOL JSM 6510 taramalı elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, SPS yöntemiyle üretilen numuneler yaklaşık %95 bağıl yoğunluk değerlerine ulaşmıştır. Hesaplanan bağıl yoğunluk değerleri, Şekil 7.1'de grafik olarak sunulmuştur. Ayrıca, yoğunluk ve bağıl yoğunluk değerleri Tablo 7.1'de gösterilmiştir. Bağıl yoğunluklar arasında belirgin bir fark bulunmamakla birlikte, en yüksek yoğunluk %95,50 ile Al15Sn-5B₄C numunesinde elde edilmiştir. B₄C oranının artışıyla birlikte yoğunluk değerlerinde lineer bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumun, artan matris-takviye fazı ara yüzeyinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Jain et al. (2016) ise, Al-Cu alaşımı B₄C kompozitlerinin deneysel yoğunluğu, artan bor karbür partikül takviyesi ile azalmıştır. Bu durum, yüksek takviye içeriklerinde düşük ıslanabilirlik etkisi ve matrisli B₄C parçacık arayüzlerinde gözenek oluşumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Yener vd. (2015), soğuk presleme yöntemiyle üretilen ağırlıkça %3'e kadar B₄C takviye edilmiş kompozitlerde, takviye içeriğindeki artışla birlikte bağıl yoğunluk değerlerinin azaldığını belirtmiştir. En yüksek yoğunluk (%93,8), takviye içeriği ile ağırlıkça %1 olan kompozitte elde edilmiştir. Tez çalışmasında, SPS yöntemi sayesinde Yener vd. (2015) çalışmasına kıyasla oldukça yüksek bağıl yoğunluk değerleri bulunmuştur.



Şekil 8.1. Ölçülen numunelerin yoğunluk grafiği

Tablo 8.1. Yoğunluk değerleri

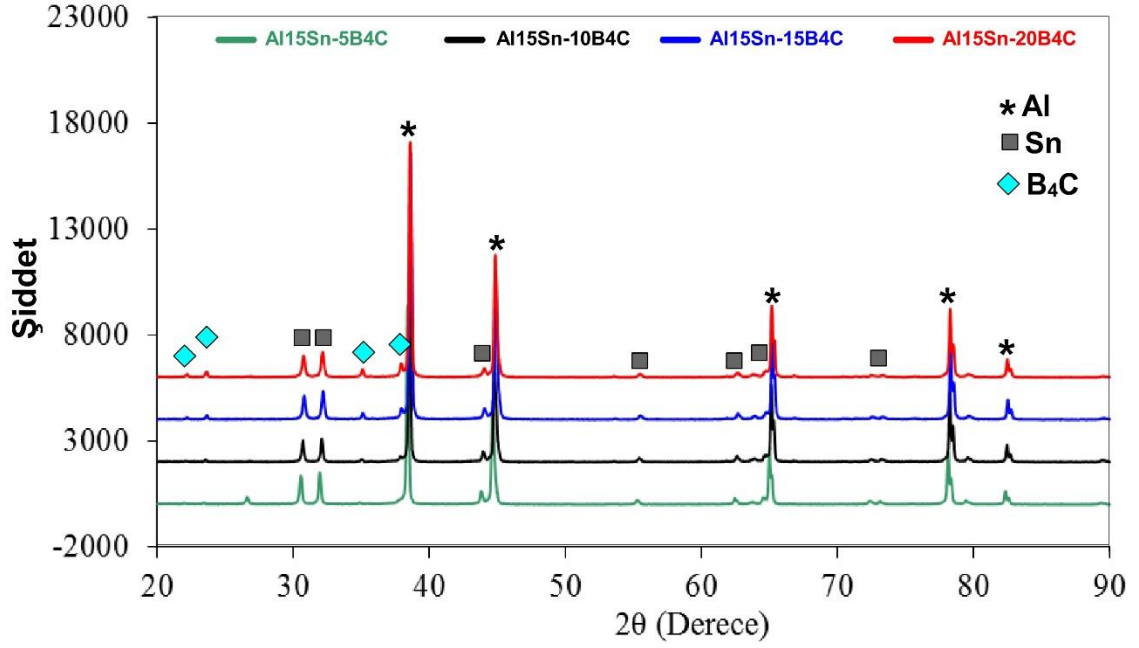
Malzemeler	Yoğunluk değerleri gr/cm ³	Relative yoğunluk (%)
Al15Sn-5B ₄ C	2,68531	95,50
Al15Sn-10B ₄ C	2,78125	95,21
Al15Sn-15B ₄ C	2,73443	94,10
Al15Sn-20B ₄ C	2,72084	95,06

Şekil 7.2'de, kompozitlere uygulanan XRD analizlerinden elde edilen paternler sunulmuştur. Kırınım desenlerinde matris alaşımına ait Al ve Sn piklerinin şiddetinin artan B₄C oranına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte artan takviye fazı oranıyla birlikte B₄C fazına ait piklerin şiddetinde artış olduğu görülmektedir. SPS işleminin yüksek saflıktaki argon atmosferinde yapılmasına bağlı olarak XRD kırınım deseninde herhangi bir oksit bileşiğine rastlanmamıştır. XRD incelemeleri, bor karbürün ayrıştığını ve ayrıca kompozitlerin 850 °C'de Al₃BC bileşiği meydana geldiğini tespit etmiştir. SEM fotoğrafları, takviye partiküllerinin alüminyum matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir (Ghasali et al., 2015).

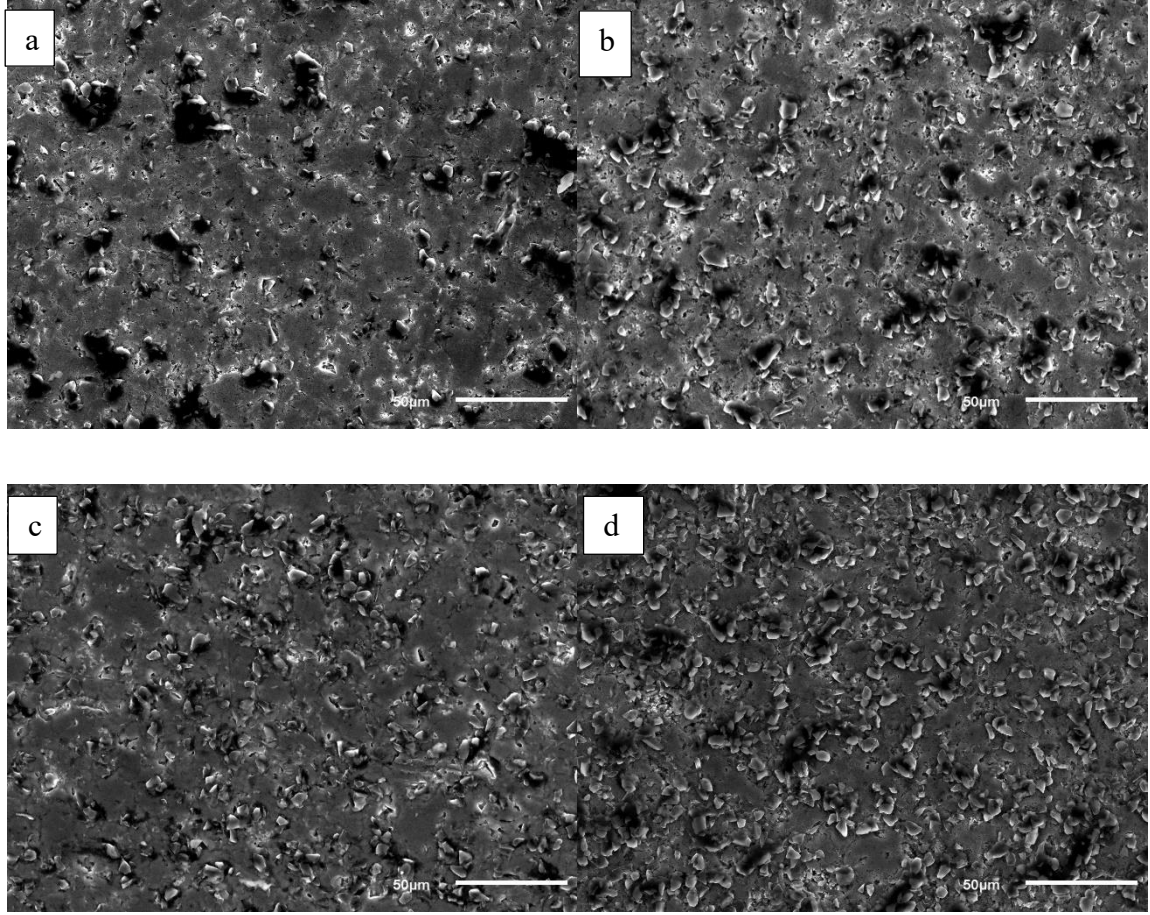
XRD analizinden, geleneksel yöntemle sinterlenen kompozitlerin AlB₂ intermetalik fazını sergilediği gözlenmiş, ve bunun 627 °C'den yüksek sinterleme sıcaklıklarında oluştuğu bildirilmiştir (Viala vd., 1999; Zhang vd., 2020). Geleneksel sinterleme işlemlerinde, kompozit tozlarının yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalması, matris ile takviyeler arasında reaksiyonları başlatan hızlı difüzyona yol açarak, mekanik özellikleri bozan ikincil fazların oluşmasına neden olmaktadır. Bazı çalışmalar, yüksek sıcaklıklarda oluşan ince Al₄C₃ çökeltilerin, tane sınırı hareketini ve tane büyümesini engellediğini ortaya koymuştur (Liu et al., 2018).

Tez çalışmasında gerçekleştirilen XRD analizleri, üretilen kompozit numunelerin hiçbirinde Al, Sn ve B₄C dışında başka bir faz bulunmadığını göstermiştir. Bu durum, B₄C'nin ara yüzeyde matrisle reaksiyona girmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Takviye fazı ve matris ara yüzeyinde herhangi bir intermetalik bileşiğin oluşabilmesi, meydana gelecek reaksiyon için yeterli sürenin sağlanması sonucu mümkün olabilir. SPS

işleminde sinterleme sıcaklığına çok çabuk ulaşıp, çok kısa süre beklenmesi reaksiyonlar için gerekli süreye izin vermemiştir. Literatüre göre de (Prieto vd., 2008; Ueno vd., 2009; Chu vd., 2010), kırılğan intermetalik fazların oluşumu yeterli zaman ve/veya ısı işlem gerektirmektedir. Başka bir deyişle, bu çalışmada üretim koşulları nedeniyle istenmeyen, özellikleri olumsuz etkileyen kırılğan intermetalik fazlar oluşmamıştır.



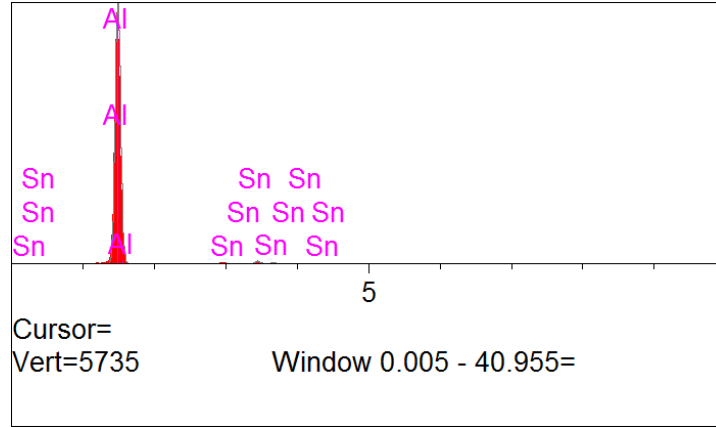
Şekil 8.2. Üretilen kompozitlerin XRD paternleri



Şekil 8.3. Numunelerin SEM görüntüleri; a) AlXSn5B₄C, b) AlXSn10B₄C, c) AlXSn15B₄C d) AlXSn20B₄C

Üretilen kompozitlerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.3'te verilmiştir. Takviye fazı genel olarak homojen bir dağılım sergilemekte, ancak artan takviye oranı ile birlikte homojenlik kısmen azalmaktadır. Bununla birlikte, yer yer porozitelerin olduğu tespit edilmiştir. Gözeneklerin daha çok takviye fazı çevresinde olduğu görülmektedir. Şekil 7.3'de, d numunesinde B₄C fazının kümелendiği açıkça gözlemlenmektedir. T/M teknikleriyle üretilen kompozit sistemlerinde, matris-takviye elemanı ara yüzeylerinde yetersiz bağlanmanın, üretilen kompozitlerin özelliklerini olumsuz yönde etkilediği rapor edilmiştir (Uddin et al., 2010; Efe vd., 2011; Prosviryakov, 2015).

Analysis Report: Image2-2



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
Al	Ka	9,011.32	77.659	92.694	wt.%	
Sn	La	109.28	11.007	7.306	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

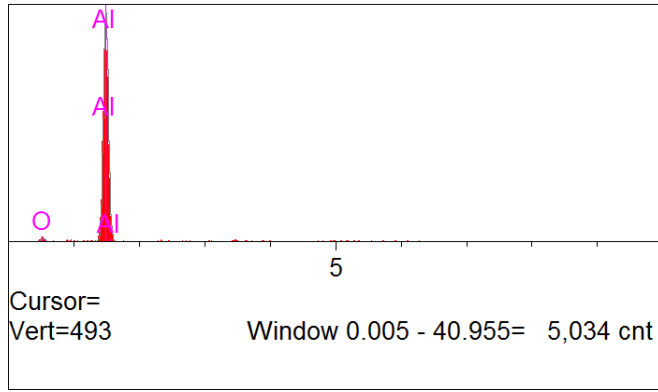
kV 20.0

Takeoff Angle 35.0°

Elapsed Livetime 6.0

Şekil 8.4. AlXSn₂₀B₄C numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler

Analysis Report: Image10-2



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	14.87	4.362	7.397	wt.%	
Al	Ka	1,125.36	34.091	92.603	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

kV 20.0

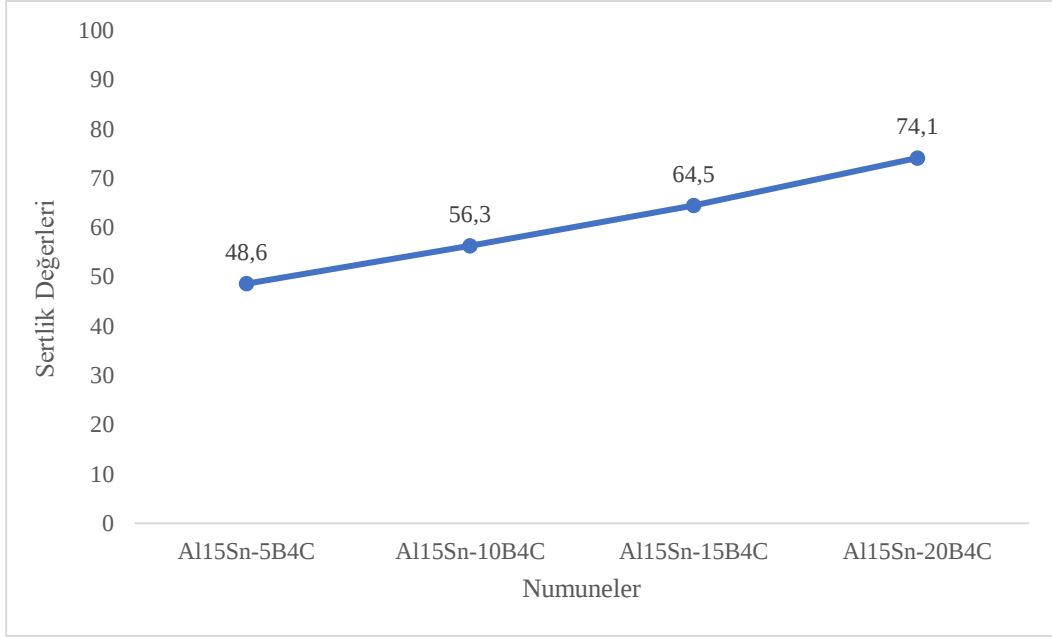
Takeoff Angle 35.0°

Elapsed Livetime 4.0

Şekil 8.5. AlXSn5B₄C numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler

Şekil 7.4 ve 7.5'de, numunelerden alınan SEM/EDS nokta analizine ait görüntüler verilmiştir. Al-15Sn-20B₄C kompozitinin matrisinden alınan EDS nokta analizi, bu bölgede ağırlıkça %92,6 Al ve %7,4 Sn bulunduğunu göstermiştir. Oksijen tespit edilmemiştir. Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenlerinde de herhangi bir oksit bileşiğine ait pik gözlemlenmemiştir. Al-15Sn-5B₄C numunesinde yapılan nokta analizinde ise %93 Al ve %7 oksijen bulunmuştur. Matris ve takviye partiküllerinin yoğunluk farkından dolayı aglomerasyonlar oluşmuş ve bu durum, eğme sonuçlarını

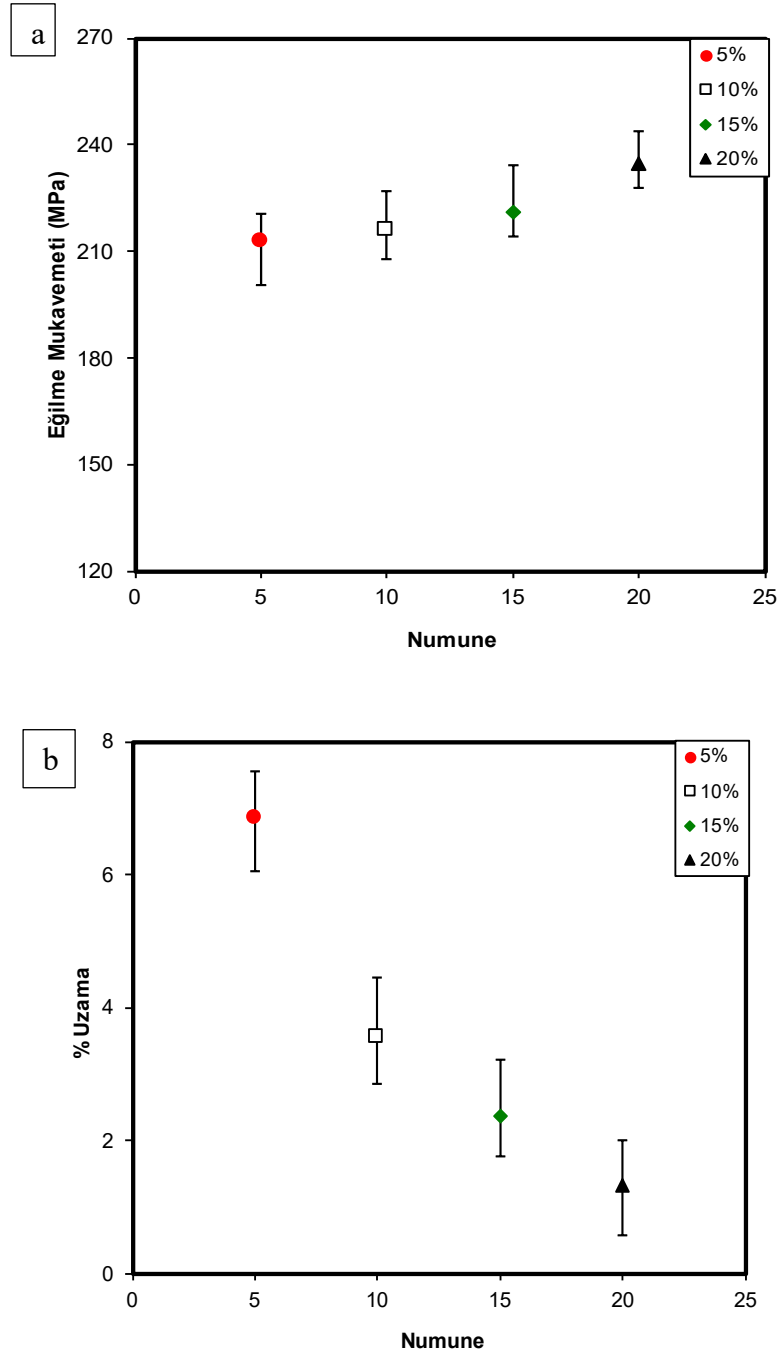
olumsuz etkilemiştir. Tayebi et al. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, matris ile takviyeler arasındaki arayüz bağının kompozitlerin mukavemetini belirlediği, gözenekler ve kümelenmelerin ise matris ile takviyeler arasındaki etkili bağlanmayı engellediği tespit edilmiştir.



Şekil 8.6. Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri

Şekil 8.6'da üretilen kompozit malzemelerin mikrosertlik değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Artan takviye oranı ile birlikte sertlik değerleri lineer olarak artmaktadır. En yüksek mikrosertlik değeri Al-15Sn-20B₄C numunesinde elde edilmiş olup, ortalama değeri 74,1 HV'dir. Balalan vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, en yüksek sertlik değeri %6,0 ağırlık oranında B₄C içeren Cu matrisli kompozitte elde edildiğini rapor etmişlerdir. Tariolle et al. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada ise bor karbür partikülleri etrafında yüzey bariyerinin oluşması ve B₄C ile eriyik alaşım arasındaki reaksiyon hızının düşük olması, sertliğin ısıtılma süresine bağlı olarak sınırlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Çelik vd. (2017) ise yaptıkları çalışmada, saf Al için en düşük sertlik değerinin 48,5 HV, en yüksek sertlik değerinin ise %16 takviyeli B₄C'li Al matrisli kompozitten 68,1 HV olarak ölçüldüğünü belirtmiş ve takviye oranının artmasının kompozitin sertlik değerini artırdığını rapor etmiştir. Kumar et al. (2021), B₄C'nin %10 hacim oranına sahip olduğu peletlerde 32,66 Brinell sertliği elde etmişlerdir. Sertlikteki artışın, normalde daha sert olan karbür formundaki refrakter toz eklenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca, yapılan sertlik testlerinde, kompakt malzemenin sertlik değerlerinin yoğunluk değerlerine kıyasla ters bir eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Sertlik değerlerinin, artan öğütme süresi, azalan matris boyutu ve artan B_4C oranıyla sürekli olarak arttığı görülmüştür. Islanabilirliğin, karıştırma döküm gibi sıvı faz yöntemleriyle metal matris kompozitler üretildiğinde ortaya çıkan bir sorun olduğu rapor edilmiştir. Gummadi et al. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, Al6082 ve B_4C metal matris kompozitlerinin sertlik özelliklerinin etkileşimi, toz metalurjisi esaslı işlenmiş MMC'lerin sertlik özellikleriyle ilişkilendirilmiş ve B_4C ağırlık oranlarına göre sırasıyla %0, 3, 6 ve 9'luk oranlarda sertlik değerlerinin sırasıyla 38, 45, 62 ve 74 HV olduğu belirtilmiştir. B_4C takviyelerinin artışının, sertlik özelliklerini güçlendirdiği açıkça görülmektedir. Yapılan çalışmanın mikrosertlik sonuçları, mevcut çalışmanın sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Ayrıca, mukavemet ve yüzde uzama şekillerde görüldüğü gibi artmıştır.



Şekil 8.7. Üretilen kompozit numunelerin; a) eğilme dayanımları, b) %uzama değerleri

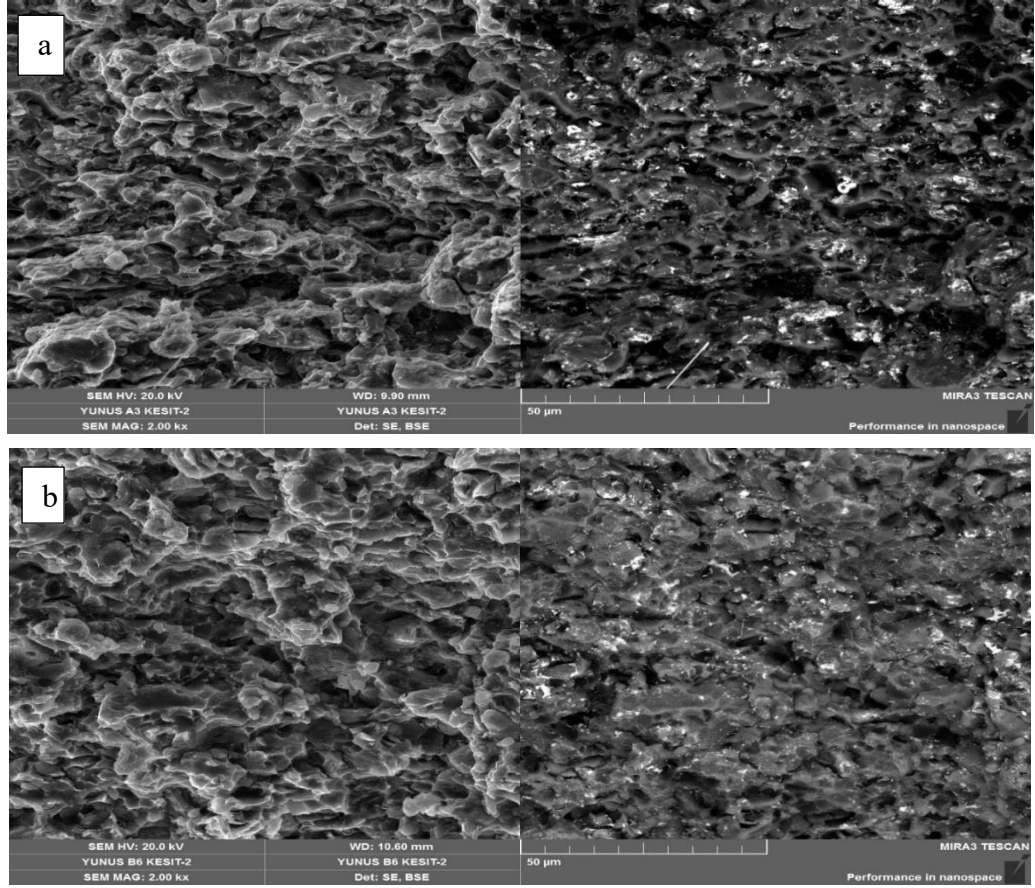
Şekil 7.7'de, üretilen kompozitlere uygulanan eğme testlerinden elde edilen ortalama gerilme-% uzama değerleri grafik olarak verilmiştir. En düşük eğme mukavemeti %5 B₄C takviyeli kompozitte yaklaşık 210 MPa olarak ölçülmüştür. B₄C takviye elemanının oransal artışıyla birlikte, mukavemet değerleri yaklaşık 210 ila 230 MPa arasında sınırlı bir artış gözlemlenmiştir. Ancak % uzama değerlerinde ise takviye oranının artmasıyla birlikte

düşüş gözlenmiştir. Al-15Sn-5B₄C numunesinde yaklaşık %7 olarak tespit edilen %uzama değeri, Al15Sn-20B₄C kompozitinde %2'nin altına düşmüştür. Bu durum, yoğunluk değerleri ve SEM analiz sonuçlarıyla uyumlu olup, eğilme mukavemeti ile % uzama değerlerini desteklemektedir.

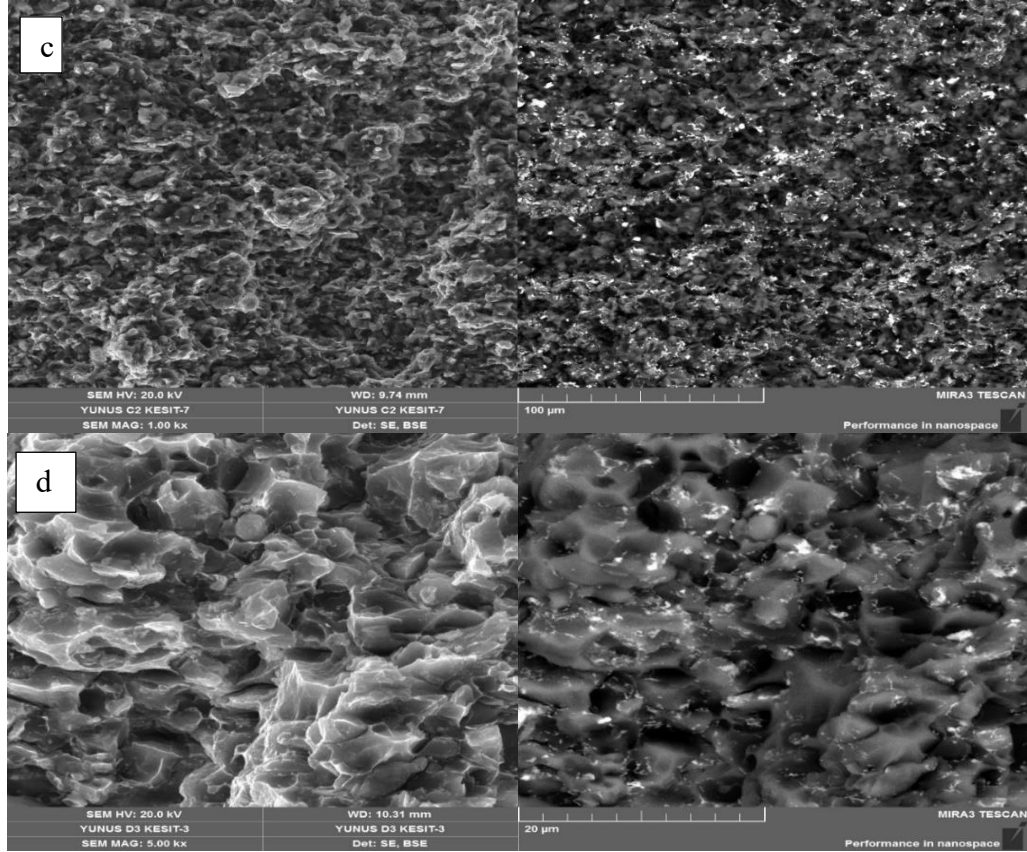
Li ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, B₄C partikül içeriği arttıkça kompozit numunesinin nihai mukavemetinin azaldığını; bunun, artan B₄C partikül içeriği ile birlikte B₄C kümelenmesinden kaynaklandığını bildirmiştir.

Brillon et al. (2022) yaptıkları çalışmada, Al matrisine hacimce %8 B₄C'ye kadar mekanik özelliklerde bir artış gözlemlenmiş, ancak kopma uzaması azalmıştır. %10-12 takviye oranlarında ise, malzeme daha kırılgan hale gelmiş ve kopma uzamasında sürekli bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, B₄C partiküllerinin birikimiyle ilişkilidir; partiküller arasındaki bağın zayıf olması, çatlakların ilerleyerek malzemenin ileri seviyede kırılmasına yol açmaktadır.

Gummadi et al. (2023) ise bor karbür partiküllerinin ve Al6082 metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerle etkileşimlerini incelemiş ve Al6082'deki bor karbür oranının artmasıyla tüm mekanik performansların iyileştiğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, %9 B₄C'ye sahip metal matrisli kompozitlerin üstün mekanik özellikler sergilediğini vurgulamışlardır. Bharathiraja et al. (2024) tarafından yapılan çalışmada ise, En yüksek çekme dayanımı, %0.5 grafen ve %6 B₄C içeren Al6061/0.5%Gr/6%B₄C-T6 örneğinde gözlemlenmiştir ve bu değer 209.53 MPa, uzama ise %8.907'dir. T6 ısıt işlemi, dayanım iyileşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Oysa, grafen miktarındaki artışın çekme dayanımı üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır. Çekme dayanımı, Al6061 alaşımına kıyasla %43.56 oranında rapor edilmiştir.



Şekil 8.8. Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; a) AlXSn5B4C, AlXSn10B4C



Şekil 8.8.(Devam): Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; c) AlXSn15B4C d) AlXSn20B4C

Şekil 7.8'de, eğme testleri sonrasında elde edilen kırık yüzeylere ait SEM fotoğrafları görülmektedir. Genel olarak, kompozitlerin kırık yüzeylerinde matris içerisinde sert fazların bulunduğu gözlemlenmiştir. %5 ve %10 B₄C takviye oranına sahip kompozitlerde, sünek kırılmayı gösteren koni şeklinde dimpleler (çökme noktaları) görülmektedir. %15-20 B₄C takviye oranlarına sahip kompozitlerde ise, sert fazların artışıyla birlikte gevrek kırılma yüzeyleri ortaya çıkmıştır. Özellikle %20 takviye oranına sahip numunede, tane sınırlarına yakın bölgelerde B₄C partiküllerinin agregasyonu (toplanması) dikkat çekmektedir. Da Silva et al. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, benzer kırılmaların matris ile karbürlerin arayüzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Bharathiraja et al. (2024) ise, Al ve düşük B₄C ilavesine sahip numunelerin boyun bölgesinde belirginleşirken, kırılmanın takviye ilavesiyle süneklikten gevrekliğe dönüştüğünü ve takviye partiküllerinin Al matris ile iyi bir kohezyon (bağlantı) oluşturduğunu belirtmişlerdir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, spark plazma sinterleme yöntemi kullanılarak dört farklı Al-15Sn- B_4C içeriğine sahip metal matrisli kompozit üretilmiştir. Bu kompozitlere uygulanan karakterizasyon işlemlerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Spark plazma sinterleme tekniğiyle üretilen kompozitlerin bağıl yoğunluk değerleri %95'in üzerinde olmuştur. 580°C sıcaklık, bu kompozisyonlar için uygun bir parametre olarak belirlenmiştir. Artan B_4C takviye oranı, ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerini bir miktar düşürmüştür. En yüksek yoğunluk değeri %95,50 ile Al-15Sn-5 B_4C kompozitinde elde edilmiştir.
2. XRD analizi, Al matrisine takviye edilen Sn ve B_4C 'nin, oransal olarak piklerde paralellik göstermiştir. Üretim sırasında yüksek argon atmosferi kullanıldığı için belirgin bir oksit bileşiği gözlemlenmemiştir.
3. SEM analizlerinde, üretilen kompozitlerde Al-Sn matris ve B_4C fazları belirgin bir şekilde görülebilmektedir. B_4C fazı, tane sınırlarında bulunmakta ve özellikle Al-15Sn-20 B_4C kompozitinde kümelenmiştir.
4. Üretilen kompozitlerde artan B_4C takviyesi ile sertlik değerlerinde de artış gözlenmiştir. %20 B_4C ilave edilen kompozitlerde 74,1 HV değeri elde edilmiştir. Literatürle karşılaştırıldığında, saf Al ve alaşımlarına göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
5. Artan B_4C takviye oranı mukavemet değerlerini artırırken, sünekliğin azalmasına yol açmıştır. Yüksek sertlik değerlerine paralel olarak, eğme testlerinde % uzama değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Takviye fazının tane sınırlarında kümelenmesi bu sonuca neden olmuştur.

6. Kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, $\text{Al}_{15}\text{Sn}_5\text{B}_4\text{C}$ kompozitinin daha sünek kırılma sergilediği görülmüştür.

7. Öneri olarak, Al matris içerisine daha düşük oranlarda B_4C takviye edilerek spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilcek kompozitlerde daha homojen bir dağılım ve daha yüksek % uzama değerleri elde edilebileceği düşünülmektedir.

10. KAYNAKLAR

Akbulut, H. (2001). Sakarya Üniversitesi Kompozit Malzemeler Ders Notları.

Akın, G. (2006). Toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aktaş, B. (2018). Alüminyum metal matrisli malzemelerde darbe dayanımı araştırmalarının incelenmesi, Tezsiz Yüksek Lisans, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Altınsoy, İ. (2009). Alümina takviyeli bakır kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ay, H. (2014). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B4C ilavesinin aşınma davranışına olan etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Balalan, Z. ve Gulan, F. (2019). Microstructure and mechanical properties of Cu-B4C and CuAl-B4C composites produced by hot pressing. Rare Metals, Published, Volume 38, pages 1169–1177.

Balalan, Z. (2013). SiCp takviyeli kompozit ile 304 paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Benjamin, J. S. and Volin, T. E. (1974). The mechanism of mechanical alloying, Metallurgical Transactions, 5: 1929-1933.

Biçer, A. (2015). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Ni3Al partikülleriyle pekiştirilmiş metal matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Brillon, A., Garcia, J., Riallant, F., Garnier, C., Joulain, A., Lu, Y. & Silvain, J. F. (2022). Characterization of Al/B4C composite materials fabricated by powder metallurgy process technique for nuclear applications, Journal of Nuclear Materials Volume 565, 153724.

Burgucu, S. (2011). 7075 alüminyum alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Clyne, T. and Withers, W. (1993). An Introduction to metal matrix composites, Cambridge University press, USA.

Çelik, Y. H. ve Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B4C rate produced by powder metallurgy method, *Advanced Powder Technology* Volume 28, Issue 9, Pages 2218-2224.

Da Silva, W. S., Souza, R. M., Mello, J. D. B. and Goldenstein, H. (2011) Room temperature mechanical properties and tribology of NICRALC and Stellite cast ing alloys, *Wear* 271:1819-1827.

Demirdal, S. (2021). Düşük maliyetli magnezyum matrisli katı atık takviyeli kompozitlerin üretilmesi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Deschamps, A., Dumont, D., Brechet, Y., Siğli, C. and Dubost, B. (2001). Process modeling of age-hardening aluminum alloys from microstructure evolution to mechanical and fracture properties, ASM International, Materials Park, OH, 298-305.

Durmuş, S., Akgün, S. ve Şahin, S. (2009), Çökelme Sertleştirilmesi uygulanmış A7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikro yapı ile değişiminin incelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

Efe, G. C., Yener, T., Altinsoy, I., Ipek, M., Zeytin, S. ve Bindal, C. (2011). The effect of sintering temperature on some properties of Cu–SiC composite, *J Alloy Compd* 509: 6036-6042.

Ekici, E. (2012). Alüminyum esaslı karma takviyeli kompozitlerin farklı takviye elemanı tipleriyle üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ekinci, Ö. (2021). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilen 7075 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Doktora tezi, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ergün, N. (2006). Bor karbür-silisyum karbür kompozitlerinin reaktif sıcak presleme ile üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eroğlu, G. ve Şahiner, M. (2018). Dünyada ve Türkiye’de alüminyum, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı Aralık, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü.

Franz, D., Szilvasi, T., Irran, E. and Inoue, S. (2015). A monotopic aluminum telluride with an Al=Te double bond stabilized by N-heterocyclic carbenes. *Nature Communications* volume 6 Article Number: 10037.

Gummadi, A. K., Gupta, M. K., Raviteja, D., Babu, A. M., Niranjan, R. S. and Patel, P. B. (2023). Investigations on mechanical behavior of processed MMCs of Al6082 and reinforcement particles B4C by powder metallurgy technique, *Materials Today: Proceedings* Volume 77, Part 2, Pages 534-539.

Heinen, P., Wu, H., Olowinsky, A. and Gillner, A. (2014). Helium-tight laser beam welding of aluminum with brilliant laser beam radiation. *Physics Procedia* 56: 554–565.

Işık, E. (2014). SiC takviyeli Al-12Si matrisli kompozitin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Jain, S., Rana, R. S. and Jain, P. (2016). Study of Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu Metal Matrix Reinforced with B4C Particles Composite *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 3, pp. 499-504.

Chu, K., Guo, H. (2010). Fabrication and effective thermal conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites for heat sink applications *Compos. Sci. Technol.*, 70 (2), pp. 298-304.

Karaçay, E., Alp, E., ve Cabbar, H. C. (2013). Sol-Jel yöntemiyle bor karbür üretimi ve karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2).

Karadağ, M. (2017). B4C partikül takviyeli bakır matrisli elektrik iletken kompozit üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karahan, D. S. (2019). Dünya’da ve Türkiye’de demir, krom ve bazı metaller, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Kaya, I. (2005). Al 7075 Alaşımının şekillenme ve ısıtma işlemle özelliklerinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kumar, G. S., Rajaguru, K., Ramkumar, R. and Ranjithkumar, M. (2021). Evaluation of Al-C-B4C composites fabricated by powder metallurgy for hardness and wear behaviour, *Materials Today: Proceedings Volume 37, Part 2*, Pages 2991-2996.

Kumdalı, F. (2008). Alüminyum matrisli B4C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Li, J., Xue, J., Zhang, Z. and Hu, Y. (2018). Effects of thermal frequency on microstructures. *Applied Sciences* 8(4): 540.

Li, Y., Wang, W., Zhou, J., Chen, H. and Zhang, P. (2017). 10B Areal density: a novel approach for design and fabrication of B4C/6061Al neutron absorbing materials. *Journal of Nuclear Materials*, (487), (238- 246).

Liu, R., Wu, C., Zhang, J., Luo, G., Shen, Q. and Zhang, L. (2018). Microstructure and mechanical behaviors of the ultrafine-grained AA7075/B4C composites synthesized via one-step consolidation.

Ma, Q. C. and Zhang, G. J. (2010). Effect of additives introduced by ball milling on sintering behavior and mechanical properties of hot-pressed B4C ceramics. *Ceram. Int.*, 36, 167–171.

Milani, A. M., Paidar M., Khodabandeh, A. and Nategh, S. (2016). Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding–brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82(9-12): 1495-1506.

Nas, E., Gökkaya, H., ve Sur, G. (2013). Sıcak presleme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin üretilebilirliği üzerine bir değerlendirme. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2), 56-65.

Oguocha, I. N. (1999). Characterization of Alurninum Alloy 2618 and Its Composites Containing Alumina Particles, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan, College of Graduate Studies and Research Saskatoon.

Öveçoğlu, M. L. (1997). Toz metalurjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler. 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 449475.

Özgün, Ö. (2007). Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öztop, B. ve Gürbüz, M. (2018). Investigation of properties of composites produced from waste aluminum with Si₃N₄ reinforcement. *Technological Applied Sciences*, 13, 1, 57-66.

Palacı, Y. (2001). Alüminanın özelliklerine, şekillendirme yönteminin, katkıların ve sinterleme sıcaklığının etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Prieto, R., Molina, J. M., Narciso, J. and Louis, E. (2008). Fabrication and properties of graphite flakes/metal composites for thermal management applications *Scr. Mater.*, 59 (1), pg. 11-14.

Prosviryakov, A. S. (2015). SiC content effect on the properties of Cu–SiC composites produced by mechanical alloying, *J Alloy Compd* 632: 707-710.

Sağırlı, A. (1990). Mekanik ekzantrik toz metal presi ve toz metal teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Seçilmiş, K. (2017). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş farklı oranlarda b₄c takviyeli al matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Siewert, E. Hussary, N. Schnick, M. Dreher, M. Schuster, H. Wagner, R. And Eichler, S. (2018). New GTAW variant for high-throughput aluminum welding. *Welding in the World*. 62: 385-391.

Somunkıran, İ., (1999). Demir esaslı molibden, nikel, bakır katgılı tozmetal alaışımının mekanik özelliklerine bakır oranının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Somunkıran, İ. ve Balın, A. (2011). Sıcak presleme tekniğiyle üretilen Co esaslı Co-Cr-Mo toz alaşımında presleme sıcaklığının mikroyapı üzerine etkisi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.

Sur, G. ve Kayabaşı, İ. (2019). Hafif metal ana fazlı kompozit malzeme üretim sisteminin tasarım, imalat ve performansının incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(1), 63-79.

Şahin, Y. (2000). Kompozit Malzemelere Giriş Kitabı, Ankara.

Şakiroğlu, N. (2005). Alüminyum esaslı kaymalı yatak malzemelerinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Şenel, M. C. (2020). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf al ve al-b₄c, al-al₂o₃ kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin karşılaştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(3), 783-795.

Tan, M. J. and Zhang, X. (1998), "Powder metal matrix composites selection and processing", Materials Science & Engineering, A244:80-85.

Taner, E. (2000). Toz Metalürjisi Üzerine Yeni Çalışmalar Mühendis ve Makina cilt 41 sayı 483, 30-32.

Tariolle, S., Thévenot, F., Aizenstein, M., Dariel, M. P., Frumin, N. And Frage, N. (2004). Boron carbide–copper infiltrated cermets. J Solid State Chem., 177(2):400.

Tayebi, M., Jozdani, M. M. and Mirhadi, M. (2019). Thermal expansion behavior of Al–B₄C composites by powder metallurgy. Journal of Alloys and Compounds Volume 809, 15, 151753).

Tekmen, Ç. (2006). Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Torralba, J. M., Da Costa, C. E. and Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. J. Mat. Proc. Tech., 133:203– 206.

Uddin, S. M., Mahmud, T., Wolf, C., Glanz, C., Kolaric, I., Volkmer, C. and Fecht, H. J. (2010). Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites, Compos Sci Technol, 70(16), 2253–2257.

Ueno, T., Yoshioka, T., Ogawa, J. İ., Ozoe, N., Sato, K. and Yoshin, K. (2009). Highly thermal conductive metal/carbon composites by pulsed electric current sintering Synth. Met., 159 (21), pp. 2170-2172.

Umur, H. (2017). Nano B₄c partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Upadhyaya, G. S. (2002). Powder metallurgy technology. Published By Cambridge International Science Publishing.

Üstünova, A. B. (2012). Bor karbür titanyum diborür kompozitlerinin reaktif spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilmesi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Viala, J. C., Bouix, J., Gonzalez, G. and Esnouf, C. (1997). Chemical reactivity of aluminum with boron carbide. J. Mater. Sci., 32 (17), pp. 4559-4573, 10.1023/A:1018625402103.

Yener, T., Altinsoy, I., Yener, S. C., Efe Çelebi, G. F., Ozbek, I. ve Bindal C. (2015). An evaluation of Cu-B₄C composites manufactured by powder metallurgy. Acta Phys Pol A., 147(4):1045.

Yıldırım, S. (1999). Fe-Ferrokrom tozundan elde edilen kompozitin mekanik özelliklerinin araştırılması Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yöntem, O. (2019). Toz metalurjisi ile üretilen alüminyum matrisli kompozitlerde bor minerali ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin deneysel tasarım yöntemleri ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zamzami, A. and Susmel, L. (2017). On the accuracy of nominal, structural, and local stress based approaches in designing aluminium welded joints against fatigue. International Journal of Fatigue 101(2): 137-158.

Zhang, L., Shi, G., Xu, K., Hao, W., Li, Q., Junyan, W. and Wang, Z. (2020). Phase transformation and mechanical properties of B₄C/Al composites J. Mater. Res. Technol., 9(2), pg. 2116-2126.

Kalay ve alaşımları. (B.T.). <https://www.uslularhadde.com/kalay-ve-kalay-alasimlari>.

Kalay ve alaşımları. (B.T.). <https://tr.wikipedia.org/wiki/kalay>.