



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

METAL BORÜR (MAB) SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Muhammet BAŞPEHLİVAN

Danışman

Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL

ALANYA

2025

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METAL BORÜR (MAB) SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Muhammet BAŞPEHLİVAN
Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Program Adı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman
Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL

Bu tez çalışması, ALKÜ BAP Komisyonunca kabul edilen 2024-02-03-LTP01 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

ALANYA
(2025)

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Muhammet BAŞPEHLİVAN'ın “Metal Borür (MAB) Sentezi ve Karakterizasyonu” başlıklı tezi 29/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Unvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL	
Üye : Doç. Dr. Erhan AYAS	
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞENER	

.....
Prof. Dr. Kemal VATANSEVER
Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Muhammet BAŞPEHLİVAN

TEŞEKKÜR SAYFASI

Bu çalışmada beni destekleyen bilgi birikimi ile her zaman yoluma ışık tutan kendisi ile tanışmaktan müşerref olduğum kıymetli tez danışmanım sayın Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmamın neredeyse tamamında bilgisi ve tecrübesi ile yardımlarını esirgemeyen çok fazla soru sormama rağmen tüm soru ve sorunlarımı mükemmel bir incelikle izah ve çözüme kavuşturan sayın Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞENER'e teşekkür ederim.

Üretilen MAB fazlı yapıların analizlerinin gerçekleştirilmesinde çalışmaya destek veren Eskişehir Teknik Üniversitesi'nden Öğr. Gör. Dr. Orkun TUNÇKAN'a

Çalışmada kullanmış olduğum Bor Oksit'i ücretsiz olarak göndererek araştırmaya destek veren ETİ Maden İşletmelerine,

Çalışmada kullanılan diğer hammaddelerin alımı için finansal destek sağlayan Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne Teşekkür ederim.

Son olarak bu eğitim sürecinde benim inişli çıkışlı ruh halime sabredip yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen değerli eşim Kübra BAŞPEHLİVAN'a ve tüm yorgunluğumu gülüşleri neşesi ile alıp götüren kızım Defne'ye şükranlarımı sunarım.

Muhammet BAŞPEHLİVAN

ÖZET

METAL BORÜR (MAB) SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Muhammet BAŞPEHLİVAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz, 2025 (42 Sayfa)

Bu çalışmada, Metal Borür (MAB) yapıların laboratuvar ortamında atmosfer kontrollü fırınlarda üretilmesi ve ilgili karakterizasyonların yapılması amaçlanmaktadır. Günümüz teknolojisi ilerledikçe daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemelerde bazen daha sağlam olması, bazen daha iyi iletkenlik göstermesi gibi farklı özellikler aranmaktadır. Bu nedenle malzeme bilimi ailesine her geçen gün yeni üyeler eklenmektedir. MAX ve MAB yapılar yakın geçmişte malzeme bilimine dahil olan ve hızla kabul görüp üzerinde çalışılan yeni nesil malzemeler arasında yer alıyor.

Metal borür (MAB) yapılarda daha iyi termal ve elektriksel iletkenlik, oksidasyona, aşınmaya ve termal şoka karşı yüksek direnç gibi özellikler ön plana çıkmaktadır. MAB fazı olarak adlandırılan bu malzemede M geçiş metalini (Mo, Cr, Mn, Fe, W, Hf, Ru, Y), A Alüminyum (Al) elementini ve B Bor (B) elementini temsil etmektedir.

Bu çalışmada, seçilen 111 (MoAlB) ve 212 (Mn₂AlB₂) MAB faz yapıları literatürde yer alan diğer üretim yöntemleri yerine atmosfer kontrollü fırın kullanılarak üretilmiştir. Üretilen MAB yapıların yoğunlukları, toz tane boyutları ve kristal yapısı ile % saflık değerleri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: MAB, Metal borür, Mn₂AlB₂, MoAlB.

ABSTRACT

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF METAL BORIDE (MAB)

Muhammet BAŞPEHLİVAN

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

July, 2025

In this project, it is aimed to produce Metal Boride (MAB) structures in the laboratory environment in atmosphere controlled furnaces and to carry out related characterizations. As today's technology advances, more and more materials are needed. Different properties are sought in materials, such as sometimes being more robust, sometimes showing better conductivity. For this reason, new members are being added to the materials science family every day. MAX and MAB structures are among the new generation materials that have lately entered materials science and are rapidly being accepted and studied.

In metal boride (MAB) structures, properties such as better thermal and electrical conductivity, high resistance to oxidation, abrasion and thermal shock come to the fore. In this material called MAB phase, M represents transition metal (Mo, Cr, Mn, Fe, W, Hf, Ru, Y), A represents Aluminum (Al) element and B represents Boron (B) element.

In this study, the selected 111 (MoAlB) and 212 (Mn₂AlB₂) MAB phase structures were produced using an atmosphere controlled furnace instead of other production methods in the literature. Densities, powder grain sizes, crystal structure and % purity values of the produced MAB structures were investigated.

Keywords: MAB, Metal boride, Mn₂AlB₂, MoAlB.

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	ii
TEŞEKKÜR SAYFASI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Hedefleri	2
2. LİTERATÜR	4
2.1. MAB Fazlar	4
2.2. MAB Fazların Özellikleri	7
2.3. MAB Fazların Sentez Yöntemleri	7
3. YÖNTEM	12
3.1. Kullanılan Hammadde ve Yöntemler	12
3.2. Kompozisyon Tasarımı ve Malzeme Üretimi	12
3.3. Fırınlanması İçin Ürünlerin Hazırlanması ve Fırınlama	14
3.4. Analiz İçin Numunelerin Hazırlanması	17
3.5. Üretilen MAB Fazlara Uygulanan Karakterizasyonlar	18
3.1.1 Yoğunluk ölçümü	19
3.1.2 Tane boyut analizi	19
3.1.3 XRD Analizi	19
4. BULGULAR	21
5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER	36
6. KAYNAKLAR	37

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Periyodik tablo ve MAB fazlarında bulunan elementler M-, A- ve B-bölgelerini işgal eden atomlar sırasıyla mavi, gri ve yeşil renkte gösterilmiştir (Kota vd., 2020).	4
Şekil 2.2 Nanolamine üçlü borür M_2AlB_2 'nin farklı görünümlerdeki üç boyutlu (3D) kristalografik şekli (Kadas vd. 2017).	5
Şekil 2.3 CS reaktörü (Song, Zhang vd. 2023).	11
Şekil 3.1 MAB faz sentezinde kullanılan hammaddeler	12
Şekil 3.2 Tozların karıştırıldığı bilyalı yatay değirmen.	14
Şekil 3.3 El pres makinası	15
Şekil 3.4 Sinterlenmek üzere hazırlanmış numune örnekleri	15
Şekil 3.5 Atmosfer kontrollü fırın	17
Şekil 3.6 Malzemelerin fırınlanması	17
Şekil 3.7 Halkalı Öğütücü	18
Şekil 3.8 Analiz için hazırlanan numuneler.	18
Şekil 3.9 X-ışını dalga boyu, düzlemler arası boşluk ve kırınım açısı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Demir, 2023).	20
Şekil 3.10 Rigaku, Miniflex600 XRD analiz cihazı	20
Şekil 4.1 B_2O_3 ve C ile üretilen $MoAlB$	22
Şekil 4.2 Saf tozlardan üretilen $MoAlB$	22
Şekil 4.3 B_2O_3 ve C ile üretilen Mn_2AlB_2	23
Şekil 4.4 Saf tozlardan üretilen Mn_2AlB_2	23
Şekil 4.5 Mo, Al ve B ile hazırlanan tozun değirmende karıştırıldıktan sonraki tane boyutu	24
Şekil 4.6 Mn, Al ve B ile hazırlanan tozun değirmende karıştırıldıktan sonraki tane boyutu	24
Şekil 4.7 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (1 saat bekleme)	25
Şekil 4.8 Boroksit ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (1 saat bekleme).	26
Şekil 4.9 Bor ile sentezlenen $MoAlB$ (1 saat bekleme).	27
Şekil 4.10 Boroksit ile sentezlenen $MoAlB$ (1 saat bekleme).	28
Şekil 4.11 Bor ile sentezlenen $MoAlB$ (2 saat bekleme).	29
Şekil 4.12 Boroksit ile sentezlenen $MoAlB$ (2 saat bekleme).	30
Şekil 4.13 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (2 saat bekleme)	31
Şekil 4.14 Bor ile sentezlenen $MoAlB$ (2 saat bekleme).	32
Şekil 4.15 Saf tozlardan ve Al takviyesi ile üretilen Mn_2AlB_2	33
Şekil 4.16 Saf tozlardan ve Al takviyesi ile üretilen $MoAlB$	33
Şekil 4.17 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 Al takviyeli (1 saat bekleme)	34

Şekil 4.18 Bor ile sentezlenen MoAlB Al takviyeli (1 saat bekleme).....	35
--	----



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1 Seçilen MAB fazları için teorik mekanik özellikler, kütle modülü, kayma modülü, Young modülü ve Poisson oranının ortalama değerleri	9
Tablo 3.1 MoAlB MAB fazın B ₂ O ₃ kullanılan sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları	12
Tablo 3.2 Mn ₂ AlB ₂ MAB fazın B ₂ O ₃ kullanılan sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları	13
Tablo 3.3 Saf başlangıç tozları kullanılarak gerçekleştirilen MoAlB MAB faz sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları	13
Tablo 3.4 Saf başlangıç tozları kullanılarak gerçekleştirilen Mn ₂ AlB ₂ MAB faz sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları	14
Tablo 3.5 Üretilen MAB faz numuneleri ve üretimle ilişkin sıcaklık-bekleme süresi parametreleri	16
Tablo 4.1 MAB fazlı ürünlerin yoğunlukları (g/cm ³)	21
Tablo 4.2 Al takviyesi ile üretilen MAB yapıların yoğunlukları (g/cm ³)	32

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	Aluminyum
B	Bor
B ₂ O ₃	Bor Oksit
C	Karbon
CO	Karbon Monoksit
dk	Dakika
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MoAlB	Molibden Alüminyum Borür
Mn ₂ AlB ₂	Mangan Alüminyum Borür
MPa	Mega Paskal
g/cm	Yoğunluk
g	Gram
N	Kuvvet
°C	Santigrat derece
°/dk	Derece/Dakika
M	Molar

Kısaltmalar

ALKÜ	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi
MAB	Metal Borür
MAX	Metal Karbür
XRD	X-Işını Difraktometresi

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze gelişen insanlık ve ilerleyen teknoloji hep daha fazlasına ihtiyaç duymuştur. Bu ihtiyaç insanları düşünmeye, araştırmaya ve yeni buluşlar elde etmeye itmiştir. Bilim sürekli kendini yenileyen gelişen bir olgudur. Geçmiş birikimler insanların araştırmalarına ışık tutar ve bilimin gelişmesine katkı sağlar. Gelişen bilim ise tekrardan yeni fikirlere açtır. Yani bu mükemmel döngü bugün sahip olduğumuz her şeyin mimarı denilebilir.

İşte bu bilimde merak uyandırıp gelişime neden olan alanlardan biri de malzemedir. Her sektör kendi çalışmaları için mevcut koşullara dayanabilen malzemeye ihtiyaç duyar. Kimi malzemenin elektriksel iletkenliği göz önünde bulundurulurken kimi malzemenin ise mukavemeti önem arz etmektedir. İşte tamda burada malzeme bilimi bu alanlar için uygun koşullarda kullanılabilecek en ekonomik malzemeyi ortaya çıkarmak için çalışır.

Stratejik teknoloji alanlarındaki hızlı ve sürekli ilerlemeler, özellikle havacılık ve uzay araştırmaları gibi malzemelerin aşırı çevre koşullarına maruz kaldığı uygulamalarda, bu koşullara dayanabilen, normal malzemelere kıyasla daha yüksek performans gösteren malzemelerin geliştirilmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu amaçla, var olan malzemelerin özellikleri geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Alaşımlar ve kompozitler de bu sayede hızlı bir gelişme sergilemiştir.

Barsoum'un 2000 yılında yayınladığı "The $M_{N+1}AX_N$ phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates" isimli çalışması ile yüksek saflıkta ürettiği MAX fazlı yapıları, yeni bir katı malzeme sınıfı olarak ifade ederek, 1960'lı yıllardan bu yana zaman zaman gündeme gelen ve Novotny tarafından daha önce H-fazlı malzemeler olarak isimlendirilen bir malzeme grubunun bilim dünyasında tanınmasına neden oldu. Bu malzemeler, metal ve seramik malzemelerin bazı önemli özelliklerini aynı anda bulundurabildiğinden ilgiyle karşılandı ve kabul gördü. $M_{N+1}AX_N$ formülünde M ile bir geçiş metali temsil edilirken, A ile IIIA veya IVA gruplarından bir element, X ile ise karbon ve/veya azot temsil edilmektedir (Barsoum, 2000).

Çok geçmeden, MAX fazlara benzer şekilde nanolamineli kristal yapılara sahip metal borür (MAB) yapılar da 1960'lardan bu yana beklediği ilgiye kavuşmuş ve malzeme biliminde hızla tanınmıştır. MAB fazlar, A grubu ile temsil edilen IIIA veya IVA grubu element atomlarının tek katmanları ile iç içe geçmiş istiflenmiş M (geçiş

metali) ve B (bor) katmanlarından oluşan üçlü metal borürler olup ilgi çekici manyetik özellikleri ve mekanik deformasyon davranışları sayesinde son zamanlarda büyük ilgi görmektedir (Kota vd., 2020). MAB fazlar, geleneksel seramik malzemeler gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitlenmeye karşı direnç özelliklerin yanı sıra metaller gibi içsel enerji dağıtıcı mekanizmalar, süneklik ve işlenebilirlik özellikleri göstermektedir (Rosenkranz vd., 2022).

Atom numarası 5 olan bor elementi periyodik tablonun 13. grubunda (IIIA) yer alan ve elektronegatifliği 2,04 olan, dolayısıyla Paulings ölçeğine göre metaller ve metal olmayanlar arasında yer alan yarı metalik bir elementtir. Serbest haldeki B atomları dış kabuklarında üç değerlikli elektron bulundurlar. Küçük atom boyutuna sahip bir element olan B'un değerlik elektronları çekirdeğe güçlü bir şekilde bağlanır ve elektron eksikliği özelliği, borun metallere bağlandığında karmaşık yapılar oluşturmaya izin verir (Sun vd., 2017).

MAB fazların üretim yöntemleri arasında, Al akısından tek kristal büyütme (Ade ve Hillebrecht, 2015; Hirt vd., 2016), reaktif sıcak presleme (Kota vd. 2016), basınçsız sinterleme (Xu vd., 2018), kendi kendine ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) (Levashov vd., 2017; Merz vd., 2021; Potanin vd., 2022), tuz eriyiği sentezi (Liu vd., 2020), elektrik akımı destekli sinterleme / kıvılcım plazma sinterleme (SPS) (Su vd., 2020) ve ince film biriktirme için magnetron püskürtme (Zhang vd., 2023), eriyik eğirme (Du vd., 2015a), ark eritme (Hirt vd., 2016), indüksiyon eritme, termal patlama (Liang vd., 2021; Liang vd., 2022) gibi yöntemler yer almaktadır. Bu çalışmada, 111 (MoAlB) ve 212 (Mn₂AlB₂) MAB faz yapıları literatürde yer alan diğer üretim yöntemleri yerine atmosfer kontrollü fırın kullanılarak üretilmiştir. Üretilen MAB fazlı yapıların yoğunluğu, tane boyutu, kristal yapısı ve % saflıkları incelenmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, Mn₂AlB₂ ve MoAlB olmak üzere iki farklı metal borürünün laboratuvar ortamında atmosfer kontrollü fırınlarda üretilmesi ve ilgili karakterizasyonlarının yapılması amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Hedefleri

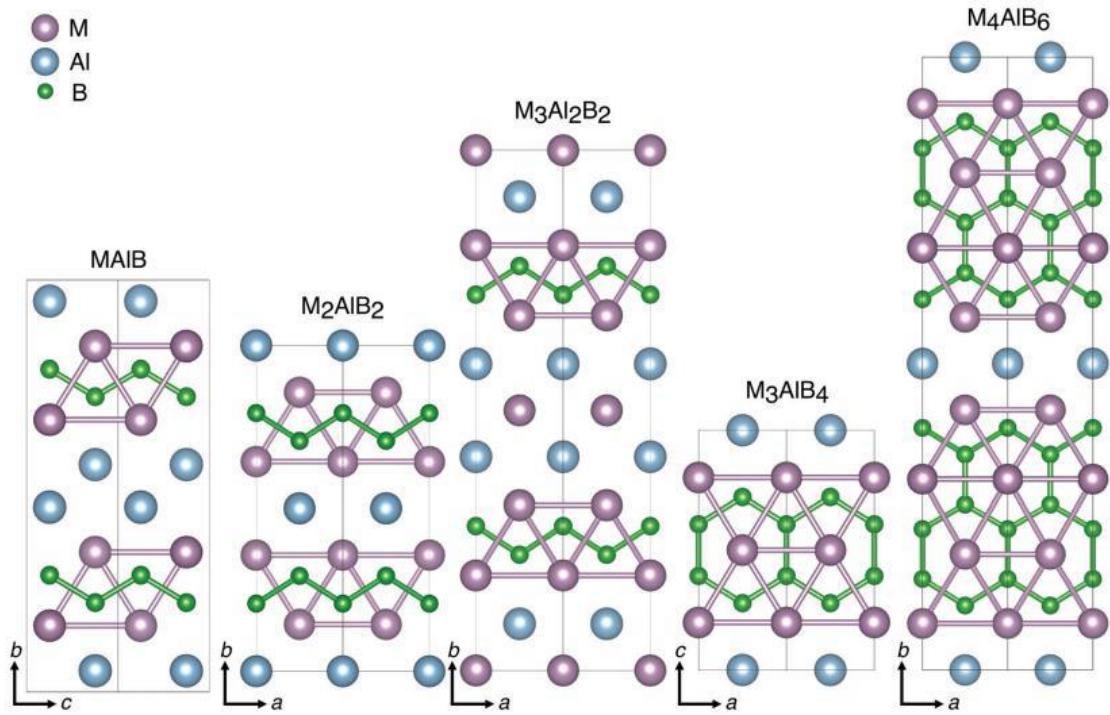
Çalışmanın amaçlandığı şekilde gerçekleştirilebilmesi için belirlenen hedefler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- 1) MAB fazı oluşturacak malzemelerin stokiometrik oranlarının hesaplanması

- 2) Karışımı oluşturacak elementlerin toz haline getirilmesi
- 3) Toz halindeki elementlerin değirmende karıştırılması
- 4) Atmosfer kontrollü yüksek sıcaklık fırınında Mn_2AlB_2 ve MoAlB MAB yapılarının üretilmesi
- 5) Üretilen MAB yapıların karakterizasyonlarının yapılması



iyi termal ve elektriksel iletkenlik, sağlam oksidasyon ve termal şok direnci ve kayda değer hasar toleransı sergilediğini göstermektedir (Lu vd., 2016; Zhou vd., 2017; Kadas vd., 2017; Kota vd., 2018a; Liu vd., 2018; Zhou vd., 2018). Atomik katmanlı, üçlü geçiş metal borürleri olarak tanımlanan bu fazlar, Al veya Si tek katmanları veya Al atomlarının çift katmanları ile serpiştirilmiş M-B katmanlarından oluşan kristal yapılar sergiler (Kota vd., 2018b)). Yapısal olarak, MAB fazları, M-B katmanları içindeki paralel, kovalent bağlı B-B zincirleri nedeniyle yüksek anizotropi ile karakterize edilir ve nispeten daha zayıf M-Al bağları bu katmanlar arasında ayırıcı görevi görür (Verger vd., 2018; Kota, 2019). Genel formülü $(MB)_{2z}A_x(MB_2)_y$ ($z = 1-2$; $x = 1-2$; $y = 0-2$) olan MAB fazlar ortorombik kristaller olarak ortaya çıkar ve bunların tümü deneysel prototiplerde başarıyla sentezlenmiştir (Ade ve Hillebrecht, 2015; Kazei vd., 2019; Zhang vd., 2019; Kota vd., 2020). Üçlü metal borür bir yapının farklı görünümüne Şekil 2.2'de yer verilmiştir.



Şekil 2.2 Nanolamine üçlü borür M_2AlB_2 'nin farklı görünümdeki üç boyutlu (3D) kristalografik şekli (Kadas vd. 2017).

MAB fazlarının çoğunun tek kristalleri (SC), büyük molar Al fazlalıkları içeren M-Al-B eriyiklerinin yüksek sıcaklıklardan yavaşça soğutulmasıyla elde edilmiştir (Ade ve Hillebrecht, 2015; Chai vd., 2015). Bu şekilde elde edilen kristaller genellikle büyük b düzlemlerine sahip kalın trombositler veya c'ye paralel tercihlili büyüme yönüne sahip uzun iğne şeklinde yapılarıdır. Chai vd. erimiş Mn-Al-B karışımlarını $1200^{\circ}C$ 'den yavaşça

soğutarak maksimum boyutları $0,02 \times 0,2 \times 0,4 \text{ mm}^3$ olan plaka benzeri Mn_2AlB_2 kristalleri elde etmiştir (Chai vd., 2015). MoAlB 'i sentezlemek reaktif stokiyometrilere, sentez sıcaklığına ve soğutma hızlarına genellikle oldukça duyarsız olduğundan WAlB SC'lerine göre çok daha kolaydır (Kota, 2019). Zhang ve arkadaşlarına göre, yüksek sentez sıcaklığı (1500°C), büyük molar Al fazlalıkları ve hızlı fırın soğutması yüksek WAlB verimine yol açmaktadır (Zhang vd., 1987) ancak daha sonraki çalışmalarda WAlB SC'leri elde etmek için en az 50°C/saat soğutma hızlarının gerekli olduğu ortaya konulmuştur (Osaka vd., 1997; Ade ve Hillebrecht, 2015).

Kota ve arkadaşları MAB fazlarının sentetik üretim yöntemlerini, kristal yapısını, kimyasal bağlarını ve karakteristik özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir (Kota vd., 2018a; Kota vd., 2020). Üçlü geçiş metal borürlerin mekanik özellikleri, manyetik ve elektronik davranışları üzerine bazı çalışmalar rapor edilmiştir. MoAlB , hava bulunan ortamda ısıtıldığında alümina oluşturan ve bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel bulundurduğu ifade edilen ilk geçiş metali borürdür. Kota vd. (2017), MoAlB 'in argon ve vakum atmosferlerindeki termal kararlılık ve yığın polikristalin MoAlB 'nin termodinamik parametrelerini deneysel olarak araştırmıştır. Li vd. gerçekleştirdikleri çalışmada, elementel tozlardan polikristal Fe_2AlB_2 'i üretim süresini kısaltarak daha hızlı bir şekilde sentezlemeyi başarmış ve üretilen MAB yapının elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Li vd., 2017). Aynı yıl, Ke vd. tarafından T_2AlB_2 ($\text{T}=\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{Co}$ ve Ni) MAB yapılarda ve alaşımlarının elektronik yapısı ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Fe_2AlB_2 için, kristalografik a ekseninin deneylerle uyumlu olan en kolay eksen olduğunu; Mn_2AlB_2 'nin manyetik temel durumunun bazal ab düzleminde ferromanyetik olduğunu, ancak c eksen boyunca antiferromanyetik olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yapıya dahil edilen 3 boyutlu katkıların Fe_2AlB_2 'de mıknatıslanmayı ve Curie sıcaklığını düşürdüğünü; Co veya Ni ile elektron katkısının Fe_2AlB_2 'de Curie sıcaklığının azalması üzerinde Mn veya Cr ile delik katkısından daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Fe_2AlB_2 'de daha fazla Mn katkısı yapıldığında ise ferromanyetikten antiferromanyetik geçişin meydana geldiğini ortaya koymuşlardır (Ke vd., 2017).

Lu ve ark. nanolaminli üçlü geçiş metal borürlerin Cr_2AlB_2 , Fe_2AlB_2 ve MoAlB 'nin atomik yapı ve kafes kusurları üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, Z-kontrast görüntüleri ile Al'ın geçiş metali atomlarından kolayca ayrıldığı, Fe_2AlB_2 'deki hafif element B'nin konumunun Fe ve Al'a göre durumunun çözüldüğü ve

kristal yapıların doğrudan atomik gözlemle doğrulamanın yanı sıra, bileşiğe özgü yapısal kusurların fark edildiği ifade edilmiştir (Lu vd., 2016).

2018 yılında, ağırlıklı olarak tek fazlı ve tamamen yoğun MoAlB (uzay grubu) seramiklerinin vakumda ve inert atmosferlerde >1673 K erime noktasına, yüksek basınç dayanımına (oda sıcaklığında 1,9 GPa'ya kadar) sahip olduğunu gösteren çalışmalar dikkat çekmiştir. Bilindiği kadarıyla ortam atmosferinde 1350°C 'ye kadar yüksek sıcaklıklarda oksitlenerek koruyucu Al_2O_3 pulları oluşturan bir geçiş metali borürüdür. Bu oksidasyon davranışı, havadaki yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanım için geçiş metali borürlerinin kritik sınırlamasının üstesinden geldiği anlamına gelmektedir (Kota vd., 2018a). MAB yapılar iyi termal ve elektriksel iletkenlik, iyi oksidasyon ve termal şok direnci, benzersiz manyetik ve yüksek sıcaklık özellikleri, yüksek erime noktası gibi metal-seramik özelliklerinin olağanüstü kombinasyonundan dolayı, yüksek sertlik ve mükemmel aşınma direnci gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikler MAB fazlarını yüksek sıcaklıktaki yapısal malzemeler ve aşınmaya dirençli kaplamalar gibi mühendislik uygulamaları için arzu edilen bir aday haline getirmektedir (Roy vd., 2023).

2.2. MAB Fazların Özellikleri

MAB fazlar yüksek sertik ve basma dirençleri, yüksek erime sıcaklıkları, kimyasallara karşı yüksek dirence sahip olmaları, yüksek elastik modülleri ve aşınma dayanımları ile elektriksel ve termal iletkenlikleri, korozyon dirençleri ve bazen de manyetik özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. MAB'ların özellikleri genel olarak MAX fazlı (geçiş metali karbürleri ve nitürleri) yapılar ile benzerlik göstermektedir (Lou, 2016).

2.3. MAB Fazların Sentez Yöntemleri

MAB fazların üretimi, metal- seramik toz karışımlarının bir seri reaksiyon sonucunda birbirinden farklı üretim yöntemleriyle sentezlenmesi sonucunda gerçekleşmektedir. MAB fazlar, eriyik eğerme (Du vd., 2015a), Al-flux (Ade ve Hillebrecht, 2015; Hirt vd., 2016), ark eritme (Hirt vd., 2016), indüksiyon eritme, termal patlama (Liang vd., 2021; Liang vd., 2022) ve erimiş tuz içinde sentezlenmiştir (Liu vd., 2020). Ancak özellikle ark eritme işleminden sonra uzun tavlama süreleri, aşırı alüminyum kullanımı, nihai ürünlerdeki safsızlıkları gidermek için asit veya baz uygulaması gerekliliği ve tamamen yoğun ve saf fazların olmaması gibi zorluklar, MAB faz sentezi için yeni yaklaşımların araştırılmasına neden olmuştur (Chai vd. 2015). Yüksek saflıkta

ve yoğunluktaki MAB fazlar, sıcak presleme ve elektrik akımı destekli kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemleri ile sentezlenmiştir (Bai vd., 2019; Wang vd., 2019; Bennett vd., 2020; Demir ve Ayas, 2022).

Tek kristal olarak üretilen MAB fazlar, kristal büyütme yöntemiyle, sıcak presleme ve SPS ile yığın olarak sentezlenmiştir. Tek kristalli MAB fazlarının çoğu, fazla Al içeren M-Al-B eriyiğinin yüksek sıcaklıklarda yavaş soğutulmasıyla üretilmektedir (Zhang vd., 1987; Ade ve Hillbrecht, 2015; Chai vd., 2015; Alameda vd., 2017). Bunla birlikte, Al-flux yöntemi de iki geçiş metali içeren yapılara sahip tek kristaller üretmek için uygun bir yöntemdir (Yu ve Lundström, 1995; Okada vd., 1997). Fe_2AlB_2 ve $(Fe_{1-x}Mn_x)_2AlB_2$ için Al-flux büyütme dışında ark eritme ve Ga-flux büyütme de alternatifler arasındadır (Tan vd., 2013; Du vd., 2015b). MAB fazları genellikle Al-flux büyütme (Yu ve Lundström, 1995; Okada vd., 1997) ve Ga-ark eritme (Chai vd., 2015; Tan vd., 2013; ElMassalami vd., 2011) ile elde edilir. Eriyik eğirme, Ga-akı büyütme (Tan vd., 2013) ve indüksiyon eritme (Jeitschko, 1969) daha az kullanılan MAB sentez yöntemleridir.

Bir çalışmada (Lu vd., 2016), tozların karıştırılması ve Ar atmosferli bir fırında sinterlenmesi ile safsızlık oluşumunun bastırıldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra bu konsept kullanılarak ilk kez tek fazlı ve tam yoğunluklu Mn_2AlB_2 ve $MoAlB$ numuneleri vakumlu sıcak presleme ile sentezlenmiştir (Kota, 2019). Aynı çalışmada, öncül faz için ideal olan Cr_2AlB_2 fazı, $CrB+B$ karıştırılarak ve karışım Ar atmosferli fırında 970 °C'de sinterlenerek elde edilmiştir. Yine aynı çalışmada, $2Mn + 1.2Al + B$ karıştırılarak ve sıcak preslenerek tam yoğun Mn_2AlB_2 elde edilmiştir. SPS'nin diğer yöntemlere göre en önemli avantajı çok yüksek ısıtma/soğutma (600 °C) hızlarında çalışabilmesidir. Bu sayede teorik yoğunluğa dakikalar içinde ulaşmak ve tozların başlangıçtaki partikül boyutunun mikroyapı içinde korunmasını sağlamak mümkün olur (Cavaliere, 2019).

Bu şekilde, mikro yapı geliştirilmiş mekanik, termal, optik ve elektriksel özelliklere sahip nihai ürün elde edilebilmektedir (Kang, 2004). Yüksek yoğunluklu ve yüksek saflıkta $MoAlB$ numunelerinin sentezlenmesinde genellikle SPS kullanılmaktadır (Lou, 2016; Wang vd., 2019; Su vd., 2020). Yapılan çalışmalarda üretilen MAB fazlı yapıların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Tablo 2.1'de bazı MAB fazların mekanik özellikleri, kütle modülü, kayma modülü, Young modülü ve Poisson oranının ortalama değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Seçilen MAB fazları için teorik mekanik özellikler, kütle modülü, kayma modülü, Young modülü ve Poisson oranının ortalama değerleri

MAB Faz	Kütle modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)	Young modülü (GPa)	Poisson oranı	Ref.
MoAlB	213	146	357	0,22	(Xiang vd., 2018)
Mn ₂ AlB ₂	-	102	243	0,19	(Kota vd., 2018a)
WAlB	232	146	362	0,24	(Xiang vd., 2018)
Mn ₂ AlB ₂	222	161	388	0,21	(Surucu vd., 2020)
Fe ₂ AlB ₂	210	132	329	0,24	(Surucu vd., 2020)
Co ₂ AlB ₂	241	101	266	0,31	(Hanner vd., 2021)
Zr ₃ CdB ₄	149	71	184	0,29	(Qureshi vd., 2021)
Mo _{4/3} Sc _{2/3} AlB ₂	183	122	299	0,23	(Lind vd., 2021)
Cr _{4/3} Sc _{2/3} AlB ₂	171	138	325	0,18	(Lind vd., 2021)

Kota vd. tarafından 2016 yılında reaktif sıcak presleme yöntemi ile üretilen MoAlB'ün özelliklerinin incelendiği çalışmada, oda sıcaklığında 0,36-0,49 $\mu\Omega\text{m}$ gibi düşük öz direnç gösterdiği için metal benzeri özellikler gösterdiği, ayrıca 26 °C'de 35 Wm⁻¹ K⁻¹ termal iletkenliğe sahip olduğu ve iyi bir termal iletken olduğu ifade edilmiştir. MoAlB'nin, inert bir atmosferde en az 1400 °C'ye kadar kararlı olduğunu ve 10,6 ± 0,3 GPa'lık orta derecede düşük Vickers sertlik değerlerine ve 1940 ± 103 MPa'ya kadar basınç dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir (Kota vd., 2016).

Fuka vd. tarafından basınçsız sinterleme yöntemi ile MoB ve Al tozlarının Ar atmosferinde 2 saat boyunca 1000, 1250 ve 1550 °C'de 1:1,2 molar oranlarında sinterlenmesi ile üretilen MoAlB MAB faz sıcak pressleme Ni matrisine farklı hacim oranlarında ilave edilerek Ni-MoAlB kompozit yapılar üretilmiştir. Elde edilen kompozit yapıların özellikleri incelendiğinde, MoAlB tanelerinin Ni-matris içinde minimum arayüzey reaksiyonu ile iyi bir şekilde dağıldığı, kompozit içerisindeki MoAlB miktarının artması ile sünekliğinin azaldığı, akma dayanımını arttığı, aşınma oranının kademeli olarak azaldığı ve MoAlB ilavesinin, Ni bazlı metal bileşenler arasındaki yapışkan aşınmasını en aza indirerek aşınma dayanımını artırabileceği ancak kuru ortamdaki kayma esnasındaki aşınmayı azaltmak için yeterli olmadığı ifade edilmiştir (Fuka vd., 2018). 2023 yılında gerçekleştirilen bir tez çalışmasında saf ve yüksek yoğunlukta MoAlB, Cr₂AlB₂ ve Cr₃AlB₄ MAB fazları spark plazma sinterleme tekniği (SPS) tekniği

kullanılarak sentezlenmiş ve ardından kimyasal dağlama yöntemi ile 2 boyutlu MBene yapılar üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir (Demir, 2023).

Mn, Al ve B tozu karışımlarının vakum altında reaktif sıcak preslenmesi ile yoğun ve ağırlıklı olarak tek-fazlı polikristalin Mn_2AlB_2 'in sentezlendiği ve karakterize edildiği bir çalışmada, sertlik, Young modülü ve kayma modülü, basınç dayanımı, Poisson oranı gibi özellikler incelenmiştir. Numunelerin 300 K sıcaklıkta 243 GPa Young modülü ve 102 GPa kayma modülü sergilediği, elektriksel öz direncinin $5-5,4 \mu\Omega m$, 9,8 N yükleme altındaki Vickers sertlik değerinin ise 8,7 GPa olduğu ifade edilmiştir. Poisson oranı 0,19 olan Mn_2AlB_2 numunelerin tespit edilen basınç dayanımları $1,24 \pm 0,1$ GPa'dır. 1379 K üzerindeki sıcaklıklarda Mn_2AlB_2 MAB fazın termal olarak kararsız olduğu belirtilmiştir (Kota vd., 2018a).

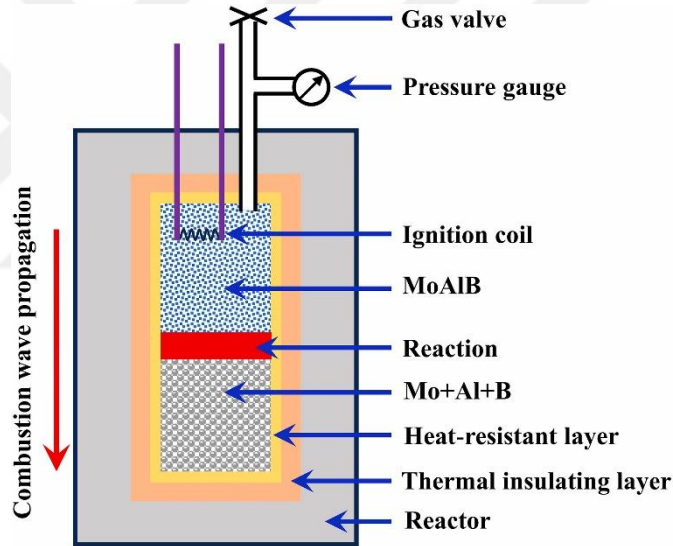
Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) yöntemi ile indüksiyon fırını kullanarak gerçekleştirilen bir Mn_2AlB_2 üretiminde, Mn_2AlB_2 'ye maksimum dönüşüm için Al oranını, yüksek enerjili bilyalı değirmende geçen süre ve soğuk presleme yükünün faz saflığı ve reaksiyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. En yüksek Mn_2AlB_2 dönüşümü, Al oranının 1,4 olduğu numunelerde tespit edilmiştir. Bilyalı değirmende geçen sürenin artması ile MAB faz saflığının arttığı, SHS ateşleme ve pik sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. Presleme işleminin de SHS ateşleme sıcaklığı üzerinde etkili olduğu, preslenmiş numunelerin preslenmemişlere göre daha yüksek SHS ateşleme sıcaklığına ihtiyaç duyduğu, sıcaklık-zaman verilerinde ortaya çıkan iki ekzotermik pik ise Mn_2AlB_2 'in iki aşamalı olarak sentezlendiği yönünde yorumlanmıştır (Merz vd., 2021).

Al oranının lamine $Mn_2Al_xB_2$ MAB fazı üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada, $x=1,3$, $x=3$ ve $x=10$ olmak üzere üç farklı oranda kullanılan Al'un Mn_2AlB_2 MAB fazının kristal yapısı, safsızlık ve mikro yapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Mn, Al, B başlangıç tozları, belirlenmiş stokiometrik oranlarda alınarak, öncelikle 5 mm çapındaki bilyalar ile değirmende 200 rpm hızda 18 saat karıştırılmış, daha sonra soğuk preslenmiş ve 1200 °C'de vakum ortamında 2 saat sinterlenmiştir. 1,3 Al kullanılarak üretilen numunede, ana faz Mn_2AlB_2 yüksek saflıkta ortorombik kristal yapıda elde edilmiş ve az miktarda MnB, $MnAl_6$, Al_2O_3 ve Al safsızlıkları bulunmuştur. Al içeriği arttıkça, Mn_2AlB_2 fazının oranının azaldığı ve safsızlıkların oranının arttığı ifade edilmiştir (Tuzluca vd., 2024).

Mevcut çalışma, Tuzluca vd. tarafından gerçekleştiren çalışma ile yöntem bakımından benzerlik gösterse de, Mn_2AlB_2 MAB faz sentezinde kullanılan Al oranı,

sinterleme sıcaklıkları ve fırın atmosferi bakımından farklılık göstermektedir. Çalışmada kullanılan Al oranı 1,2, sinterleme sıcaklıkları 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C olup sinterleme işlemi argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen MoAlB MAB faz da aynı parametreler kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, başlangıç hammaddesi olarak B yerine B₂O₃ kullanılarak yapılan üretimler, kıyaslamalı bir değerlendirme yapma olanağı sunmuştur.

Farklı bir çalışmada ise MoAlB üretilirken yanma sentezi(CS) ile presleme kullanılmıştır. Mo – Al – B tozları 1:1:1 , 1:1,3:1 , 1:1,6:1 , 1:1,3:0,95 ve 1:1,3:1,05 stokiometrik oranlar ile 12 saat karıştırıldıktan sonra CS reaktörüne(Şekil 2.2) yerleştirilmiştir. Önce reaktör vakumlanmış ardından 1Mpa'a kadar Ar gazı ile doldurulmuş. Yanma reaksiyonu ise 30A DC akımla başlatılmış. Yanma neticesinde yayılan ısı dalgası tüm maddeye yayılmış ve MAB fazı elde edilmiş(Song, Zhang vd. 2023).



Şekil 2.3 CS reaktörü (Song, Zhang vd. 2023)

Song, Zhang vd yaptıkları bu çalışmada Mo sırası ile Al₈Mo₃ ve MoB oluşturduğu ardından yanma reaksiyonunda açığa çıkan çok miktarda ısının bu iki fazı tepkimeye girmeye zorladığını son olarak MoAlB metal bürürünün oluştuğunu bulmuşlardır. MAB fazlı yapı oluşurken gerçekleşen tepkimeler 2.1, 2.2 ve 2.3' te verilmiştir (Song, Zhang vd. 2023).



3. YÖNTEM

3.1. Kullanılan Hammadde ve Yöntemler

MAB faz yapıların üretiminde kullanılmak üzere 99,99% saflık ve 44 µm tane boyutlarındaki molibden (Mo) tozu ile 99,99% saflık ve 44 µm tane boyutlarındaki bor (B) tozu Gelişim Lab. Cih. ve Kim.'dan satın alınmıştır. Çalışmada kullanılan bor oksit (B_2O_3), ETİ Maden İşletmeleri'nden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan mangan (Mn), alüminyum (Al) ve karbon (C) ise bölüm laboratuvarından kullanılmıştır. MAB faz sentezinde kullanılan hammaddeler Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 MAB faz sentezinde kullanılan hammaddeler

3.2. Kompozisyon Tasarımı ve Malzeme Üretimi

Çalışma kapsamında hem borik asit ile hem de proje kapsamında temin edilen saf bor ile $MoAlB$ ve Mn_2AlB_2 MAB faz yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. $MoAlB$ 'ün üretimi için kullanılan Mo, Al, B_2O_3 ve C stokiometrik oranları Tablo 3.1'de, Mn_2AlB_2 'ün üretimi için kullanılan Mn, Al, B_2O_3 ve C stokiometrik oranları ise Tablo 3.2'de verilmiştir. Karbonun reaksiyona dahil edlimesindeki amaç, reaksiyon sırasında B_2O_3 'den oksijeni $3CO$ olarak uzaklaştırarak B elementinin MAB yapısına bağlanmasını sağlamaktır.

B_2O_3 kullanılarak $MoAlB$ MAB fazını üretmek için Tablo 3.1'de verilen oranlarda malzeme tartılarak bilyeli değirmende zirkon bilye ile 24 saat homojen bir karıştırılarak homojen bir toz karışımı elde edilmiştir.

Tablo 3.1 $MoAlB$ MAB fazın B_2O_3 kullanılan sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları

<u>Mo</u>	+	<u>Al</u>	+	<u>B_2O_3</u>	+	<u>C</u>	→	<u>MoAlB</u>
-----------	---	-----------	---	----------------------------	---	----------	---	--------------

Mol Katsayıları	1	1	0,5	1,5	1
Kütle (g)	95,94	32,376	34,81	18,015	181,141
% Kütle	52,96	17,87	19,22	9,95	100
Hazırlanan Karışım (g)	26,48	8,94	9,61	4,97	50

B₂O₃ kullanılarak Mn₂AlB₂ MAB fazını üretmek için Tablo 3.2’de verilen oranlarda malzeme tartılarak bilyeli değirmende zirkon bilye ile 24 saat homojen bir karıştırılarak homojen bir toz karışımı elde edilmiştir. Karbon kullanımının buradaki amacı da reaksiyon sırasında B₂O₃’den oksijeni 3CO olarak uzaklaştırarak B elementinin MAB yapısına bağlanmasını sağlamaktır. Tepkime 3.1’de verilmiştir.



Tablo 3.2 Mn₂AlB₂ MAB fazın B₂O₃ kullanılan sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları

	Mn	+	Al	+	B₂O₃	+	C	→	Mn₂AlB₂
Mol Katsayıları	2		1,2		1		3		1
Kütle (g)	109,86		32,376		69,62		36,03		247,886
% Kütle	44,32		13,06		28,09		14,53		100
Hazırlanan Karışım (g)	22,16		6,53		14,04		7,27		50

BAP projesi kapsamında temin edilen saf B kullanılarak üretilen MoAlB’ün üretimi için kullanılan Mo, Al ve B stokiyometrik oranları Tablo 3.3’de verilirken Mn₂AlB₂’ün üretimi için kullanılan Mn, Al ve B stokiyometrik oranları ise Tablo 3.4’de verilmiştir. Saf bor kullanarak

Yüksek saflıktaki Mo (%99,9), Al (%99,5) ve B (%99,9)’dan MoAlB MAB fazı üretmek için Tablo 3.3’de verilen oranlarda tartılarak bilyeli değirmende zirkon bilye ile 24 saat homojen karıştırılmış ve homojen bir toz karışımı elde edilmesi sağlanmıştır.

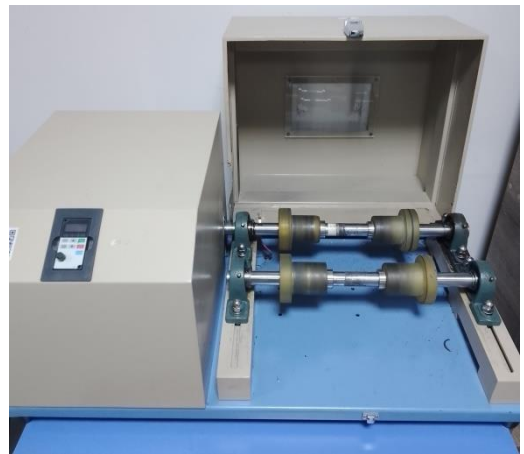
Tablo 3.3 Saf başlangıç tozları kullanılarak gerçekleştirilen MoAlB MAB faz sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları

	Mo	+	Al	+	B	→	MoAlB
Mol Katsayıları	1		1,2		1		1
Kütle (g)	95,94		32,376		10,81		139,126
% Kütle	68,96		23,27		7,77		100
Hazırlanan Karışım (g)	34,48		11,64		3,88		50

Yüksek saflıktaki Mn (%99,9), Al (%99,5) ve B (%99,9)'dan Mn_2AlB_2 MAB fazı üretmek için Tablo 3.4'de verilen oranlarda tartılarak bilyeli değirmende zirkon bilye ile 24 saat homojen karıştırılmış ve homojen bir toz karışımı elde edilmesi sağlanmıştır. Toz karışımlarının gerçekleştirildiği bilyalı yatay değirmene ait görsel Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Saf başlangıç tozları kullanılarak gerçekleştirilen Mn_2AlB_2 MAB faz sentezindeki malzeme kompozisyonu ve oranları

	Mn	+	Al	+	B	→	Mn_2AlB_2
Mol Katsayıları	2		1,2		2		1
Kütle (g)	109,86		32,376		21,62		163,856
% Kütle	67,05		19,76		13,19		100
Hazırlanan Karışım (g)	33,52		9,88		6,60		50



Şekil 3.2 Tozların karıştırıldığı bilyalı yatay değirmen

3.3. Fırınlanması İçin Ürünlerin Hazırlanması ve Fırınlama

MAB faz üretimi için hazırlanan homojen toz karışımlardan 5'er gram alınarak Şekil 3.3'de görseli verilen el presinde 10 MPa basınç altında sıkıştırılmış ve Şekil 3.4'de görseli verilen sinterleme işlemine hazır numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan 4 farklı karışımdan, Tablo 3.4'de detayları verilen 3 farklı sıcaklık ve 2 farklı süre için 6'şar adet numune hazırlanmış olup çalışmada üretilen toplam numune sayısı 24'tür.



Şekil 3.3 El pres makinası



Şekil 3.4 Sinterlenmek üzere hazırlanmış numune örnekleri

Hazırlanan sıkıştırılmış toz karışımları, seramik altlıklarla Şekil 3.5'de görseli verilen atmosfer kontrollü fırına konularak argon atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi, Tablo 3.5'de belirtilen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş olup fırın bu

sıcaklıklara 10 °C/dk hızla ısıtılmış, fırın istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra belirtilen sürelerde (60 dakika veya 120 dakika) bekletildikten sonra soğumaya bırakılmıştır.

Tablo 3.5 Üretilen MAB faz numuneleri ve üretimine ilişkin sıcaklık-bekleme süresi parametreleri

Numune	Sıcaklık	Bekleme Süresi
B ₂ O ₃ ve ilave C kullanılarak üretilen MoAlB MAB faz numuneleri	900 °C	60 dakika
		120 dakika
	1000 °C	60 dakika
		120 dakika
	1100 °C	60 dakika
		120 dakika
	900 °C	60 dakika
		120 dakika
B ₂ O ₃ ve ilave C kullanılarak üretilen Mn ₂ AlB ₂ MAB faz numuneleri	1000 °C	60 dakika
		120 dakika
	1100 °C	60 dakika
		120 dakika
	900 °C	60 dakika
		120 dakika
	1000 °C	60 dakika
		120 dakika
Saf tozlardan üretilen MoAlB MAB faz numuneleri	1100 °C	60 dakika
		120 dakika
	900 °C	60 dakika
		120 dakika
	1000 °C	60 dakika
		120 dakika
	1100 °C	60 dakika
		120 dakika
Saf tozlardan üretilen Mn ₂ AlB ₂ MAB faz numuneleri	900 °C	60 dakika
		120 dakika
	1000 °C	60 dakika
		120 dakika
	1100 °C	60 dakika
		120 dakika
	900 °C	60 dakika
		120 dakika

İlk üretimler grafit pota içerisinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Ancak yapılan karakterizasyonlarda yapı içerisinde fazlaca karbon olduğu ve fazın MAB fazdan çok MAX faz olarak form aldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle üretimler için laboratuvarında

seramik potalar üretilmiş ve numuneler Şekil 3.6’da gösterildiği gibi bu seramik potalarla fırınlanarak sinterlenmiştir.



Şekil 3.5 Atmosfer kontrollü fırın



Şekil 3.6 Malzemelerin fırınlanması

3.4. Analiz İçin Numunelerin Hazırlanması

3 farklı sıcaklık ve 2 farklı sürede üretilen MAB fazlı bulk yapılar, Şekil 3.7’de görseli verilen halkalı öğütücüde dakikada 1000 devir hızla 120 sn çalıştırılarak toz haline getirilerek Şekil 3.8’deki gibi paketlenmiş ve analizler için gerekli laboratuvarlara gönderilmiştir.



Şekil 3.7 Halkalı Öğütücü



Şekil 3.8 Analiz için hazırlanan numuneler

3.5. Üretilen MAB Fazlara Uygulanan Karakterizasyonlar

3.1.1 Yoğunluk ölçümü

Üretilen MAB fazlı yapıların bulk (yığinsal) yoğunluk, % su emme oranı ve % görünür porozite oranları hesaplanmıştır. Numunelerin bulk yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre aşağıda verilen denklemden yararlanarak hesaplanmıştır.

$$d = \frac{(A)x(d_s)}{A - B} \quad (3.1)$$

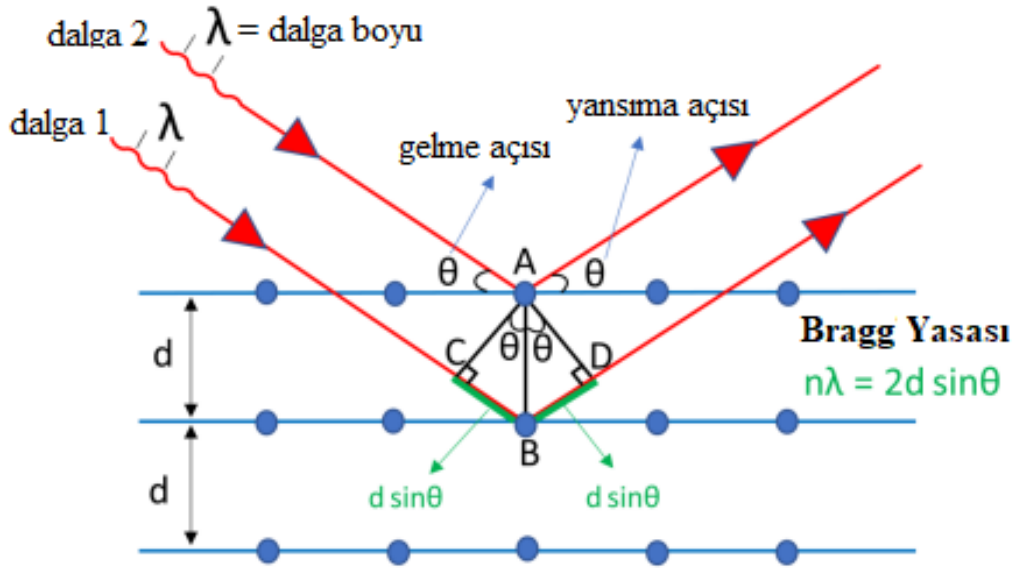
Bu denklemde; d =Numunenin yoğunluğu (gr/cm^3), A =Numunenin havadaki ağırlığı (gr), B =Numunenin su içerisindeki ağırlığı (gr) ve d_s = Ölçümün yapıldığı sıcaklıktaki suyun yoğunluğu (gr/cm^3) ifade etmektedir.

3.1.2 Tane boyut analizi

MAB fazlı yapılar, öğütölüp toz haline getirildikten sonra toz tane boyut dağılımını analiz etmek amacıyla Mastersizer 2000 marka lazer tane boyut ölçüm cihazı kullanılmıştır.

3.1.3 XRD Analizi

X-ışını difraktometrisi, malzemenin içerdiği fazları belirlemekte, nicel faz analizinde, sıcaklık, basınç gibi fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde, tanecik boyutu belirlemede, tanecik yönelimi belirlemede, kimyasal kompozisyonu belirlemede ve örgü sabitlerini bulmada oldukça fazla kullanılan bir yöntemdir. X-ışını tüpü ile belirli bir dalga boyuna sahip oluşturulan X-ışını demeti numunedeki bir dizi paralel atomik düzlem üzerine yönlendirilir. Bragg yasasının sağlandığı koşullarda sinyal dedektörde toplanarak θ açısına bağlı olarak X-ışını şiddeti grafiği elde edilir. Her bir kristalin faz için bu kırınım desenleri o faz için bir nevi genetik kod şeklinde düşünülebilir. XRD yönteminde kristal yapı içerisinde bulunan fazlar, kafes yapısı, Scherrer yöntemi ile tane boyutu gibi özellikler belirlenebilir (Dağlıoğlu, 2018). XRD'nin temel çalışma prensibi, x-ışını dalga boyu, düzlemler arası boşluk ve kırınım açısı arasındaki ilişkiyi belirleyen Bragg yasası denklemdir. Şekil 3.9'da XRD analizinden veri elde etmede esas alınan Bragg yasasına ilişkin şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.9 X-ışını dalga boyu, düzlemler arası boşluk ve kırınım açısı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Demir, 2023).

Bu çalışma kapsamında üretilen MAB fazlı yapıların faz analizi, 40 kV ve 15 mA altında $0,2^\circ$ adım boyutuna sahip bir Cu K α radyasyonu ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) kullanılarak X-ışını kırınım (XRD) analizi (Rigaku, Miniflex600) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üretilen MAB fazlı yapıların kristal yapı analizlerinin gerçekleştirildiği XRD cihazına ait görsel Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Rigaku, Miniflex600 XRD analiz cihazı

Çalışmada üretilen MAB fazlı yapıların XRD ölçümleri $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ arasında $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızında Cu-K α radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MAB fazların teorik XRD kırınım deseninin çiziminde Crystallograpy Open Database açık kaynak erişiminde bulunan MoAlB ve Mn₂AlB₂ kristal parametrelerinden yararlanılmıştır.

4. BULGULAR

Ürünlerin yoğunlukları bulk (yığinsal) yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre hesaplanmış ve tablo oluşturulmuştur. Ürünler mevcut sıcaklıklara çıkarıldıktan sonra önce 1 saat sonra ise 2 saat bu sıcaklıkta bekletilip ardından oda sıcaklığına düşmesi beklenmiştir. Tablo 4.1’de bekleme sürelerine göre de elde edilen ürünlerin yoğunluk tablosu bulunmaktadır. Ayrıca bu malzemelerin XRD sonuçları önce tek tek sonra bütünsel olarak incelenerek yorumlanmıştır.

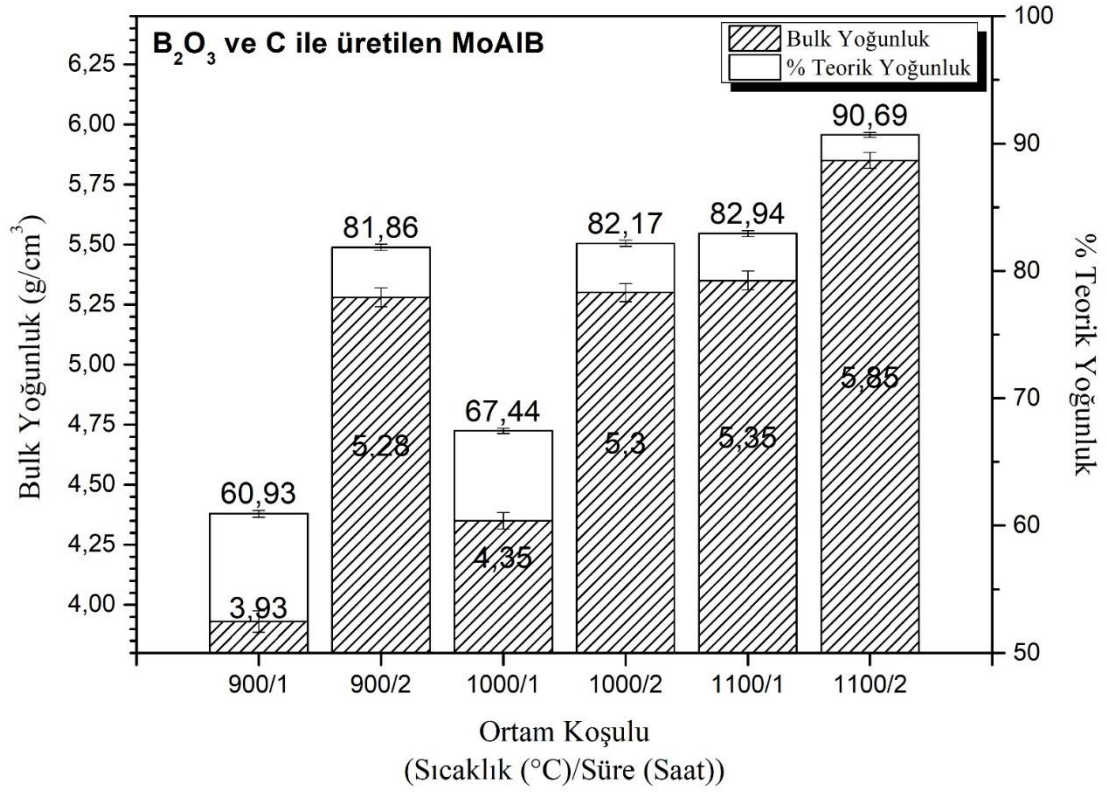
Tablo 4.1 MAB fazlı ürünlerin yoğunlukları (g/cm³)

	Bekleme süresi 1 saat			Bekleme süresi 2 saat		
	900 °C	1000 °C	1100 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C
MoAlB (Bor ile)	4,25	4,31	4,32	4,31	4,33	4,67
MoAlB (B₂O₃ ile)	3,93	4,35	5,85	5,28	5,30	5,35
Mn₂AlB₂ (Bor ile)	2,97	2,98	3,37	2,76	3,11	3,28
Mn₂AlB₂ (B₂O₃ ile)	2,55	2,71	2,72	2,47	2,65	2,75

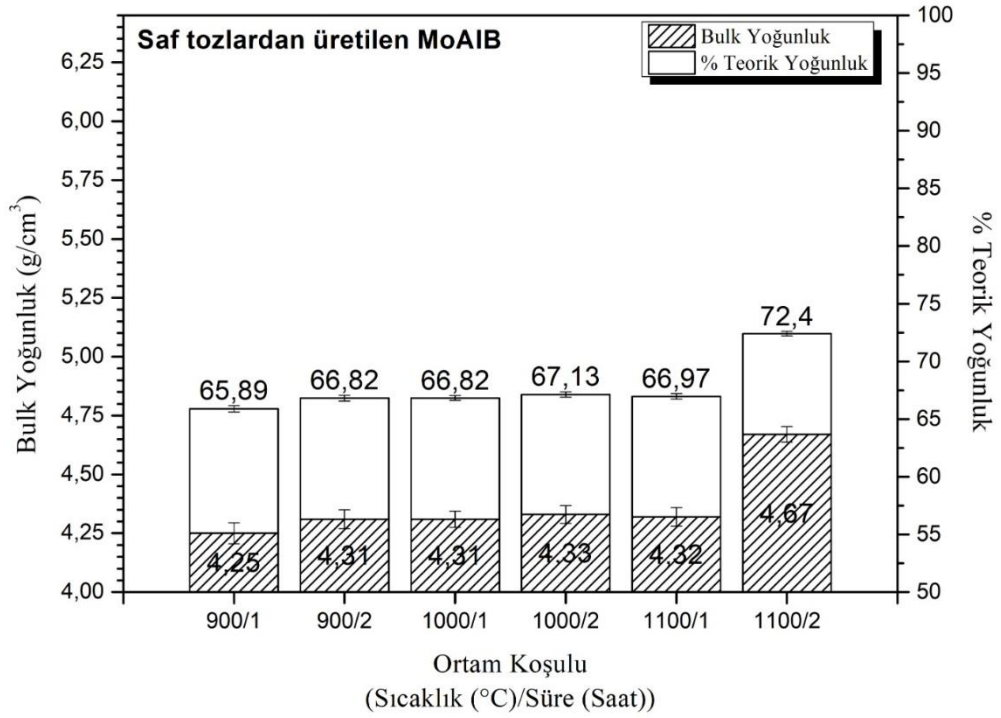
Tablo 4.1 incelendiğinde yoğunluklarda sıcaklığa bağlı olarak artış hesaplanmıştır. Bu durum sıcaklık yükseldiğinde madde taneciklerinin birbirine daha çok kenetlenip hacminin azaldığını göstermektedir. Bor ile yapılan çalışmalarda yoğunluk artışı az ancak boroksit katkılı ürünlerde yoğunluk artışı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedenini araştırdığımda ise B₂O₃’ün ;

- ✓ Yüksek sıcaklıkta cama benzeyen bir yapı oluşturarak akışkanlaştırıcı görev gördüğünü ve iyi difüzyon sağladığına ulaştım. İyi difüzyon gözenekleri azaltır ve yoğunluğun artmasına sebep olmuş olabilir.
- ✓ B₂O₃ düşük erime noktasına sahip olması nedeniyle reaksiyonlar erken başlar buda iyi kristalleşip sıkışmaya neden olmuş olabilir.

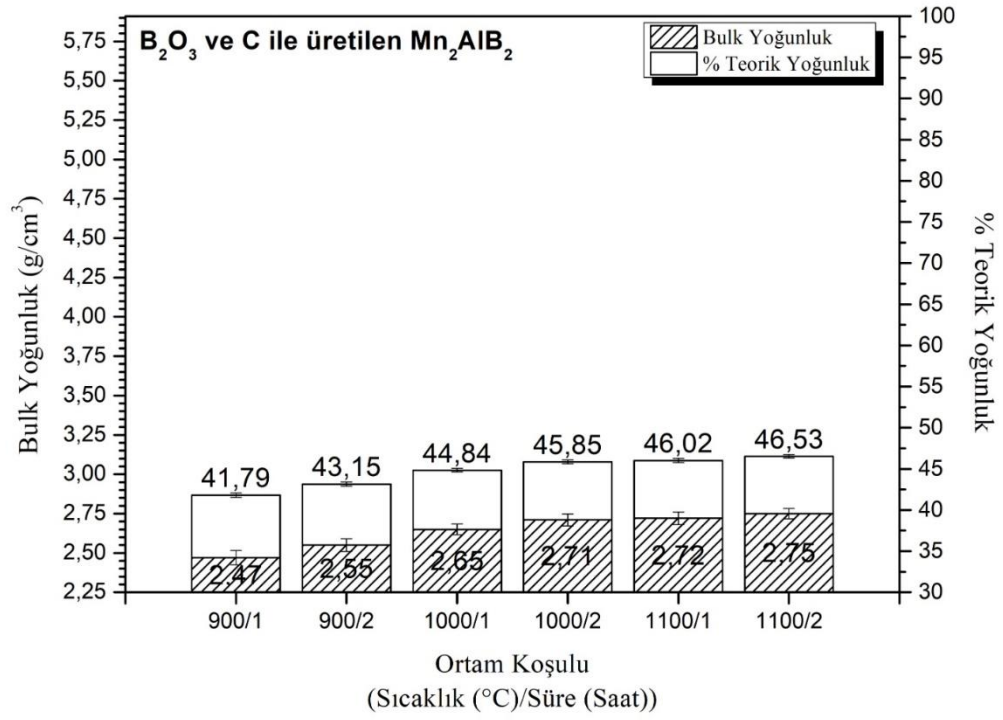
Şekil 4.1, şekil 4.2, şekil 4.3 ve şekil 4.4’de ise hesaplanan bulk yoğunluk hesaplarının teorik ürün yoğunlukları ile karşılaştırmasının yapıldığı grafikler verilmiştir.



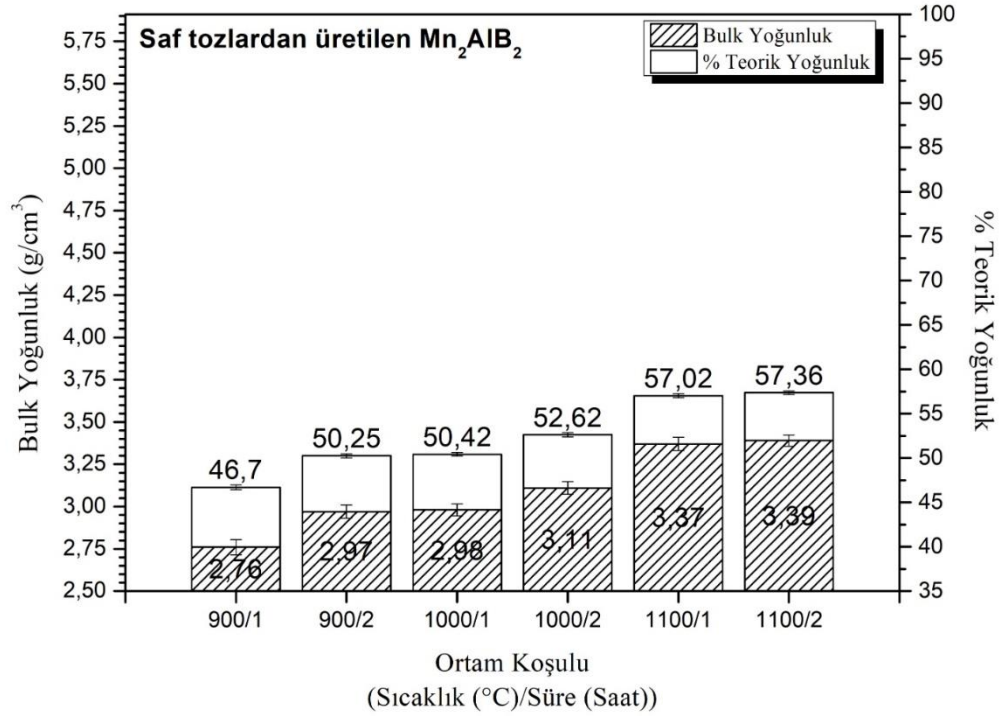
Şekil 4.1 B₂O₃ ve C ile üretilen MoAlB



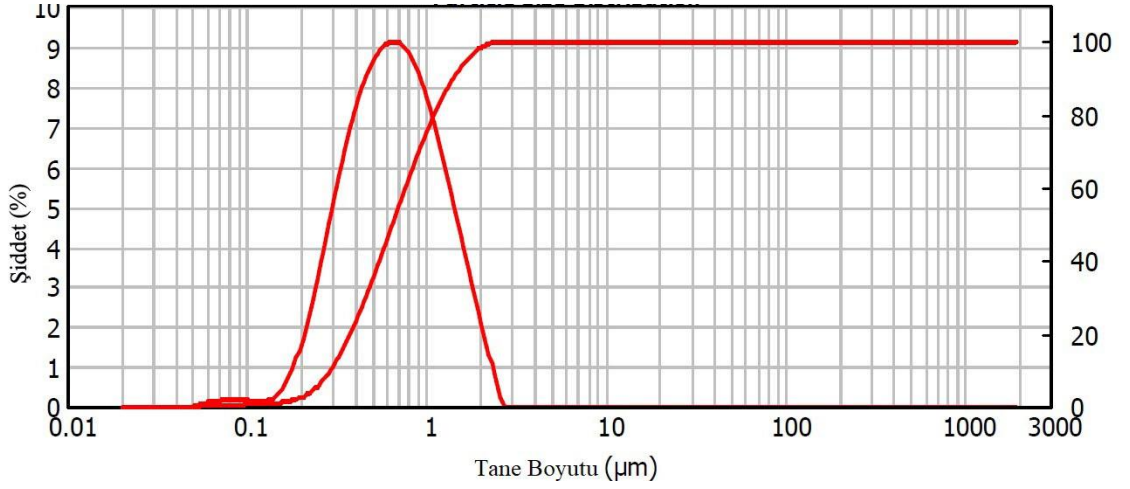
Şekil 4.2 Saf tozlardan üretilen MoAlB



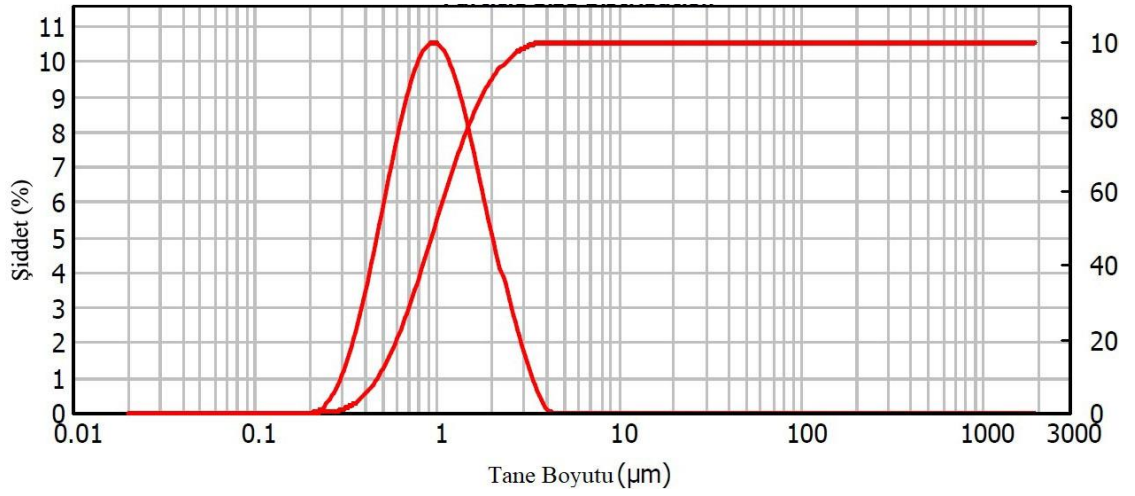
Şekil 4.3 B₂O₃ ve C ile üretilen Mn₂AlB₂



Şekil 4.4 Saf tozlardan üretilen Mn₂AlB₂



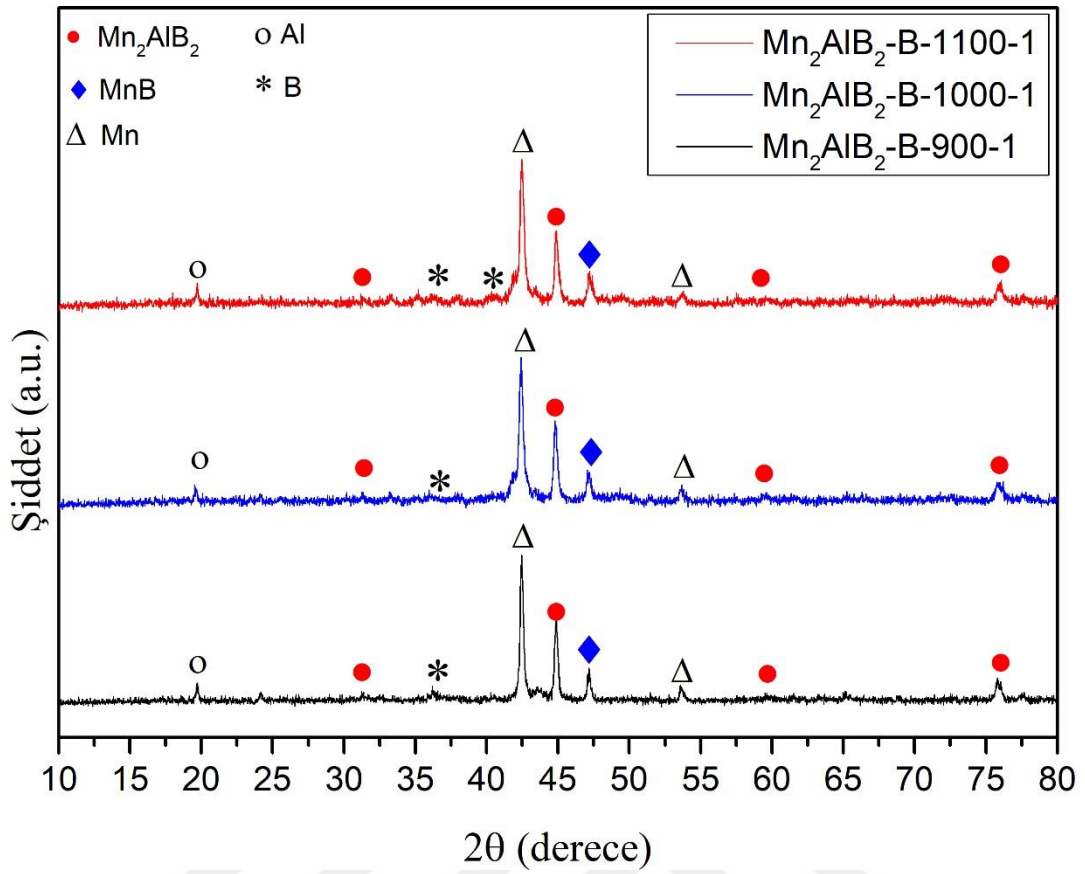
Şekil 4.5 Mo, Al ve B ile hazırlanan tozun değirmende karıştırıldıktan sonraki tane boyutu



Şekil 4.6 Mn, Al ve B ile hazırlanan tozun değirmende karıştırıldıktan sonraki tane boyutu

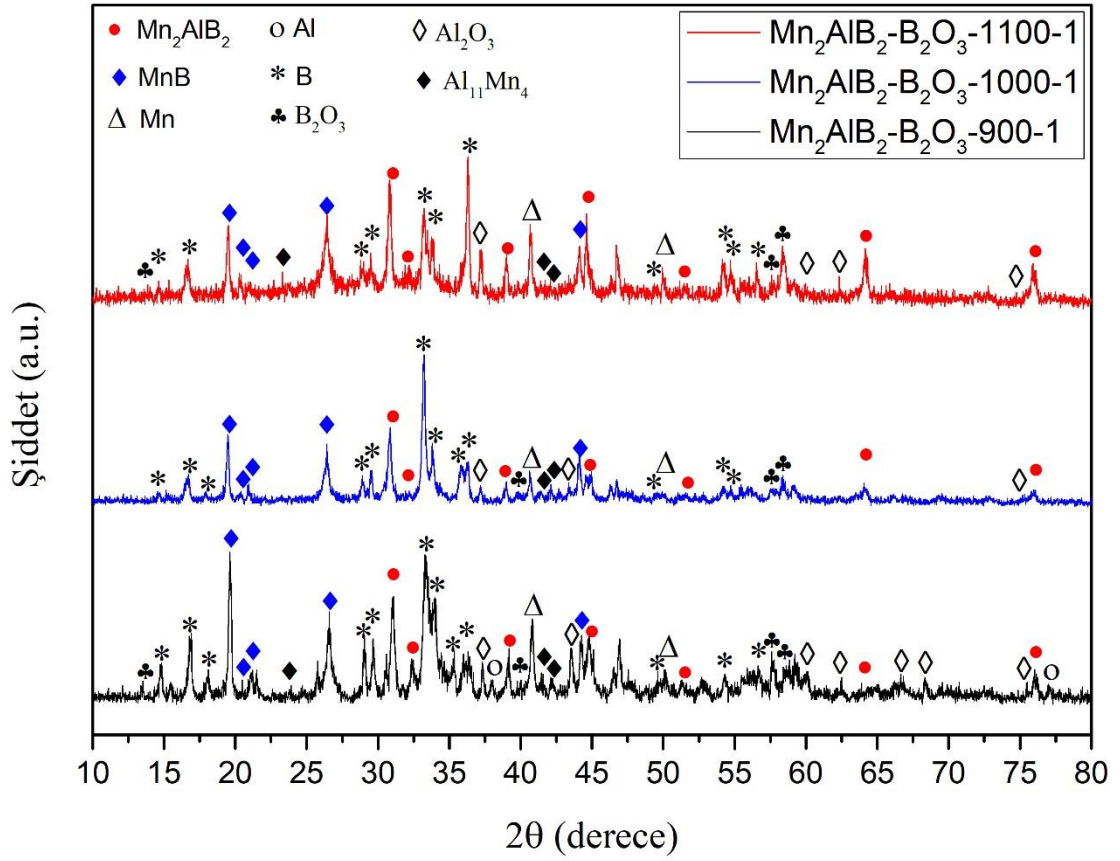
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da B ile verilen sitokiyometrilere hazırlanan tozların değirmende 24 saat karıştırıldıktan sonra ısıtma işlemi öncesi tane boyutları ölçülmüştür. Mo, Al ve B ile hazırlanan tozun D10, D50 ve D90 değerleri sırasıyla 1 mikron, 2 mikron ve 2,7 mikrondur. Mn, Al ve B ile hazırlanan tozun D10, D50 ve D90 değerleri ise sırasıyla 0,7 mikron, 1 mikron ve 2,5 mikrondur.

MAB Fazlı yapılar belirtilen sitokiyometrik oranlarda fırınlanan ürünlerin XRD sonuçları aşağıdaki grafiklerde yer almaktadır.



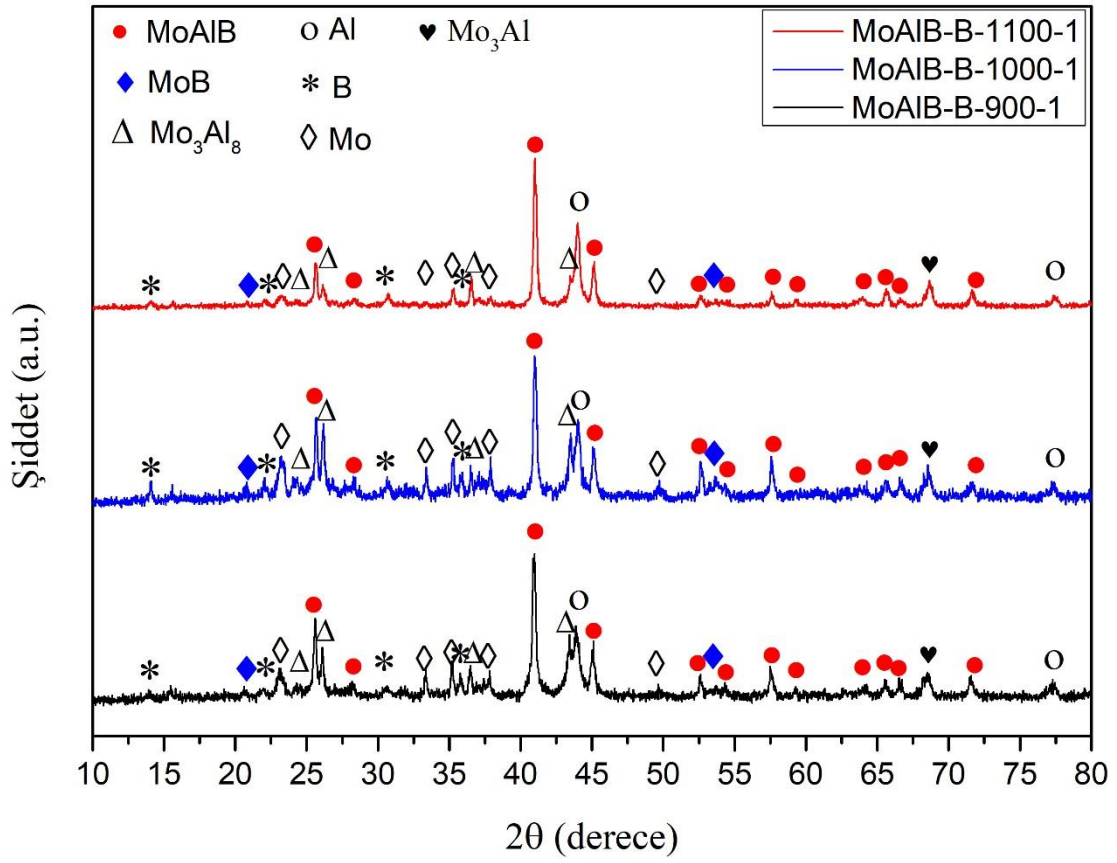
Şekil 4.7 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (1 saat bekleme)

Şekil 4.7’de Bor ile sentezlenmek istenen MAB fazının grafiğine baktığımızda 900 °C’de Mn_2AlB_2 ’ye ait bazı pikler gözlemlenmekteyken yan fazlara (MnB, Mn, B) ait pikler daha baskın durumdadır. Bu sebeple Mn_2AlB_2 saf fazının tam anlamıyla oluşmadığı anlaşılmaktadır. 1000 °C’de ve 1100 °C’de Mn_2AlB_2 pik şiddetlerinde belirgin olmamakla beraber artış gözlenmiştir. Ancak hala ara faz ve tepkimeye girmemiş ham madde varlığını korumaya devam etmektedir.



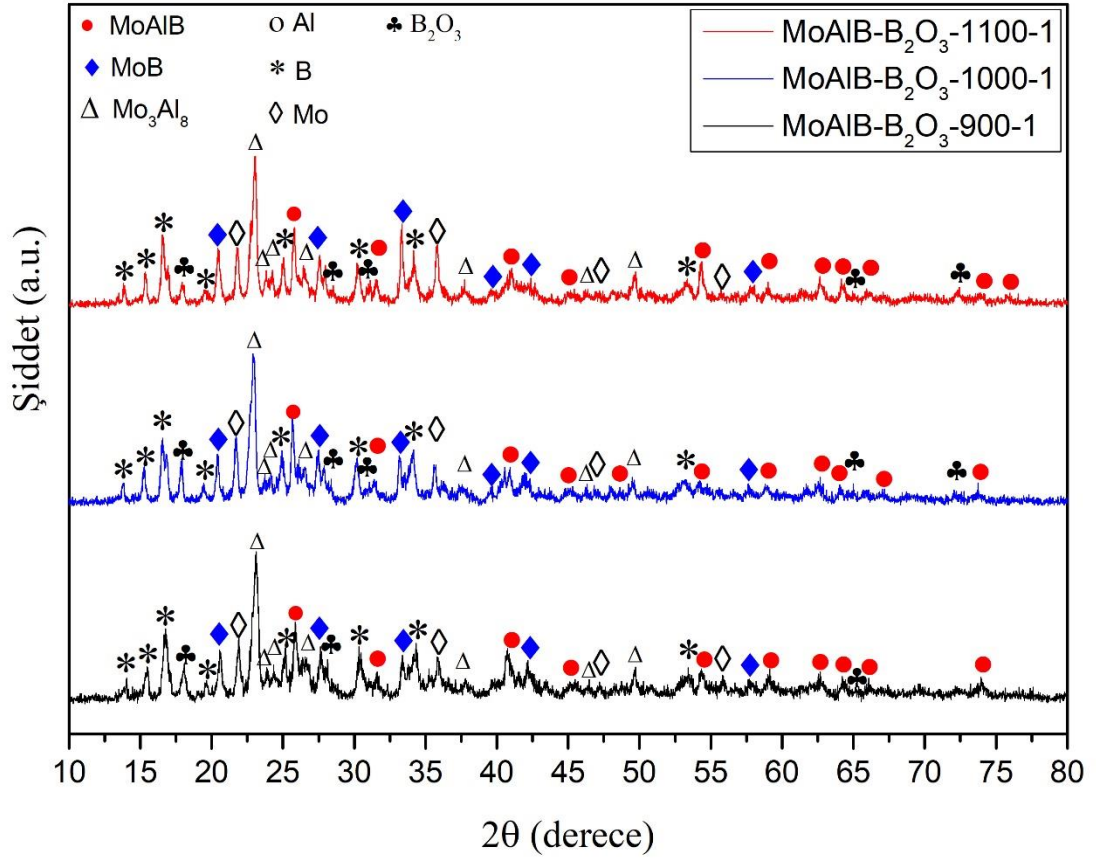
Şekil 4.8 Boroksit ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (1 saat bekleme)

Şekil 4.8’da verilen, boroksit kullanılarak sentezlenen Mn_2AlB_2 ’nin XRD sonuçları değerlendirildiğinde, 900 °C’de çok sayıda yan faz (Mn , Al , MnB , Al_2O_3 , $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$, B_2O_3) olduğu görülmektedir. MAB fazına ait pikler görünse de yan fazların miktarı nedeniyle reaksiyonların yeterince ilerlemediği gözlenmektedir. 1000 °C ve 1100 °C’de Mn_2AlB_2 fazına ait pik şiddetleri artmış olmakla birlikte hala yan fazların baskın etkisi devam etmiştir.



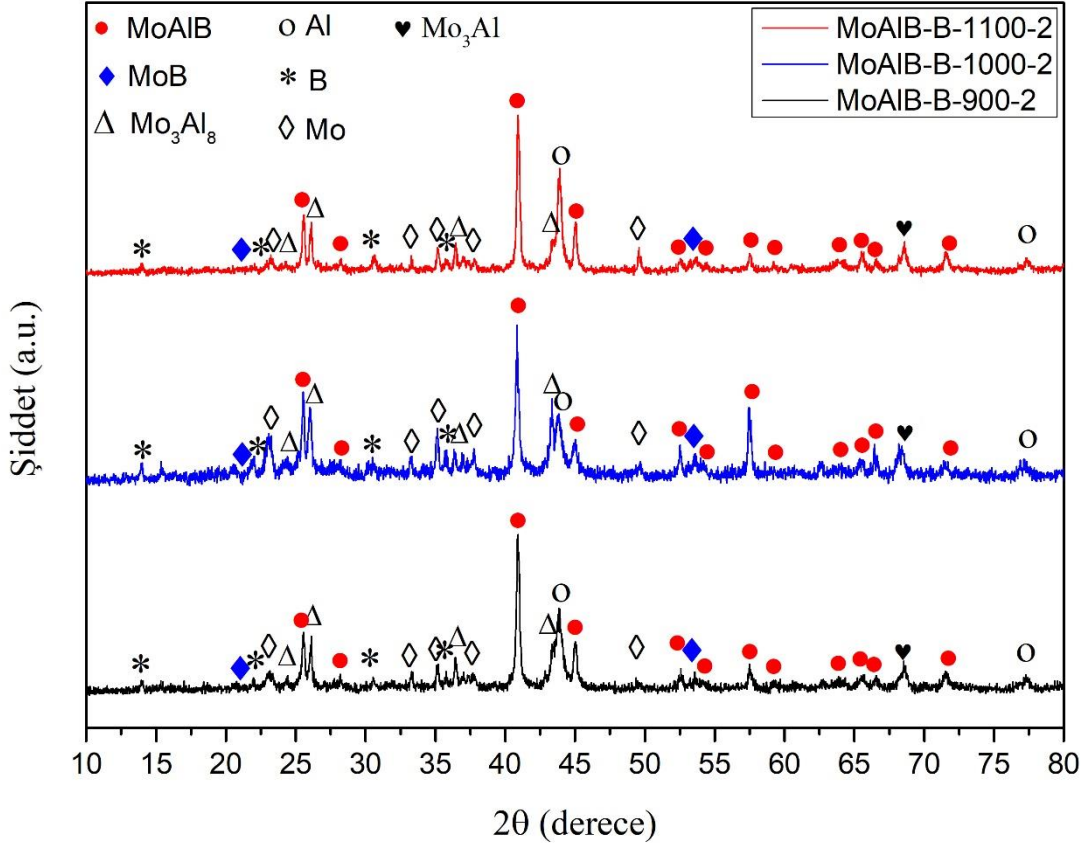
Şekil 4.9 Bor ile sentezlenen MoAlB (1 saat bekleme)

Diğer sonuçlarda olduğu gibi Şekil 4.9’de bor ile sentezlenen MoAlB’un XRD grafiğinde sıcaklık 900 °C’den 1100 °C’ye artarken hedef faz piklerinin sayısı aynı kalsa da şiddetlerinde artış gözlemlenmiştir. Yan fazların (MoB, Mo₃Al₈, Mo₃Al) ve tepkimeye girmemiş hammadde pikleri üç sıcaklıkta da varlığını sürdürmektedir.



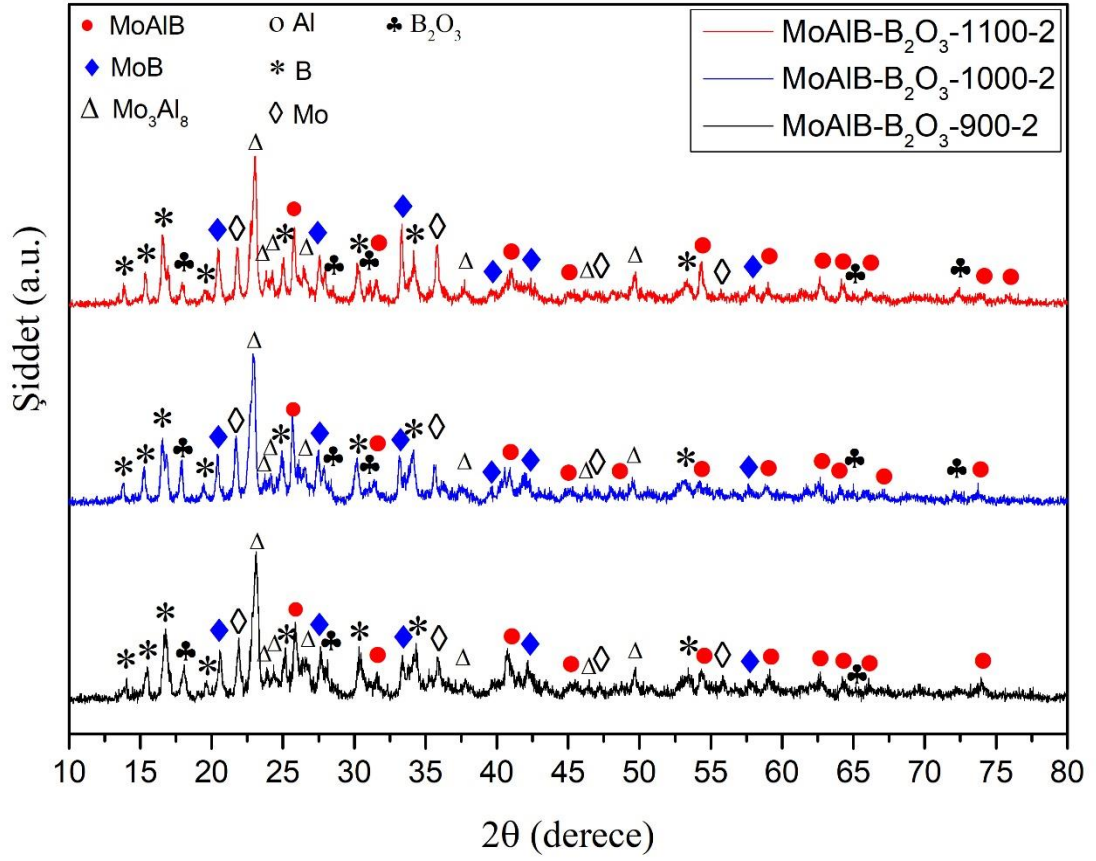
Şekil 4.10 Boroksit ile sentezlenen MoAlB (1 saat bekleme)

İncelenen Şekil 4.10'deki grafikte bor oksit kullanılarak hazırlanan MoAlB MAB fazının XRD'si incelendiğinde, 900 °C'de yan fazlar (MoB, Mo₃Al₈, B₂O₃, Mo, B) bor ile sentezlenene göre daha fazla olduğu ve hedef faz pikleri ise bu sıcaklıkta daha az olduğu gözlemlenmiştir. 1000 °C'de MAB fazına ait piklerin şiddetinin arttığı ancak hala yüksek miktarda yan fazın bulunduğu görülmektedir. 1100 °C'de gerçekleştirilen sentezde, MoAlB fazının pikleri artış gösterse de ortamda bulunan Mo ve B varlığı tepkimeye girmeyen hammaddelerin varlığına işaret etmektedir. Diğer çalışmalara kıyasla burada Al ile karşılaşılmamıştır. Al'nin sitokiyometrik oranında artışa gidilmesi ile sentezlenen MAB faz miktarının artacağı ve dolayısıyla ortamda bulunan fazla Mo ve B'ü azaltacağı öngörülmüştür.



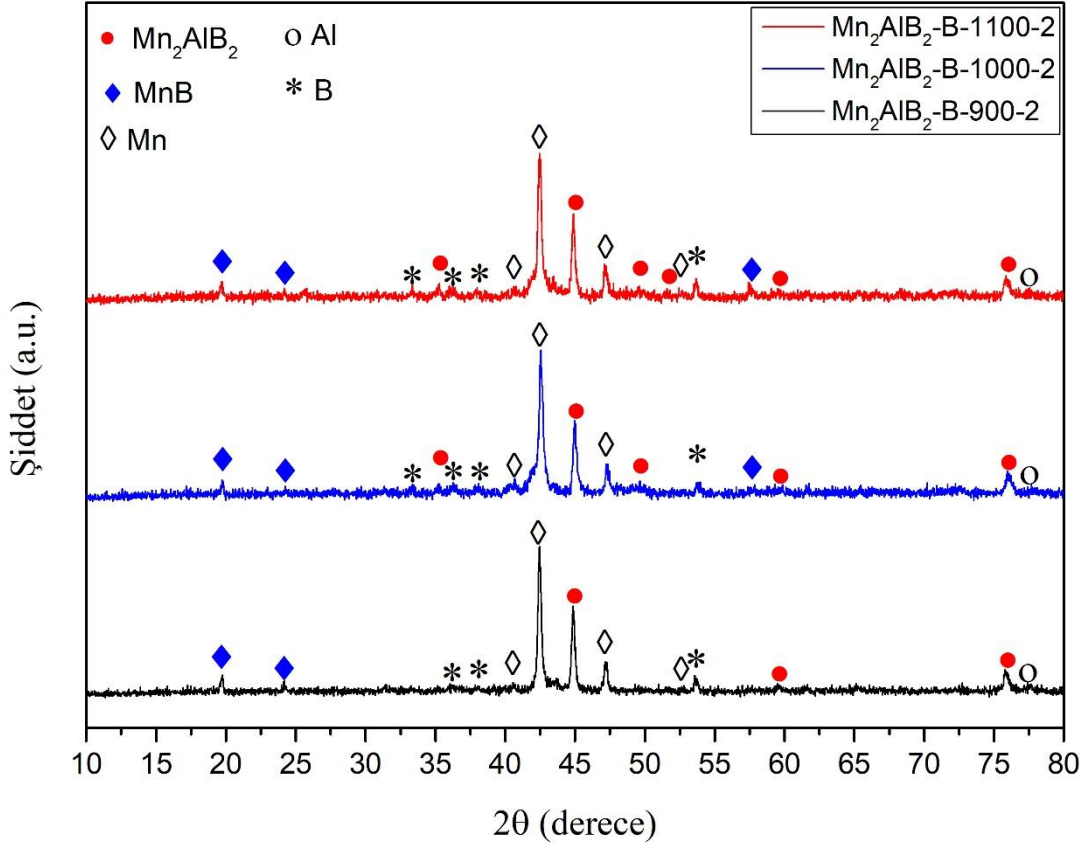
Şekil 4.11 Bor ile sentezlenen MoAlB (2 saat bekleme)

Şekil 4.11'deki grafikte yine bor kullanılarak sentezlenen MoAlB mevcut sıcaklıkta 2 saat bekletilerek oda sıcaklığına soğutulması sonucu oluşan ürünün XRD'si bulunmaktadır. MoAlB fazının pikleri tüm sıcaklıklarda gözlemlense de yine sıcaklık artışı pik şiddetlerinin artışına sebep olmuştur. 900 °C ve 1000 °C'de MoB, B, Mo ve Mo₃Al₈ gibi istenmeyen yan fazlar baskın ve 1100 °C'de hedef faz pik şiddeti artsa da yan fazların ve tepkimeye girmemiş hammaddenin varlığı gözlenmiştir.



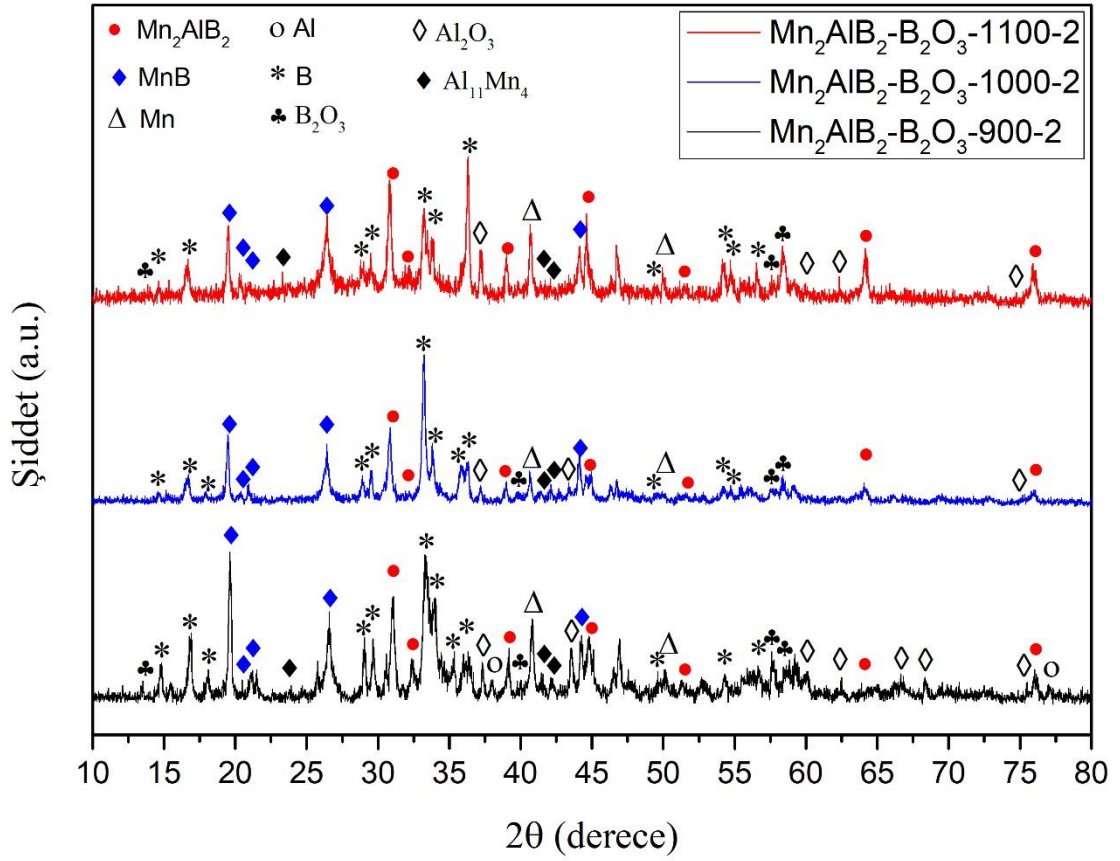
Şekil 4.12 Boroksit ile sentezlenen MoAlB (2 saat bekleme)

Şekil 4.12’de B_2O_3 katkısı ile sentezlenen MoAlB MAB yapısının mevcut sıcaklıkta 2 saat bekletilerek elde edildiği ürünün XRD grafiği yer almaktadır. 900 °C’de hedef faz piklerinin yanı sıra MoB, Mo_3Al_8 , B_2O_3 gibi yan fazlar ve tepkimeye girmemiş Al ve Mo olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte yan fazların az da olsa azaldığı ve bazı hedef faz piklerinin şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak yine B ile sentezlenen malzeme ile karşılaştırıldığında çok fazla sayıda yan faz oluşumu tepkimelerin beklenenin aksine ilerlediğini göstermektedir.



Şekil 4.13 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 (2 saat bekleme)

Şekil 4.13'deki grafik ise bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 malzemesinin sentez sıcaklığında 2 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutulması sonucu elde edilen ürünün XRD grafiğidir. Grafik incelendiğinde, 3 farklı sıcaklıkta gerçekleşen sentezlerde temel fazın haricinde Mn, Al, B gibi elementlere ait fazlar ile MnB gibi yan fazlar bulunduğu görülmektedir. Ancak B_2O_3 ile sentezlenene göre daha az ve belirgin piklerle karşılaşmaktayız. Ayrıca hedef faz pikleri sıcaklık artışı ile beraber hem sayılarına hem de şiddetlerini artırdığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.14 Bor ile sentezlenen MoAlB (2 saat bekleme)

Şekil 4.14’de ise MoAlB MAB fazının B_2O_3 ile üretilmesi sonucu oluşan ürünün XRD grafiği bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde yine düşük sıcaklık olan 900 °C’de yan faz (MnB , Al_2O_3 , $Al_{11}Mn_4$, B_2O_3 , vb.) yoğunluğu gözlenmiştir. Sıcaklık artışı bu sefer hedef piklerde belirgin bir şekilde gözlenmese de yan fazların 1000 °C ve 1100 °C’de azaldığı gözlemlendi.

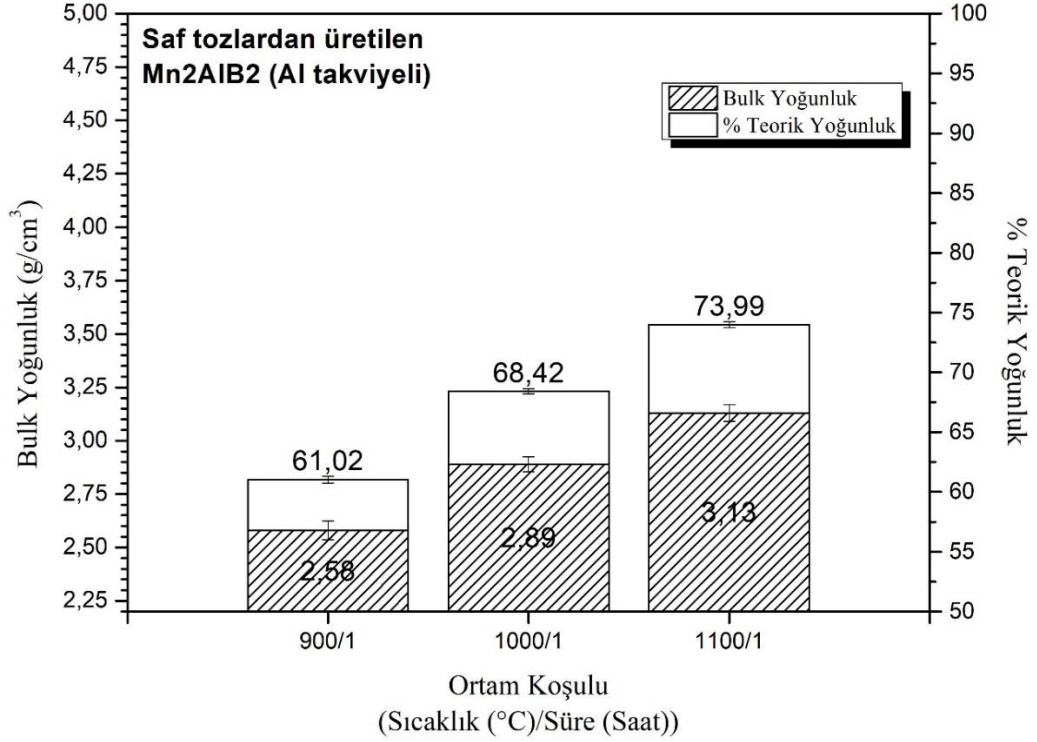
Yaptığımız çalışmalarda artan hammadde nedeninin Al olduğu düşünülerek bor ile hazırlanan tozlara %200 Al takviyesi ile çalışmalar tekrar edilmiştir. Ayrıca 1 saat ve 2 saat bekleme süresiyle üretilen aynı ürünlerin XRD grafikleri birbirine çok yakın çıktığı için 1 saat bekleme süresi tercih edilmiştir.

Tekrarlanan çalışma sonucunda elde edilen ürünlerin yine bulk (yığınsal) yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre hesaplanmış ve Tablo 4.2 oluşturulmuştur.

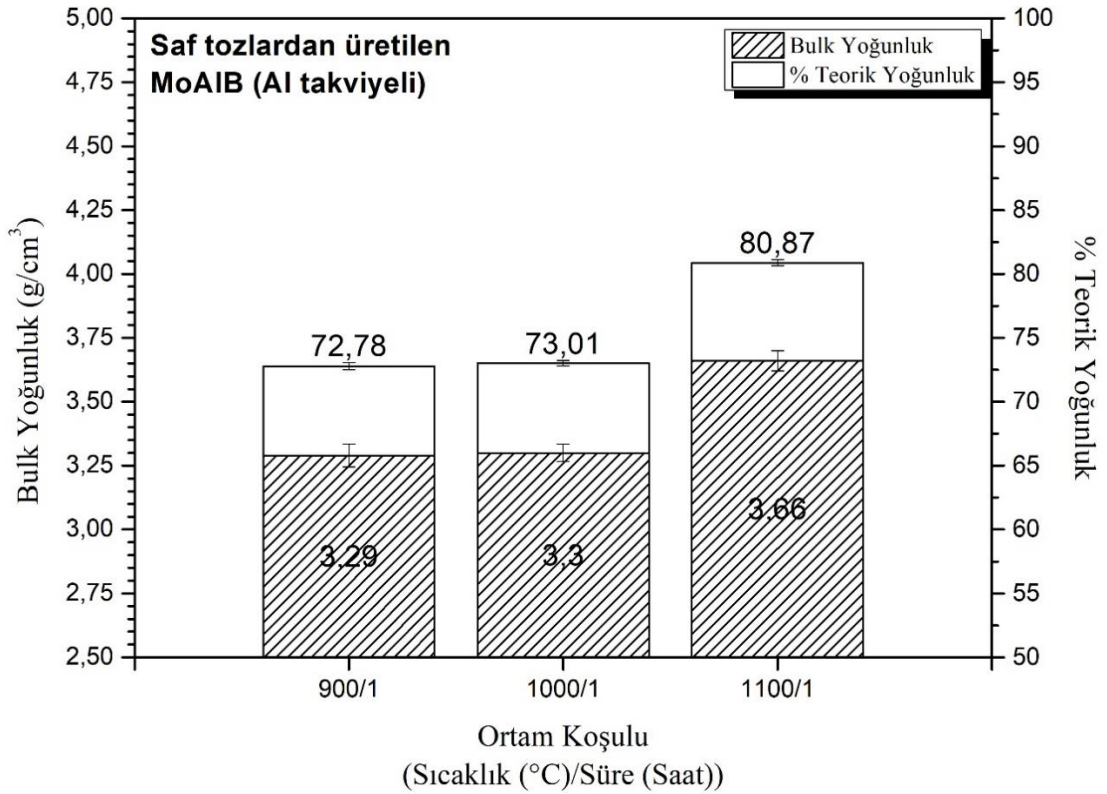
Tablo 4.2 Al takviyesi ile üretilen MAB yapıların yoğunlukları (g/cm^3)

	900 °C	1000 °C	1100 °C
Mn_2AlB_2	2,58	2,89	3,13
MoAlB	3,29	3,3	3,66

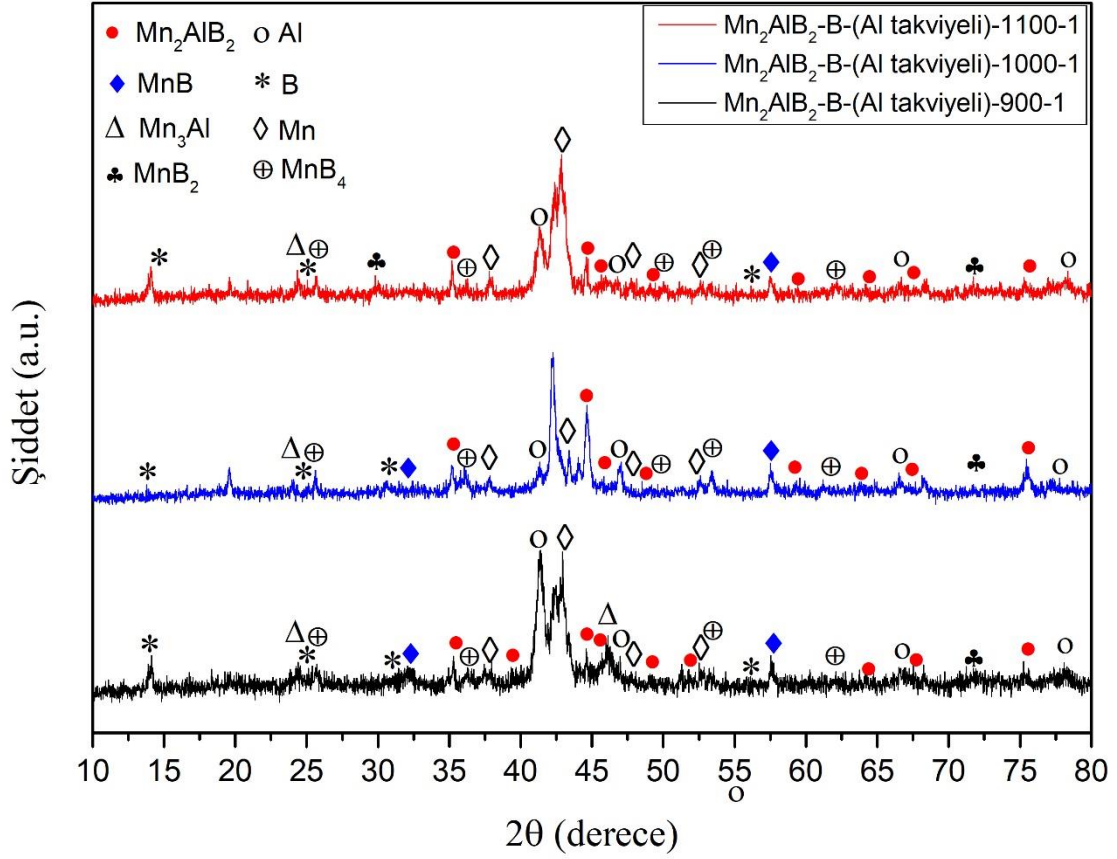
Hesaplanan yoğunluklar Şekil 4.15 ve şekil 4.16'da teorik yoğunluklar ile kıyaslaması yapılmıştır. İlk yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında ise Al takviyesi ile üretilen MAB fazlı yapıların teorik yoğunluğa daha fazla yaklaştığı söylenebilir.



Şekil 4.15 Saf tozlardan ve Al takviyesi ile üretilen Mn₂AlB₂

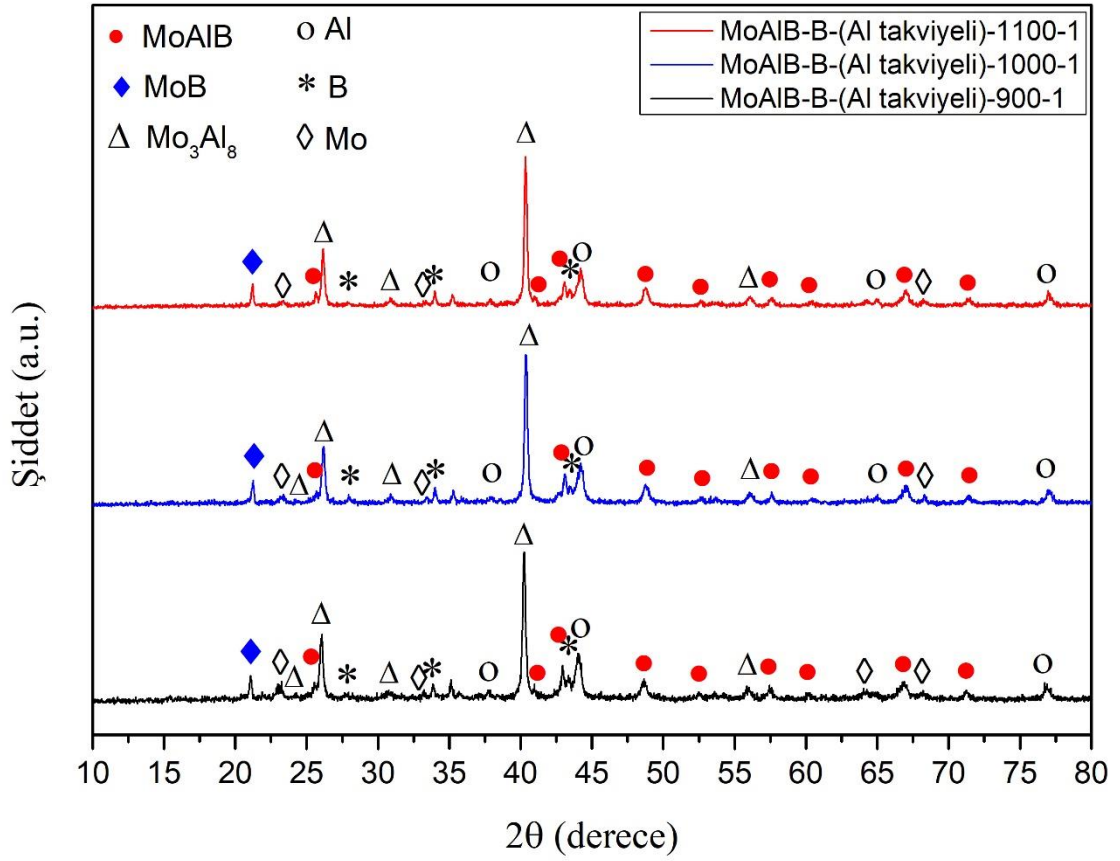


Şekil 4.16 Saf tozlardan ve Al takviyesi ile üretilen MoAlB



Şekil 4.17 Bor ile sentezlenen Mn_2AlB_2 Al takviyeli (1 saat bekleme)

Şekil 4.17’de Al takviyesi ile sentezlenen Mn_2AlB_2 ürününün XRD grafiği bulunmaktadır. XRD sonuçlarına göre çalışmada uygulanan tüm sentez sıcaklarında yan fazların (Mn, MnB, MnB₄, B, Al, Mn₃Al) bulunduğu açıkça görülmektedir. Fakat 1000 °C’deki hedef faza ait pik şiddetlerindeki artış dikkat çekmektedir. Önceki sentez sonuçları ile kıyaslandığında hedef faz piklerinin daha fazla gözlemlendiği ancak Al takviyesinin Mn₃Al gibi yan fazların oluşmasına neden olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.18 Bor ile sentezlenen MoAlB Al takviyeli (1 saat bekleme)

Şekil 4.18’de ise yine bor ile ve Al takviye edilerek sentezlenen MoAlB’un XRD grafiği bulunmaktadır. Bu çalışmada da hedef faz pikleri tüm sıcaklıklarda gözlenmiştir. Ancak 900 °C’de MoB ve Mo₃Al₈ gibi yan fazların yanı sıra Al ve B’un düşük piklerine rastlanmıştır. Sıcaklık artışı hedef faz piklerini artırmıştır. 1100 °C incelendiğinde yan fazların çok az miktarda azdığı ancak hedef faz piklerinde belirgin bir değişiklik olmadığı gözlemlendi. Düşük miktarda Al kullanılan ilk çalışma ile karşılaştırıldığında, hedef faz piklerinde azalma ve yan fazlarda artma olduğu gözlemlenmiştir.

5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm sentezler değerlendirildiğinde, bor ve boroksit ile gerçekleştirilen Mn_2AlB_2 ve $MoAlB$ MAB fazlı yapıların sentezinde en yüksek verim, saf bor ile yapılanlarda elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda yan fazların sayıca çok olma nedeninin tamamlanamayan reaksiyonlar olması muhtemeldir. Bor kaynağı olarak B_2O_3 'ün kullanıldığı sentezlerde, O ile Al reaksiyona girerek Al_2O_3 gibi yan fazların oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca metalik Al ve Mn'nin intermetalik bileşiklere ($Al_{11}Mn_4$) dönüşmesine de katkı sağlamış olabilir.

Isıl işlem öncesi yapılan tane boyut analizlerinde başlangıç hammaddelerinin karıştırılması sonucunda homojen bir tane boyut dağılımı elde edilmiştir.

Tüm üretimler incelendiğinde yoğunluklarda sıcaklığa bağlı olarak artış hesaplanmıştır. Bu durum sıcaklık yükseldiğinde madde taneciklerinin birbirine daha çok kenetlenip hacminin azaldığını göstermektedir. Bor ile yapılan çalışmalarda yoğunluk artışı az ancak boroksit katkılı ürünlerde yoğunluk artışı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedenini araştırdığımda ise B_2O_3 'ün ;

- ✓ Yüksek sıcaklıkta cama benzeyen bir yapı oluşturarak akışkanlaştırıcı görev gördüğünü ve iyi difüzyon sağladığına ulaştım. İyi difüzyon gözenekleri azaltır ve yoğunluğun artmasına sebep olmuş olabilir.
- ✓ B_2O_3 düşük erime noktasına sahip olması nedeniyle reaksiyonlar erken başlar buda iyi kristalleşip sıkışmaya neden olmuş olabilir.

Ayrıca Al takviyesi ile sonradan tekrar hazırlanan tozlar ile elde edilen ürünlerin yoğunlukları ilk duruma göre teorik yoğunluğa daha yakın olduğu saptandı. Ancak yine teorik yoğunluk ile aralarındaki fark bize ürünün tam anlamıyla oluşmadığını göstermektedir.

Yüksek oranda Al takviyesi ile yapılan çalışmalarda ise Mn_2AlB_2 de verim artmış ancak yan fazları da beraberinde artırmıştır. $MoAlB$ 'da sentezinde hedef fazın azalmasının nedeni olarak eklenen Al'un farklı yan fazlar oluşturması olduğu varsayılmaktadır.

Tüm sonuçlar, MAB fazlı yapıların oluşmak için daha yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmiş olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Bu durum, sıcaklık artışının difüzyon kinetiğini hızlandırarak hedef faz oluşumunu desteklediği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca sentez sırasında Al elementinin tepkimeye girmeyerek havaya karışmasını ve yan oluşturma ihtimalini düşürecek alternatifler üzerinde durulması gerektiğini söyleyebiliriz.

6. KAYNAKLAR

- Ade M., Hillebrecht H. (2015). Ternary Borides Cr_2AlB_2 , Cr_3AlB_4 , and Cr_4AlB_6 : The First Members of the Series $(\text{CrB}_2)_n\text{CrAl}$ with $n = 1, 2, 3$ and a Unifying Concept for Ternary Borides as MAB-Phases. *Inorg. Chem.*, 54, 6122-6135.
- Alameda, L. T., Holder, C. F., Fenton, J. L., and Schaak, R. E. (2017). Partial etching of Al from MoAlB single crystals to expose catalytically active basal planes for the hydrogen evolution reaction. *Chemistry of Materials*, 29(21), 8953- 8957.
- Bai, Y., Sun, D., Li, N., Kong, F., Qi, X., He, X., ... and Zheng, Y. (2019). Hightemperature mechanical properties and thermal shock behavior of ternary-layered MAB phases Fe_2AlB_2 . *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 151-160.
- Barsoum, M.W. (2000). The $\text{M}_{N+1}\text{AX}_N$ phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates. *Progress in Solid State Chemistry*, 28, 201-281.
- Benamor A., Hadji Y., Kota S., Chiker N., Liu L., Haddad A., Sahraoui T., Ying G., Hadji M. (2022). Friction and wear characteristics of the nanolaminated ternary transition metal boride: Mn_2AlB_2 . *Wear*, 492–493, 204232.
- Bennett, S. P., Kota, S., ElBidweihy, H., Parker, J. F., Hanner, L. A., Finkel, P., and Barsoum, M. W. (2020). Magnetic and magnetocaloric properties of Fe_2AlB_2 synthesized by single-step reactive hot pressing. *Scripta Materialia*, 188, 244-248.
- Cavaliere, P. (Ed.). (2019). Spark plasma sintering of materials: advances in processing and applications. Springer.
- Chaban, N. F., Kuz'ma, Y. B., Byilonyzhko, N. S., Kachmar, O. O., and Petryiv, N. B. (1979). Ternary [Nd, Sm, Gd]-Fe-B systems. *Dopovidi Akademii Nauk Ukrain's' koj RSR. Seriya A, Fiziko-Tekhnichni ta Matematichni Nauki*, 873-876.
- Chai P., Stoian S., Tan X., Dube P., Shatruck M. (2015). Investigation of magnetic properties and electronic structure of layered-structure borides AlT_2B_2 ($T = \text{Fe, Mn, Cr}$) and $\text{AlFe}_{2-x}\text{Mn}_x\text{B}_2$, *J. Solid State Chem.*, 224, 52–61.
- Dağlıoğlu, Y. (2018). Nanopartikül karakterizasyon yöntemleri ve ekotoksiste deneylerindeki önemi, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 30(1), 1-17.
- Demir, B., and Ayas, E. (2022). Synthesis of Cr_2AlB_2 MAB phase via Spark Plasma Sintering: Effect of temperature, dwell time, and Al content. *Materialia*, 22, 101416.
- Demir, B. (2023). In-situ Synthesis of MAB Phases by Spark Plasma Sintering and Chemical Exfoliation to 2D MBeNes, PhD Thesis, Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, Türkiye.
- Du, Q., Chen, G., Yang, W., Song, Z., Hua, M., Du, H., ... and Yang, J. (2015a). Magnetic properties of AlFe_2B_2 and CeMn_2Si_2 synthesized by melt spinning of stoichiometric compositions. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(5), 053003.
- Du, Q., Chen, G., Yang, W., Wei, J., Hua, M., Du, H., ... and Yang, J. (2015b). Magnetic frustration and magnetocaloric effect in $\text{AlFe}_{2-x}\text{Mn}_x\text{B}_2$ ($x = 0-0.5$) ribbons. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(33), 335001.

- ElMassalami, M., Oliveira, D. D. S., and Takeya, H. (2011). On the ferromagnetism of AlFe_2B_2 . *Journal of magnetism and magnetic materials*, 323(16), 2133-2136.
- Fuka, M., Dey, M., Gupta, S. (2018). Novel Ternary Boride (MoAlB) Particulates as Solid Lubricant Additives in Ni-matrix Composites. 2018 Joint Propulsion Conference, 9-11 July 2018, Cincinnati, Ohio.
- Hanner, L.A., Badr, H.O., Dahlqvist, M., Kota, S., Raczkowski, D., Rosen, J., Barsoum, M.W. (2021). Synthesis, characterization and first principle modelling of the MAB phase solidsolutions: $(\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{AlB}_2$ and $(\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x)_3\text{AlB}$. *Mater. Res. Lett.*, 9(2), 112-118.
- Hirt, S., Yuan, F., Mozharivskyj, Y., and Hillebrecht, H. (2016). $\text{AlFe}_{2-x}\text{Co}_x\text{B}_2$ ($x=0-0.30$): TC Tuning through Co Substitution for a Promising Magnetocaloric Material Realized by Spark Plasma Sintering. *Inorganic Chemistry*, 55(19), 9677-9684.
- Jeitschko, W. (1969). The crystal structure of Fe_2AlB_2 . *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 25(1), 163-165.
- Kádas, K., Iuşan, D., Hellsvik, J., Cedervall, J., Berastegui, P., Sahlberg, M., ... and Eriksson, O. (2017). AlM_2B_2 ($M= \text{Cr, Mn, Fe, Co, Ni}$): a group of nanolaminated materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 29(15), 155402.
- Kang, S. J. L. (2004). *Sintering: densification, grain growth and microstructure*. Elsevier.
- Ke L., Harmon B.N., Kramer M.J. (2017). Electronic structure and magnetic properties in T_2AlB_2 ($T= \text{Fe, Mn, Cr, Co, and Ni}$) and their alloys. *Phys. Rev. B*, 95, 104427.
- Khazaei, M., Wang, J., Estili, M., Ranjbar, A., Suehara, S., Arai, M., and Yunoki, S. (2019). Novel MAB phases and insights into their exfoliation into 2D MBenes. *Nanoscale*, 11(23), 11305-11314.
- Kota, S., Agne, M., Zapata-Solvas, E., Dezellus, O., Lopez, D., Gardiola, B., ... and Barsoum, M. W. (2017). Elastic properties, thermal stability, and thermodynamic parameters of MoAlB . *Physical Review B*, 95(14), 144108.
- Kota, S.S. (2019). *Synthesis and Characterization of the MAB Phases: Ternary, Nanolayered Transition Metal Borides*. Doktora Tezi, Drexel University, ABD.
- Kota, S., Chen, Y., Wang, J., May, S.J., Radovic, M., Barsoum, M.W. (2018a). Synthesis and characterization of the atomic laminate Mn_2AlB_2 . *Journal of the European Ceramic Society*, 38(16), 5333-5340.
- Kota, S., Sokol, M., Barsoum, M.W. (2020). A Progress Report on the MAB Phases: Atomically Laminated, Ternary Transition Metal Borides. *Int. Mater. Rev.*, 65, 226-255.
- Kota, S., Wang, W., Lu, J., Natu, V., Opagiste, C., Ying, G., ... and Barsoum, M. W. (2018b). Magnetic properties of Cr_2AlB_2 , Cr_3AlB_4 , and CrB powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 767, 474-482.
- Kota, S., Zapata-Solvas, E., Ly, A., Lu, J., Elkassabany, O., Huon, A., Lee, W.E., Hultman, L., May, S.J., Barsoum, M.W. (2016). Synthesis and Characterization of an Alumina Forming Nanolaminated Boride: MoAlB . *Sci Rep.*, 25(6), 26475.
- Levashov, E.A., Mukasyan, A.S., Rogachev, A.S., Shtansky, D.V. (2017). Self-Propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *Int. Mater. Rev.*, 62, 203-239.

- Li N., Bai Y., Wang S., Zheng Y., Kong F., Qi X., Wang R., He X., Duff A.I. (2017). Rapid synthesis, electrical, and mechanical properties of polycrystalline Fe_2AlB_2 bulk from elemental powders. *J of The American Chemical Society*, 100(10), 4407-4411.
- Liang, B., Dai, Z., Zhang, W., Li, Q., Niu, D., Jiao, M., ... and Guan, X. (2021). Rapid synthesis of MoAlB ceramic via thermal explosion. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 2954-2961.
- Liang, B., Zhu, D., Zhang, Q., Feng, X., Zhang, Y., Zhang, W., ... and Yang, L. (2022). Preparation of Mn_2AlB_2 Material via Thermal Explosion. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 63(4), 448-455.
- Lind, H., Dahlqvist, M., Rosen, J. (2021). In-plane ordered quaternary $\text{M}_{4/3}\text{M}_{2/3}\text{AlB}_2$ phases (i-MAB): electronic structure and mechanical properties from first-principles calculations. *J. Phys.: Condens. Matter*, 33, 255402.
- Liu, C., Hou, Z., Jia, Q., Liu, X., and Zhang, S. (2020). Low temperature synthesis of phase pure MoAlB powder in molten NaCl. *Materials*, 13(3), 785.
- Liu, J., Li, S., Yao, B., Hu, S., Zhang, J., Yu, W., and Zhou, Y. (2018). Rapid synthesis and characterization of a nanolaminated Fe_2AlB_2 compound. *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 488-497.
- Lou, T. (2016). Microstructure and properties of spark plasma sintered MoAlB ceramics, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA.
- Lu J., Kota S., Barsoum M., Hultman L. (2016). Atomic structure and lattice defects in nanolaminated ternary transition metal borides, *Mater. Res. Lett.*, 5, 235e241.
- Merz, J., Richardson, P., Cuskelly, D. (2021). Formation of Mn_2AlB_2 by induction-assisted self-propagating high-temperature synthesis. *Open Ceramics*, 8, 100190.
- Okada, S., Iizumi, K., Kudaka, K., Kudou, K., Miyamoto, M., Yu, Y., Lundström, T. (1997). Single Crystal Growth of $(\text{MoxCr}_{1-\text{X}})\text{AlB}$ and $(\text{MoxW}_{1-\text{X}})\text{AlB}$ by Metal Al Solutions and Properties of the Crystals, *J. Solid State Chem.* 133 (1997) 36–43.
- Qureshi, M.W., Ali, M.A., Ma, X. (2021). Screen the thermomechanical and optical properties of the new ductile 314 MAX phase boride Zr_3CdB_4 : A DFT insight. *Journal of Alloys and Compounds*, 877, 160248.
- Potantin, A.Y., Bashkurov, E.A., Pogozhev, Y.S., Rupasov, S.I., Levashov, E.A. (2022). Synthesis, structure and properties of MAB phase MoAlB ceramics produced by combination of SHS and HP techniques. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 42, 6379–6390.
- Rosenkranz, A., Zambrano, D., Przyborowski, A., Shah, R., Jastrzębska, A.M. (2022). MAB-Phases and Beyond—A Tribological Success Story?. *Adv. Mater. Interfaces*, 9, 2200869.
- Roy C., Mondal S., Banerjee P., Bhattacharyya S. (2023). Low temperature atmospheric synthesis of WAlB and Mn_2AlB_2 MAB phases by modified molten salt shielded synthesis method. *Advanced Powder Technology*, 34(4), 103983.
- Su, X., Dong, J., Chu, L., Sun, H., Grasso, S., and Hu, C. (2020). Synthesis, microstructure and properties of MoAlB ceramics prepared by in situ reactive spark plasma sintering. *Ceramics International*, 46(10), 15214-15221.

- Sun, X., Liu, X., Yin, J., Yu, J., Li, Y., Hang, Y., Zhou, X., Yu, M., Li, J., Tai, G., Guo, W. (2017). Two-Dimensional Boron Crystals: Structural Stability, Tunable Properties, Fabrications and Applications. *Adv. Funct. Mater.*, 27(19), 1603300.
- Surucu G., Yildiz B., Erkisi A., Wang X., Surucu O. (2020). The investigation of electronic, anisotropic elastic and lattice dynamical properties of MAB phase nanolaminated ternary borides: Mn_2AlB_2 under spin effects. *Journal of Alloys and Compounds*, 838, 155436.
- Şener, E. (2022). MAX faz alaşımlarının üretilmesi ve fonksiyonel kumaş üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye.
- Tan, X., Chai, P., Thompson, C. M., and Shatruk, M. (2013). Magnetocaloric effect in AlFe_2B_2 : toward magnetic refrigerants from earth-abundant elements. *Journal of the American Chemical Society*, 135(25), 9553-9557.
- Tuzluca, F.N., Yeşilbağ, Y.Ö., Salih, A.J., Hüseyin, A. (2024). The effect of Aluminum (Al) ratio on the synthesis of the laminated Mn_2AlB_2 MAB Phase. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 17(3), 598-606.
- Verger, L., Kota, S., Roussel, H., Ouisse, T., and Barsoum, M. W. (2018). Anisotropic thermal expansions of select layered ternary transition metal borides: 149 MoAlB , Cr_2AlB_2 , Mn_2AlB_2 , and Fe_2AlB_2 . *Journal of Applied Physics*, 124(20), 205108.
- Wang, S., Xu, Y., Yu, Z., Tan, H., Du, S., Zhang, Y., and Liu, W. (2019). Synthesis, microstructure and mechanical properties of a MoAlB ceramic prepared by spark plasma sintering from elemental powders. *Ceramics International*, 45(17), 23515-23521.
- Xiang, H., Feng, Z., Li, Z., Zhou, Y. (2018). Theoretical investigations on mechanical and dynamical properties of MAlB ($\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$) nanolaminated borides at ground-states and elevated temperatures. *J Alloys Compd.*, 738, 461–472.
- Xu L., Shi O., Liu C., Zhu D., Grasso S., Hu C. (2018). Synthesis, microstructure and properties of MoAlB ceramics”. *Ceramics International*, 44(11), 13396-13401.
- Yuehai Song, Enliang Zhang, Yehong Cheng, Yongting Zheng, Dongyue Sun, Xiangming Li, Wanjun Yu, Making high-performance MoAlB ceramics by hot pressing combustion-synthesized powders, *Ceramics International*, Volume 49, Issue 20, 2023, Pages 32826-32834.
- Yu, Y., and Lundström, T. (1995). Crystal growth and structural investigation of the new quaternary compound $\text{Mo}_{1-x}\text{Cr}_x\text{AlB}$ with $x= 0.39$. *Journal of alloys and compounds*, 226(1-2), 5-9.
- Zhang, H., Dai, F. Z., Xiang, H., Zhang, Z., and Zhou, Y. (2019). Crystal structure of Cr_4AlB_4 : A new MAB phase compound discovered in Cr-Al-B system. *Journal of materials science and technology*, 35(4), 530-534.
- Zhang Y., Okada S., Atoda T., Yamabe T., Yasumori I. (1987). Synthesis of new compound WAlB using aluminum flux, *J. Ceram. Ind. Assoc.*, 95, 374–380.
- Zhang, Y., Zhang, G., Wang, T., Wang, C., Xie, Z., Wang, W., Xin, T. (2023). Synthesis, microstructure and properties of MoAlB MAB phase films. *Ceram. Int.*, 49, 23714–23720.

Zhou, Y., Xiang, H., Dai, F. Z., and Feng, Z. (2017). Electrical conductive and damage-tolerant nanolaminated MAB phases Cr_2AlB_2 , Cr_3AlB_4 and Cr_4AlB_6 . *Materials Research Letters*, 5(6), 440-448.

Zhou, Y., Xiang, H., Dai, F. Z., and Feng, Z. (2018). $\text{Cr}_5\text{Si}_3\text{B}$ and $\text{Hf}_5\text{Si}_3\text{B}$: New MAB phases with anisotropic electrical, mechanical properties and damage tolerance. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(8), 1441-1448.



ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Muhammet BAŞPEHLİVAN

Eğitim Geçmişi:

- 2015, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği

Yabancı Dil Bilgisi:

- İngilizce

