

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI KATKI MALZEMELERİN ÇİFT BAZLI SEVK BARUTLARININ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İslami ORUÇ

EKİM 2019



Rahmetli Abim Kahraman ORUÇ' a

ÖZET

FARKLI KATKI MALZEMELERİN ÇİFT BAZLI SEVK BARUTLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ORUÇ, İslami

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ayşegül Ülkü METİN

EKİM 2019, 67 sayfa

Bu çalışmada, havan toplarında kullanılan Çift Bazlı Sevk Barutu'na (M8 terkipli) farklı özelliklere sahip takviyelerin [Alüminyum (Al), Magnezyum (Mg), Bor (B), Bor Karbür (B₄C) ve Bor Nitrür (BN)] eklenmesi ile barutun özelliklerindeki değişim incelendi. Bu doğrultuda, barutun kalorifik enerji değeri, kararlılık, termal duyarlılığı ve yanma sonrası oluşan atık miktarı gibi özellikleri değerlendirilerek, ham barut ile karşılaştırıldı. Sonuç olarak, Al, Mg, B ve B₄C takviyesinin, tüm oranlarda barutun kalorifik enerji değerini artırdığı, BN'nin ise, yanma sonrasında diğer takviyelere oranla, daha az atık bırakması, yağlayıcı özelliği sayesinde namlu içinde aşınma direncini arttırması ve düşük alev sıcaklığı sağlaması gibi özellikleri sayesinde, barut üretimi ve kullanımı sırasında önemli bir avantaj sağlayabileceği belirlendi.

Anahtar kelimeler: Çift Bazlı Sevk Barutu, Bor ve Bor Bileşikleri, Magnezyum, Alüminyum, Kalorifik Enerji Değeri, Kararlılık

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT ADDITIVES ON PROPERTIES OF THE DOUBLE BASED PROPELLANT

ORUÇ, İslami

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defense Technologies, Master Thesis

Thesis Advisor : Assoc. Prof. Dr. Ayşegül Ülkü METİN

OCTOBER 2019, 67 pages

In this study, the changes in the properties of Double Base Propellant (M8 compound) used in mortars were investigated by the addition of different reinforcements such as [Aluminum (Al), Magnesium (Mg), Boron (B), Boron Carbide (B_4C) and Boron Nitride (BN)]. Accordingly, the properties of the Double Base Propellant were compared with its raw form by evaluating the calorific energy value, stability, thermal sensitivity and the amount of waste generated after combustion. As a result, it was determined that Al, Mg, B and B_4C reinforcements increased the calorific energy value of Double Base Propellant in all ratios. It has been determined that BN provides a significant advantage during Double Base Propellant production and use due to its less waste compared to other reinforcements after combustion, lubricant properties and low wear temperatures in the barrel.

Key Words: Double Base Propellant, Boron and Boron Compounds, Magnesium, Aluminum, Calorific Energy Value, Stability

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübelerini paylaşan, bu yolculukta yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ayőegöl Ülkü METİN 'ne, çalıőmam boyunca büyük fedakârlık gösteren arkadaşlarım Ahmet ATASOY 'a, Salim Erol YÜREKLİ 'ye, Selçuk DEMİR 'e, eğitim hayatımı sürekli destekleyen başta ablam Naciye ORUÇ 'a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen; hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Barut.....	1
1.2. Barutun Tarihsel Gelişimi.....	1
1.3. Barutların Sınıflandırılması	2
1.3.1. Katı Barutlar.....	3
1.3.1.1. Kara Barut.....	3
1.3.1.2. Sevk Barutları	4
1.3.1.2.1. Homojen Barutlar	4
1.3.1.2.1.1. Tek Bazlı Barutlar (SB)	5
1.3.1.2.1.2. Çift Bazlı Barutlar (DB).....	5
1.3.1.2.1.3. Üç Bazlı Barutlar (TB)	5
1.3.1.2.2. Heterojen Barutlar.....	6
1.3.1.2.2.1. Kompozit Barutlar	7
1.3.1.2.2.2. Kompozit Modifiye Çift Bazlı Barutlar (CMDB).....	7
1.3.2. Sıvı Barutlar	9
1.3.2.1. Tek Bileşimli Barutlar	9
1.3.2.2. İki Bileşimli Barutlar	10
1.4. Enerjik Malzemeler ve Özellikleri	10
1.4.1. Alüminyum	11
1.4.2. Magnezyum	11

1.4.3. Bor	12
1.4.4. Bor Karbür	13
1.4.5. Bor Nitrür	13
1.5. Sevk Barut Özelliklerinin Değerlendirilmesi	13
1.5.1. Barutlarda İstenilen Özellikler	17
1.5.2. Barutların Enerji Açısından Değerlendirmesi	17
1.5.3. Barutlarda Yanma Teorisi	18
1.5.3.1. Barut Biçim ve Boyutlarının Yanma Özelliklerine Etkisi	20
1.5.3.2. Barutların Nem ve Sıcaklıklarının Yanmaya Etkisi	23
1.5.3.3. Barutların Doldurma Yoğunluklarının Yanmalarına Etkisi	23
1.5.4. Barutlarda Kimyasal Kararlılık.....	24
1.5.5. Barutlarda Termal Değerlendirme.....	25
1.6. Literatür Değerlendirilmesi.....	25
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
2.1. Kullanılan Ekipmanlar ve Cihazlar	28
2.2. Kullanılan Kimyasallar	28
2.3. Barut Örneklerinin Hazırlanması.....	30
2.4. Karakterizasyon ve Değerlendirme.....	33
2.5. Barutların Test ve Ölçüm Yöntemleri	33
2.5.1. Toplam Uçucu Madde Tayini	33
2.5.2. Kalorifik Enerji Değerinin Belirlenmesi	34
2.5.3. Kararlılık Testi.....	35
2.5.4. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi	36
2.5.5. Yanma Sonunda Oluşan Atık Miktarı Analizi	37
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
3.1. Katkısız Barut Örnekleri	38
3.2. Alüminyum Takviyeli Barut Örnekleri	41
3.3. Magnezyum Takviyeli Barut Örnekleri	45
3.4. Bor Takviyeli Barut Örnekleri	48
3.5. Bor Karbür Takviyeli Barut Örnekleri	51
3.6. Bor Nitrür Takviyeli Barut Örnekleri	54
3.7. Bor Nitrür ve Diğer Takviyeleri Birlikte İçeren Barut Örnekleri	56

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	62



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. Barutların Sınıflandırılması.....	3
1.2. Barut Tanelerinin Basınç-Namlu Boyu Grafiğine Etkisi	19
1.3. Barut Tanelerinin Şekilleri	21
1.4. Barut Tane Geometrisinin Yanma Miktarına Etkisi.....	22
1.5. Barut Tane Boyutunun Etkisi.....	22
2.1. Werner Karıştırıcı (MKE Barutsan).....	30
2.2. Hamkitlenin HPLC Kromatogramı	31
2.3. Kalorimetre Cihazı (MKE Barutsan)	34
2.4. Metil Viyole Kararlılık Test Cihazı (MKE Barutsan)	35
2.5. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Test Cihazı	36
3.1. Solventli (a) ve Solventsiz (b) Katkısız Barut Örneklerinin DSC Termogramı	40
3.2. Al Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi	43
3.3. Farklı Oranlarda Al Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı	44
3.4. Mg Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi.....	46
3.5. Farklı Oranlarda Mg Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı ..	47
3.6. Bor Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi	49
3.7. Farklı oranlarda B Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı	50
3.8. B ₄ C Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi	52
3.9. Farklı Oranlarda B ₄ C Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı .	53
3.10. BN Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi.....	54
3.11. Farklı Oranlarda BN Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı	56
3.12. Takviye Malzeme/BN Katkısının, Takviyeli Barut ile Karşılaştırılması	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Homojen Barut Örnekleri	6
1.2. Heterojen Barut Örnekleri.	8
1.3. Bazı Katı Yakıtlar İçin Tipik Örnek Karışımlar.	14
1.4. Barutlarda Sıklıkla Kullanılan Bileşiklerin Görevleri	16
1.5. Barutların Enerji Dağılımı	18
2.1. Kullanılan Kimyasalların Özellikleri	29
2.2. Barut Karışım Miktarları	32
3.1. Katkısız Barut Analiz Sonuçları	39
3.2. Alüminyum Takviyeli Barut Analiz Sonucu	43
3.3. Magnezyum Takviyeli Barut Analiz Sonucu	46
3.4. Bor Takviyeli Barut Analiz Sonucu	49
3.5. Bor Karbür Takviyeli Barut Analiz Sonucu	52
3.6. Bor Nitrür Takviyeli Barut Analiz Sonucu	55
3.7. Takviye Malzeme/BN Barut Örneklerinin Özellikleri	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
AP	Amonyum Perklorat
B	Bor
BN	Bor Nitrür
BTNA/F	Bis (2,2-Dinitropropil) Asetal/Formal
B ₄ C	Bor Karbür
B ₂ O ₃	Bor Oksit
CL-20	Hexanitrohexaazaisowurtzitane
CMDB	Kompozit Modifiye Edilmiş Çift Bazlı Barut
DEP	Dietil Ftalat
DB	Çift Bazlı Barut
EC	Etil Santralit
GAP	Poliglisidil Asit
HAN	Hidroksilamonyum Nitrat
HMX	Oktagen
HNF	Hydrazinium Nitroformate
HTPB	Hidroksil Uçlu Polibütadien
Mg	Magnezyum
MMH	Monometil Hidrazin
NC	Nitroselülöz
NG	Nitrogliserin
NO	Nitrojen Oksit
NQ	Nitroguanidin
PUR	Poliüretan
RDX	Hekzahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin
SB	Tek Bazlı Barut
TB	Üç Bazlı Barut
TAGN	Triaminoguanidin Nitrat
TEAN	Trietanolamonyum Nitrat

1. GİRİŞ

1.1. Barut

Ateşli silah sistemlerinde mühimmatın atılması için gerekli itki kuvvetini sağlayan yüksek enerjili kimyasal kompozisyondan oluşmuş, atmosferik oksijene ihtiyaç duymayan yanıcı katı maddeler barut olarak tanımlanır. Ateşleyicinin barutu tutuşturması ile yanması gerçekleşir. Silah haznesinde barutun yanması sonucunda oluşan gazların neden olduğu basınç ile elde edilen itki yardımıyla mühimmatın istenilen menzile gitmesi sağlanır [1].

1.2. Barutun Tarihsel Gelişimi

Barut yanma özelliğinden ötürü ilk yüzyıllardan bu yana batıda ve doğuda savaş malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çinliler, 8. yy.da potasyum nitrat, kömür ve kükürtle oluşturduğu kara barutu ateşli silahlarda yakıt olarak uzun süre kullanmıştır. Daha sonraki süreçlerde dumansız barut olarak bilenen sevk barutlarının geliştirilmesi ile kara barut kullanımı azalmıştır [2].

1846 yılında Schönbein'in selüloz ve nitrik asit ile yaptığı çalışmada yanıcı bir madde olan Nitroselüloz (NC) keşfedilmiştir. Birkaç yıl içinde Nitroselülozun kara barutun yerine sevk maddesi olarak kullanılması için yeni çalışmalar başlamıştır. Sonraki yıllarda, nitroselülozun uygun çözücülerle taneli baruta dönüştürülmesi ile ilgili çok sayıda patent alınmıştır (Spill, 1875; Reid, 1882; Wolfve Förster, 1883). Nitroselülozu, 1883 yılında Alfred Nobel Nitrogliserin ile, Vielle 1885 yılında eter/alkol karışımı ile, Dewar ve Abel ise 1899 yılında aseton ile plastikleştirerek dumansız barutu geliştirmeye çalışmışlardır [2].

I. Dünya Savaşına kadar kara barut yerine üstün özelliklere sahip dumansız (dumansızlık, yüksek sevk gücü, düşük namlu kirliliği ve düşük namlu erozyonu gibi) barutlar kullanılmıştır. Birleşik devletlerde 1935 yılında geliştirilen "Küresel Barut"un küçük kalibreli silahlarda kullanılması yaygınlaşmıştır. 1960 yılında Amerika Birleşik Devletleri büyük kalibre

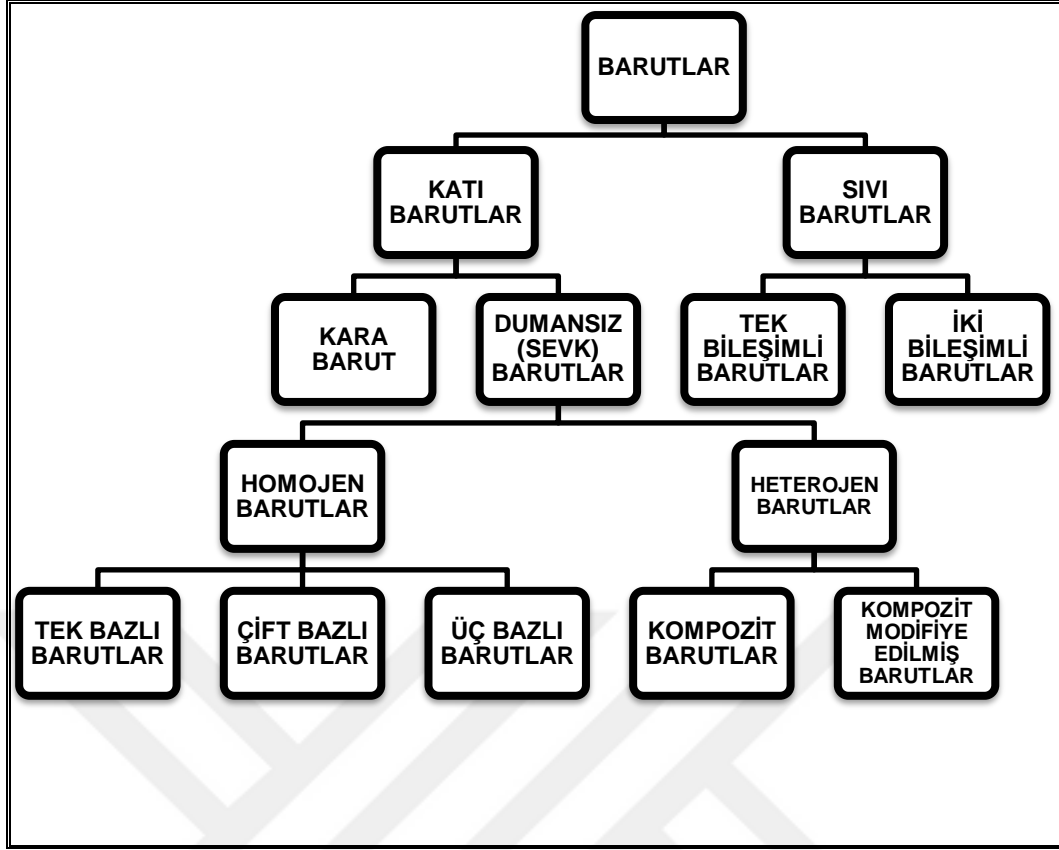
silahlarında kullanımına uygun yanar kovanları, Avrupa ve Birleşik devletler de küçük kalibre silahları için kovansız silahlar geliştirmesi ile barut kullanımı gelişerek devam etmiştir [2].

Barut, roket yakıtları ve diğer yanıcı ve patlayıcılar için aynı uygulama özellikleri gösteren ancak darbe, şok, sıcaklık vb. dış etkilere karşı yüksek derecede duyarsızlık gösteren Duyarsız Mühimmatlar 1970 yılından sonra geliştirilmiştir. Aynı yıllarda geri dönüşüm ve çevreyle uyumlu özelliklere sahip yeni ürünlerin geliştirilmesine başlanmıştır [2].

20. yy.'ın başlarında Goddard ve Siolkowskinin yaptıkları çalışmalardan sonra roket ve füze sistemlerinde sıvı yakıtların kullanımı önem kazanmış, 1945 yılında sonra ise Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Sovyet Sosyalist Cumhuriyeti Birliğinde daha büyük ölçeklerde devam etmiştir. Ancak birkaç askeri uygulama ile sınırlı kalan bu çalışmalar sonraki yıllarda silah sistemlerinde sıvı yakıtların kullanılması üzerine çalışmalarla devam etmiştir [2].

1.3. Barutların Sınıflandırılması

Barutlar, kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı form ve kimyasal bileşimlerde çok fazla çeşitlilik gösterir. Barut, katı ve sıvı barutlar olmak üzere ikiye ayrılır. Sıvı barut, tek bileşimli ve iki bileşimli barut olmak üzere ikiye ayrılır. Katı barut, kara barut ile dumansız barut (sevk barutu) olarak ikiye ayrılır. Şekil 1.1'de barutların sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Barutların Sınıflandırılması [3,4,5]

1.3.1. Katı Barutlar

Katı barutlar, kara barut ile dumansız barut (sevk barutu) olarak iki kısımda incelenir.

1.3.1.1. Kara Barut

İlkel barut olarak da bilinen kara barut; potasyum nitrat (%75), kükürt (%10) ve odun kömürünün (%15) fiziksel bir karışımıdır. Karışım, öğütülüp karıştırıldıktan sonra preslenir, kırılır ve malzeme eleme işleminden geçirilerek grafitle cilalanıp ambalajlanır.

Kolayca tutuşabilen bu barutun tutuşması için, açık alev, kapsül alevi veya elektrik kıvılcımı yeterlidir. 457 °C tutuşma sıcaklığına sahip olup, 1 metre yükseklikten 5 kg çelik çekicin düşürülmesi ile de tutuşma gerçekleşebilir. Kara barut, yanma sırasında kendi hacminin yaklaşık 300 katı kadar gaz oluşturur.

Kara barut kapalı ortamda yandığında, ürün olarak karbon monoksit, hidrojen sülfür gibi zehirli gazlar oluştuğundan dolayı ortamın havalandırılması gerekmektedir. Kararlı bir yapıya sahip kara barut, nemli ortamlarda depolanmamalıdır. Yoğunluğu, 1.72–1.77 g/cm³ aralığında olan kara barut, 12 °C'ye kadar ısıtıldığında bir değişikliğe uğramaz, ancak 70 °C'den itibaren kükürt uçmaya başladığından bileşimi değişir. Keşfedildiğinden beri yaygın olarak kullanılmış olmasına rağmen, günümüz koşullarında kara barut mermileri yeterli derecede hızlandırmak için istenilen performansa sahip değildir. Çünkü mermi hareketi sırasında düzensiz balistiğe neden olurlar. Kara barutun neme karşı duyarlı olması, çok fazla duman ve kalıntı bırakması gibi nedenlerden dolayı günümüzde yerini dumansız sevk barutları almıştır [3].

1.3.1.2. Sevk Barutları

Sevk barutu homojen ve heterojen barut olarak ikiye ayrılır. Homojen barutlar ise kendi içinde üç kısma ayrılmaktadır; Tek Bazlı Barut (SB), Çift Bazlı Barut (DB) ve Üç Bazlı Barut (TB). Heterojen barutlar da iki kısma ayrılmaktadır; Kompozit Modifiye Edilmiş Çift Bazlı Barut (CMDB) ve Kompozit Barut.

1.3.1.2.1. Homojen Barutlar

Nitroselüloz ve nitrogliserin (NG)'den oluşan homojen barutlar, çift bazlı (DB) yakıtlar olarak da bilinmektedirler. Bu barutlara istenilen özellikler kazandırmak için yanma hızı arttırıcı, stabilize edici, yağlayıcı, katılaştırıcı veya diğer katkı maddeleri belli oranlarda ilave edilir [4].

1.3.1.2.1.1. Tek Bazlı Barutlar (SB)

Tek bazlı barutlar, esas olarak plastikleştirilmiş nitroselülozdan oluşmaktadır (azot içeriği; kütlece %13,15). Bunlara plastikleştirici, stabilize edici, işlemeyi kolaylaştırıcı, namlu erozyon azaltıcı, parlama azaltıcı gibi özellikleri geliştiren katkıları eklenebilir. Bunlar yalnızca silah barutları veya gaz jeneratörleri için dökme toz dolgularında kullanılabilir [5].

1.3.1.2.1.2. Çift Bazlı Barutlar (DB)

Çift bazlı barutlar, nitroselüloz (azot içeriği; kütlece %13,25 veya %11,5) ve nitrogliserin gibi bir patlayıcı plastikleştiriciden oluşur. Diğer katkıları tek bazlı barutlarda kullanılanlar ile aynıdır.

Her iki yakıt tipi de $\%0.5 \pm 0.3$ su içermektedir. Oktagen (HMX) ve Hekzahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (RDX) gibi kristal yapıları patlayıcıların çift baz matriksine dahil edildiği türler, çift bazlı ve kompozit barutlar arasında bir geçişi temsil eder [5].

1.3.1.2.1.3. Üç Bazlı Barutlar (TB)

Bu tür yakıtlar, çift bazlı katı yakıt içeriğine belli oranlarda Nitroguanidin (NQ) ilave edilmesi ile üretilen barut türüdür. Nitroguanidin, alev sıcaklığını düşürerek namluyu korumak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, nitrogliserin oranı bu tür yakıtlarda daha düşüktür [5].

Homojen barutlardan bazı örnekler Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Homojen Barut Örnekleri [5]

ÇEŞİTLER					
BİLEŞENLER (%)	M1	M8	M30	A502	JA 2
Nitroselüloz	84,2	52,15	28	93,5	63,5
(% N)	(13,15)	(13,25)	(12,6)	(13,1)	(13)
Nitrogliserin		43	22,5		14
Diglikol Dinitrat					21,7
Nitroguanidin			47,7		
Etil Santralit		0,6	1,5	1,4	
Difenilamin	1			0,7	
Metil Difenilüre					0,7
Dinitrotoluen	9,9				
Dibutil Ftalat	4,9			3,5	
Dietil Ftalat		3			
Katkı maddeleri		1,25	0,3	0,9	0,1
Alev sıcaklığı, K	2585	3757	3093	2807	3448
Kuvvet, j/g	962	1172	1102	998	1155
Ortalama Molekül Kütlesi, g/mol	22,3	26,7	23,3	23,4	24,8

M1, A502: Tek Bazlı Barut; M8, JA2: Çift Bazlı Barut ve M30: Üç Bazlı Barut

1.3.1.2.2. Heterojen Barutlar

Heterojen barutlar Kompozit Barutlar ve Kompozit Modifiye Edilmiş Çift Bazlı Barutlar (CMDB) olmak üzere iki kısımda incelenir.

1.3.1.2.2.1. Kompozit Barutlar

Kompozit barutlar, içinde kristal yapılı oksitleyicilerin (örneğin, amonyum perklorat) ve enerjik malzemelerin (örneğin, RDX veya HMX) ağırlıkça %90'a kadar katıldığı ve polimerik bir bağlayıcının da yer aldığı barutlardır. Bağlayıcılar genellikle viskoelastik çapraz bağlı elastomerlerdir. Bazı uygulamalar için termoplastikler (örneğin, selüloz asetat butirat) ve dolgu maddesi de eklenir. Dolgu maddelerinin ortalama partikül boyutu ve partikül dağılımı, işleme, yanma davranışı, mekanik özellikler ve şok hassasiyetini etkiler. Roket yakıtlarında, alev sıcaklığını arttırmak için alüminyum tozu eklenir. Ancak alüminyum oksidin (birincil duman) oluşması nedeniyle büyük miktarda dumanın üretilmesi gibi dezavantajlar oluşturur [5].

1.3.1.2.2.2. Kompozit Modifiye Çift Bazlı Barutlar (CMDB)

Kompozit Modifiye Çift Bazlı Barut (CMDB), önemli oranda kompozit barutun, çift bazlı (NC-NG) barutla aynı içerikte birleşmesiyle oluşturulan barut türü olarak bilinmektedir [5].

Heterojen barutlara bazı örnekler Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Heterojen Barut Örnekleri [5]

ÇEŞİTLER					
BİLEŞENLER (%)	A	B	C	D	E
AP	85	70	10	10	
RDX			52		
NQ				50	
TAGN					75
Alüminyum		18		20	
PUR ve katkı maddeleri			13,5		10
HTPB ve katkı maddeleri	15	12			
GAP ve katkı maddeleri				8	
NG ve katkı maddeleri			24,5		
Triasetin					15
BTNA/F				12	
Alev sıcaklığı, K	2813	3253	2995	2791	1269
Spesifik itki	2390	2681	2453	2486	1759
Ortalama Molekül Kütlesi, g/mol	24,5	27,2	24,7	24,2	18,3
Cp/Cv	1,22	1,20	1,23	1,21	1,29
Yoğunluk, g/cm³	1,66	1,79	1,70	1,76	1,40

A: İkincil duman içeren kompozit barut; B: Birincil ve ikincil dumanlı kompozit barut; C: Kompozit modifiye çift bazlı barut; D: Duyarsız kompozit barutu; E: Gaz-jeneratör karışımı

1.3.2. Sıvı Barutlar

Sıvı barutlar, oksitleyici ile bir veya iki ayrı yakıtın karışımından oluşabilir. Katı barutlarda yanacak olan katı madde yanmanın gerçekleştiği odada bulunmaktadır. Sıvı barutlar da ise, stok tankında bulunan sıvı yakıt yanmanın olduğu bölüme enjekte edilmektedir. Ancak daha sonra, yanma işlemini değiştirmek için katkı maddeleri kullanılmış bu şekilde bileşimler daha karmaşık hale gelmiştir [5].

Sıvı barutlar kendi içinde Tek Bileşimli ve İki Bileşimli barut olarak iki kısımda incelenir.

1.3.2.1. Tek Bileşimli Barutlar

Tek bileşimli barutlar, yanma için gerekli olan oksitleyiciyi (nitro bileşikleri, nitrat esterleri) içeren maddelerden veya bir yakıt ve oksitleyici karışımından oluşur. Bu barutlar $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında reaksiyon göstermemeli ve depolama sırasında kararlı olmalıdır. Tek bileşimli barutlar, yardımcı sistemler dışında (örneğin, uydu pozisyonunun düzeltilmesi) roket tahrik sistemleri için de önemli bir yere sahiptir.

Tek bileşimli barut örnekleri %80 - 99 hidrojen peroksit, hidrazin nitrat, su ve hidroksilamonyum nitrat (HAN) içeren bileşimlerdir. Bu karışımlar yanma odasına ayrışma katalizörleri üzerinden enjekte edilir [5].

Karışıma ait tipik bir kompozisyon;

LP1845: %63,2 hidroksilamonyum nitrat (HAN)
 %20 trietanolamonyum nitrat (TEAN)
 %16,8 Su'dan oluşmaktadır.

1.3.2.2. İki Bileşimli Barutlar

İki bileşimli barutlar, oksitleyici ve yakıt, yanma odasına iki ayrı fazda enjekte edilmesiyle oluşur. Hem oksitleyici hem de yakıt birden fazla bileşenden oluşabilir. Roket sistemlerinde yakıt olarak; hidrojen peroksit, derişik nitrik asit, azot dioksit kullanılırken oksitleyici olarak sıvı oksijen, hidrokarbonlar, alkoller, aminler, hidrazinler ve alkiller kullanılır.

Bazı yakıt kombinasyonları hipergoliktir (yani yakıt ve oksitleyici temas halinde kendiliğinden tutuşur). Örneğın derişik nitrik asit, hidrazin ve alkil türevleri. Bu hipergolik davranış, barut kombinasyonunun yanma odasına enjekte edildiğinde hemen ateşlendiğı silahlarda kullanılır. Konsantre nitrik asit, Monometil Hidrazin (MMH) ve Trietanolamin karışımı örnek olarak verilebilir [5].

1.4. Enerjik Malzemeler ve Özellikleri

Metal tozları; yüksek yanma ısısı, yakıt yoğunluğunun iyileştirilmesi, yanma kararsızlığının bastırılması ve yüksek hacimsel enerji salımı elde etmek için yakıtlara ilave edilir. Alüminyum, Magnezyum, Bor gibi enerjik değeri yüksek malzemeler, yeni yakıtların geliştirilmesinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu elementlerin ilavesiyle, katı yakıtların spesifik itmeleri artırılabilir. Bununla birlikte, bu elementlerin kullanılması ile, teorik olarak hesaplanan iyileştirme gerçekleştirilememiştir. Performanstaki bu kaybın ana sebebi yanma ürünlerinin genleşme sırasında hız dengesine tam olarak ulaşamamasındandır. Aynı zamanda, bazı durumlarda metallerin tam yanmaması da etkinlik kaybına neden olabilmektedir. Ayrıca metallerin parçacık büyüklüğü ve dağılımlarının yakıt performansı üzerinde etkisi büyüktür [6,7].

Küresel yapıda, 5 - 60 µm büyüklüğünde alüminyum, katı yakıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano büyüklükte metalik ilaveler, reaksiyon yüzey

alanını arttırmasıyla birim zamanda ortaya çıkan enerji miktarını, yanma hızını arttırmaktadır [8,9].

Katı yakıtlara yüksek enerjiye sahip B'nin doğrudan ilave edilmesinde de istenilen verim alınamamaktadır. Yanma esnasında borun tanecik yüzeyinde bor oksit (B_2O_3) oluşumu nedeniyle yanma hızının ilerlemesine engel oluşturmaktadır. Çeşitli metal ve metal olmayan malzemeler ile borun kaplanması neticesinde, bor tanecik yüzeyinde oluşan oksit tabakası oluşumunu en aza indirilmekte ve tutuşma sıcaklık değeri düşürülmektedir [9].

1.4.1. Alüminyum

Periyodik sistemde 3A grubunda bulunan; gümüş parlaklığında, beyaz, hafif bir metalik elementtir. Alüminyum, atom ağırlığı 27 g/mol, erime noktası 659,7 °C, kaynama noktası 2057 °C ve yoğunluğu 2,698 g/cm³ olan ve sanayide demirden sonra gelen en önemli elementtir. Doğada sadece bileşik halinde mevcuttur. Bileşikleri yer kabuğunun %8'ini teşkil eder ve bolluk sırasında üçüncü sırada bulunmaktadır [10]. Alüminyum bolluğu ve yüksek enerji salımı nedeniyle katı yakıtlarda geleneksel olarak kullanılmaktadır [11].

Alüminyum, patlayıcı ve yakıtların performanslarını artırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Alüminyumun yanması ile açığa çıkan yüksek enerji (1658 kJ/mol, 16260 kJ/kg), daha yüksek sıcaklıklara yol açması nedeniyle, patlama ısısında önemli bir artışa yol açmaktadır [12].

1.4.2. Magnezyum

Magnezyum gümüş beyaz renğinde bir metaldir. Atom numarası 12 olan magnezyum, atom ağırlığı 24,312 g/mol, yoğunluğu 1,74 g/cm³, erime noktası 650 °C ve kaynama noktası 1090 °C'dir. Magnezyum toz halindedir ve kolay yanar [13,14].

1.4.3. Bor

Bor bazlı homojen yakıtlara duyulan ilgi, düşük atom ağırlığı (10,811 g/mol), yüksek molar yanma entalpisi (627 kJ/mol, 58 kJ/g) ve oksijen ile azotun çekim gücünden kaynaklanmaktadır [15].

Yüksek saflıktaki bor, siyah ile koyu kahverengi ya da kırılğan, parlak, koyu ve allotropik kristal metal şeklindedir. Bor, yüksek sıcaklıklarda elektriği iletebilen yarı iletkenidir [16]. Bor, yoğunluğu 2,84 gr/cm³, erime noktası 2200 °C ve kaynama noktası 2250 °C'ye sahip bir elementtir [17].

Barutlara borun ilave edilmesi ile performansta önemli derecede değişiklik sağlamaktadır. Örneğin, kütle/hacim başına çok yüksek değerlerde yanma ısısı açığa çıkar ve yüksek kararlılığa sahip sağlam yapılar oluştururlar (yüksek aktivasyon enerjisi ile harekete geçerler). Bununla birlikte, borun kütle başına yanma ısısı alüminyumun yanma ısısının yaklaşık iki, magnezyumun yanma ısısının yaklaşık 2,5 katı kadardır. Flor ve bileşikleriyle yüksek verimde reaksiyon vermeye yatkındır. Uygun flor bileşikleriyle verdiği florinasyon tepkime ısısı, oksidasyon tepkime ısısından yaklaşık 1,8 kat daha yüksektir [18]. Öte yandan, Bor'un barutlarda kullanılmasının bazı dezavantajları da vardır [18]:

- Kullanılan ve araştırılan bor ve bileşiklerinin uygun formlarının zor proseslerden geçerek elde edilebilmesi,
- Kararlı yapıları dolayısıyla özel koşullar sağlanarak harekete geçirilebilmesi (> 1950 K sıcaklığın üzerinde sıcaklıklarda düzenli yanma reaksiyonu),
- Yanma odasında borun oksitlenmesi sırasında oluşan oksit tabakalarının yanma hızında düzensizlikler meydana getirmesi,
- Ulaşılan yüksek sıcaklıklar ve korozif etki sebebiyle silah sistemi malzemelerinin dayanımı ile ilgili sorunlar,
- Namluda ciddi miktarlarda depozit (artık) bırakması.

1.4.4. Bor Karbür

Bor karbürün (B_4C), kübik bor nitrür ve elmadan sonra gelen en yüksek sertliğe sahip bir malzemedir. Yoğunluğu $2,52 \text{ g/cm}^3$, molar kütlesi $55,255 \text{ g/mol}$ ve kaynama noktası $3.500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir [19].

Bor karbür çift bazlı yakıtlara ilavesiyle kalorifik enerjide artış sağlamaktadır [9].

1.4.5. Bor Nitrür

Bor nitrür, iyi ısı iletkenliğe ve elektriksel yalıtkanlığa, kimyasal kararlılığa ve yağlayıcılık gibi özelliklere sahip, kristal yapısı karbona benzeyen bir bileşiktir. Bu sebeple, beyaz grafit veya beyaz karbon olarak da isimlendirilir [20,21].

Bor nitrür, silah namlusu için aşınma direnci ve düşük alev sıcaklıkları sağlayabilen iyi bir yağlayıcı olmasından ötürü silah sistemlerindeki barutlarında kullanılabilir [22].

1.5. Sevk Barut Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Barutların bileşimi, genellikle ana bileşenlere ek olarak bir veya daha fazla enerjik bileşik, az miktarda hidroskopik azaltıcı, stabilizör, plastikleştirici, alev sıcaklığı, parlama ve namlu erozyonu azaltıcı, elektriksel iletkenliği artırıcı, yanma hızı kontrolü, oksijen kaynağı ve nem önleyici gibi özellikleri iyileştiren maddeler içerir [23].

Çizelge 1.3'de bazı katı yakıtlar için tipik örnek karışımlar gösterilmiştir (Karışım yüzdeleri yaklaşık değerlerdedir). Çizelge 1.4'de ise katı yakıtlarda sıklıkla kullanılan kimyasalların yakıttaki işlevleri gösterilmiştir [23].

Çizelge 1.3. Bazı Katı Yakıtlar İçin Tipik Örnek Karışımlar [23]

Çeşitler Bileşenler(%)	MI	M2	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M12
	Nitroselüloz	85	77.45	81.95	87	54.6	52.15	57.75	98
Nitrogliserin		19.5	15		35.5	43	40		
Nitroguanidin									
Dinitrotoluen	10			10					
Dibutil Ftalat	5			3					
Dietil Ftalat						3			
Difenilamin	1			1				1	0.80
Etil Santralit		0.60	0.60		0.90	0.60	0.75		
Baryum Nitrat		1.4	1.4						
Potasyum Nitrat		0.75	0.75			1.25	1.50		
Potasyum Perklorat					7.8				
Kurşun Karbonat	1								
Potasyum Sülfat	1			1				1	0.75
Kalay									0.75
Karbon Siyahı					1.2				
Grafit		0.30	0.30					0.10	
Kiryolit									

Çizelge 1.3 Bazı Katı Yakıtlar İçin Tipik Örnek Karışımlar (devamı) [23]

Çeşitler	M15	M17	M18	M26	M26E1	M30	M30A1	M30A2	M31
Bileşenler(%)									
Nitroselüloz	20	22	80	67.25	68.7	28	28	27	20
Nitrogliserin	19	21.5	10	25	25	22.5	22.5	22.5	19
Nitroguanidin	54.7	54.7				47.7	47	46.25	54.7
Dinitrotoluen									
Dibutil Ftalat			9						4.5
Diethyl Ftalat									
Difenilamine			1						
Etil Santralit	6	1.5		6	6	1.5	1.5	1.5	
Baryum Nitrat				0.75					
Potasyum Nitrat				0.70				2.75	
Potasyum Perklorat									
Kurşun Karbonat									
Potasyum Sülfat							1		1.5
Karbon Siyahı									
Grafit		0.10		0.30	0.30	0.10			
Kiryolit	0.30	0.30				0.30			0.30
2-Nitro Difenilamin									1.5

Çizelge 1.4. Barutlarda Sıklıkla Kullanılan Bileşiklerin Görevleri [23]

Bileşenler	Amaç											
	Hidrokopik Azaltıcı	Stabilizör	Plastikleştirici	Geciktirici	Alev Sıcaklığı Azaltıcı	Parlama Azaltıcı	Namlu Erozyon Azaltıcı	Elektriksel İletkenlik Artırıcı	Yanma Hızı Kontrolü	Oksijen Kaynağı	Tutuşabilirliği Artırıcı	Nem Önleyici Kaplama
Nitrogliserin	X		X							X	X	
Nitroguanidin					X	X	X					
Dinitrotoluen	X		X	X			X		X			X
Dibutil Ftalat	X		X	X	X	X	X		X			
Dietil Ftalat						X	X		X			
Difenilamin		X										
Etil Santralit	X	X	X	X	X	X	X		X			X
Baryum Nitrat						X						
Potasyum Nitrat						X						
Potasyum Perklorat						X		X	X			
Potasyum Sülfat						X						
Karbon Siyahı											X	
Grafit								X				
Kiryolit						X						
2-Nitro Difenilamin		X	X									
Metil Santralit			X	X		X	X		X			
Triasetin			X			X						

1.5.1. Barutlardan İstenilen Özellikler

Barutlar, istenilen özellikleri karşılamak için uygun kompozisyon, şekil ve boyutlara sahip olacak şekilde hazırlanmalıdır. Genel olarak, gerekli enerjiyi taşıyabilmeli, tekrarlanabilir şekilde üretilmeli, düşük ve yüksek sıcaklıklarda depolanabilmeli, namlu içinde yüksek basınçlara karşı dayanıklılık gibi gereksinimleri karşılamalıdır [24].

1.5.2. Barutların Enerji Açısından Değerlendirmesi

Malzemelerin enerji yoğunluğu moleküler yapılarına göre belirlendiğinden polimerik malzemelerin enerji yoğunluğu, atomlar arası bağ uzunluğu nedeniyle sınırlıdır. Öte yandan, kristal yapılı malzemelerin yoğunluğu moleküler yapılarındaki atomların üç boyutlu olarak düzenlenmesinden dolayı daha yüksektir. Kristal yapıdaki atomlar arasındaki mesafeler daha kısa olduğu için atomlar arasındaki bağ enerjisi yüksektir. Polimerik ve kristal yapılı malzemelerin karışımlar halinde birleştirilmesi yüksek enerji yoğunluklu katı yakıtların gelişmesine yol açmıştır. Bu nedenle, yakıtlar için polimerik ve kristal yapılı malzemelerin seçimi çok önemlidir. Metal parçacıklar oksitlendiğinde çok miktarda ısı üretir, oksitlenmiş ürünlerin çok azı gaz halinde ürün oluşturur. Bu nedenle, metal parçacıklarının katı yakıtlar da yakıt bileşenleri olarak kullanılması potansiyel olarak sınırlıdır. Karbon, Hidrojen, Nitrojen ve Oksijen'den oluşan organik malzemeler oksitlendiğinde, karbondioksit, su, azot ve diğer hidrokarbon gazları ile çok miktarda ısı oluşturur. Oksitleyici olarak kullanılan tipik kristal yapılı malzemeler, perkloratlar, nitratlar, nitro bileşikler, nitraminler ve metal azidlerdir. Yakıt bileşenleri olarak kullanılan polimerik malzemeler nitrat esterleri, inert polimerler ve azid polimerleridir. Bu oksitleyici ve yakıt bileşenlerinin optimize edilmiş kombinasyonları yakıtlardan beklenen balistik özellikleri kazandırır [25].

Barutun yanması ile enerji, yüksek miktarda sıcak gaz şeklinde açığa çıkar. Yanma ilerledikçe, enerjinin büyük bir kısmı Çizelge 1.5’de verildiği gibi diğer formlara dönüşür [26].

Çizelge 1.5. Barutların Enerji Dağılımı (%) [26]

Merminin Hareketi	32
Barut Gazları Hareketi	3
Sürtünme Kayıpları	3
Silahta ve Mermide Isı Kaybı	20
Barut Tarafından Tutulan Isı	42

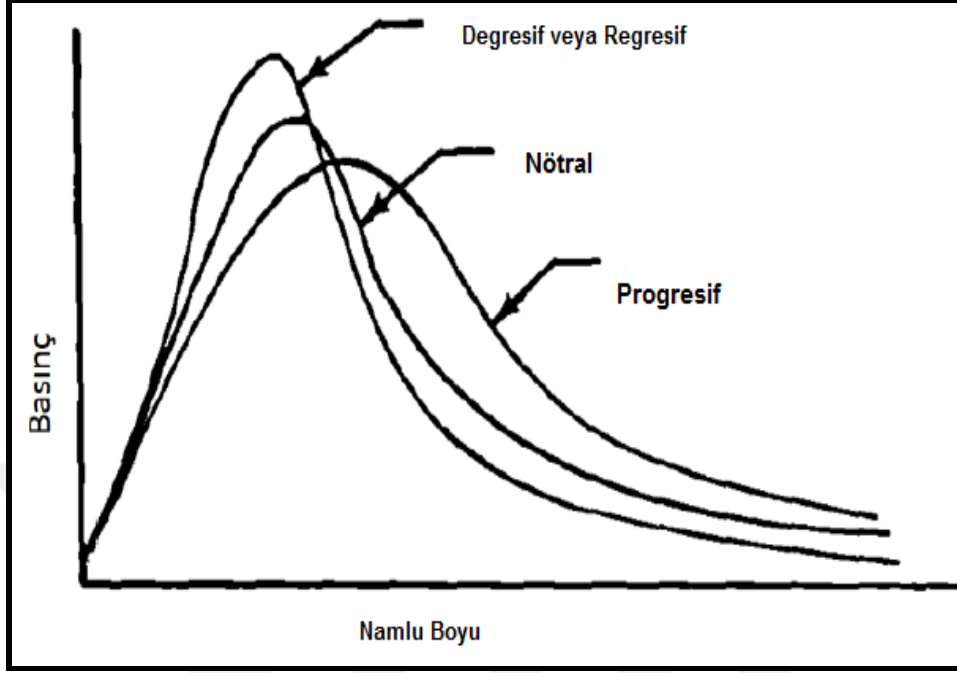
1.5.3. Barutlarda Yanma Teorisi

Yanma hızı barutun verilen basınç ve sıcaklık altında parçalanma esnasında ortaya çıkardığı ısı ile barutun üzerindeki sıcak gazlardan barutun yanma yüzeyine aktarılan ısı miktarına bağlıdır. Barut yoğunluğu, yanma yüzeyi, basınç, hacim ve kimyasal içerik barutların yanma hızını belirleyen parametreleri oluşturmaktadır.

Barutları yanma hızlarına göre üç kategori de incelemek mümkündür.

1. Regresif ya da Degresif yanan barut: Yanma yüzeyi, barutun yanması ile azalan barutlardır (Küresel, çubuk ve pul şekilde olan barutlar).
2. Nötral yanan barut: Yanma yüzeyi, barutun yanması ilerken değişmeden sabit kalan barutlardır (Tek delikli barutlar).
3. Progresif yanan barut: Yanma yüzeyi barutun tutuşması ile yanma devam ettikçe genelde artan barutlardır (Çok delikli ve rozet şeklinde olanlar) [27].

Şekil 1.2'de barut tane özelliklerinin basınç - namlu boyu grafiğine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Barut Tanelerinin Basınç - Namlu Boyu Grafiğine Etkisi [28]

Barutlarda yanma hızları yanma basıncına da bağlı olarak değişir. Basıncın artması yanma hızını artırır. Basınç azaldıkça yanma hızı da düşer. Diğer taraftan barutların yanma hızları [29];

- Barutun cinsine,
- Barut tanelerinin biçim ve boyutlarına,
- Barutun nem ve sıcaklığına,
- Barutun yandığı yerin durumuna,
- Barutu tutuşturan alev gücüne bağlı olarak değişir.

1.5.3.1. Barut Biçim ve Boyutlarının Yanma Özelliklerine Etkisi

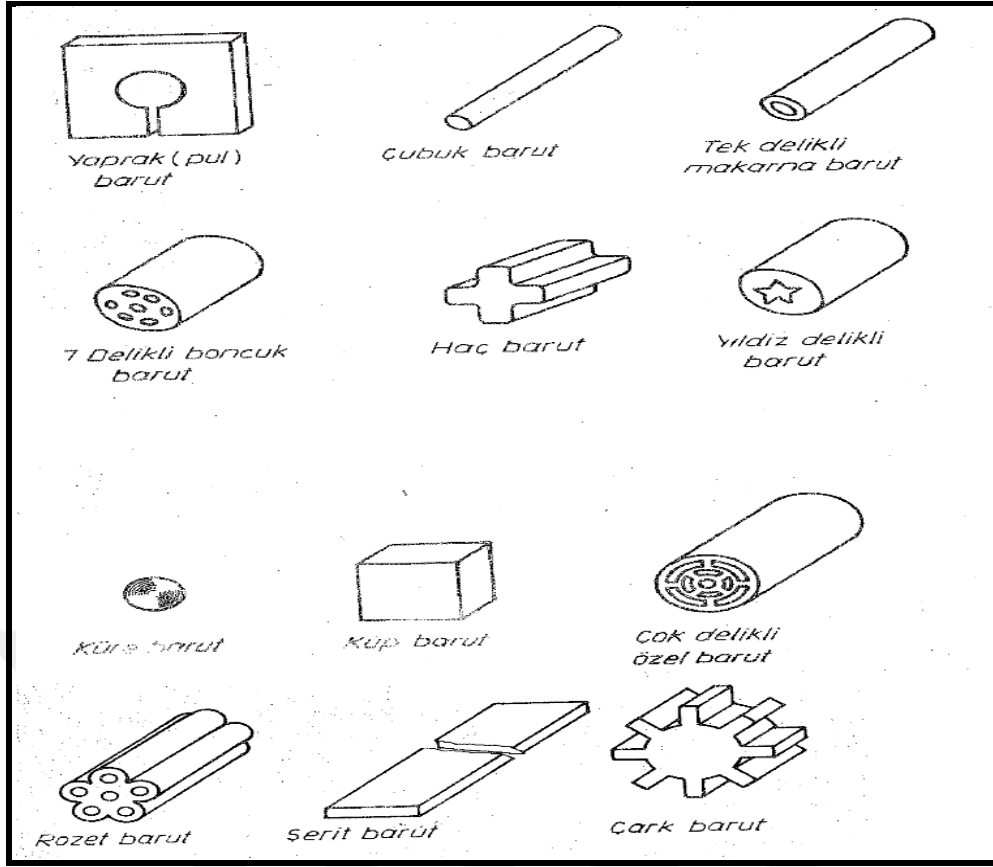
Barutların, ateşleme düzeninin oluşturduğu alev ile tutuşturulduğunda silahın haznesindeki (yanma odasındaki) gaz basıncı artmaya başlar. Gaz basıncındaki bu artış, merminin harekete başlaması, hatta bir miktar ilerleme yapmasına kadar devam eder.

Sevk barutunun özelliklerine bağlı olarak artmakta olan basınç belli bir noktada maksimum olur ve ondan sonra merminin hareketine devam etmesiyle, yanma odasının hacmi büyür ve gaz basıncının zamanla azalmasına neden olur.

Yanma oranının ve onunla beraber gaz basıncının kontrolü sadece sevk barutunun kimyasal bileşimini değiştirmekle mümkün olmamaktadır. Gerekli kontrolün sağlanması, barut tanelerinin geometrik biçiminin ve yüzey alanının uygun seçilmesi ile mümkün olmaktadır. Barutun yüzey alanının büyük olması birim zamanda daha fazla gazın açığa çıkmasına neden olur [29].

$$\text{Yanma Oranı} = \frac{\text{Birim Zamanda Yanan Barut Miktarı}}{\text{Toplam Barut Miktarı}}$$

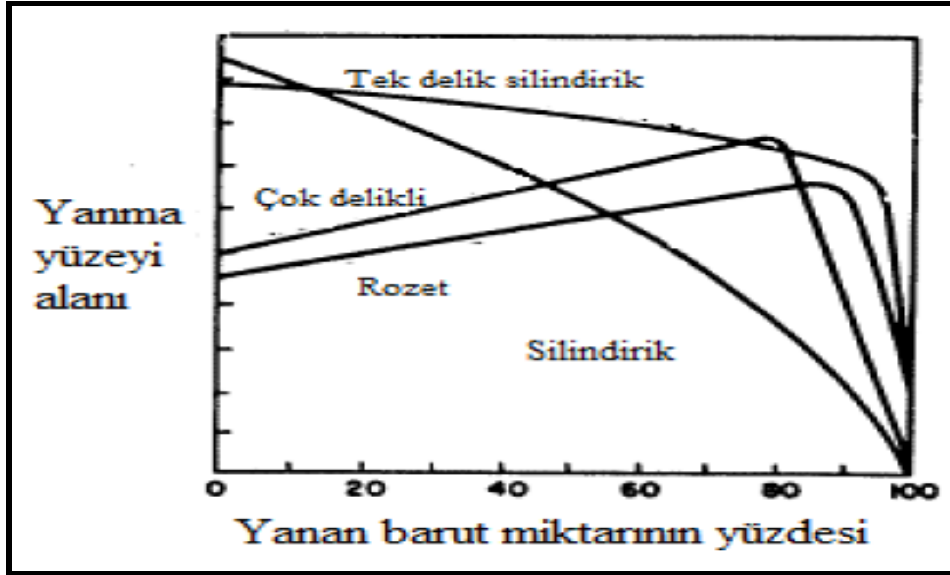
Değişik tipteki silahların isteklerini karşılamak amacıyla sevk barutları Şekil 1.3'de gösterilen biçimlerde imal edilmektedir [29].



Şekil 1.3. Barut Tanelerinin Şekilleri [29]

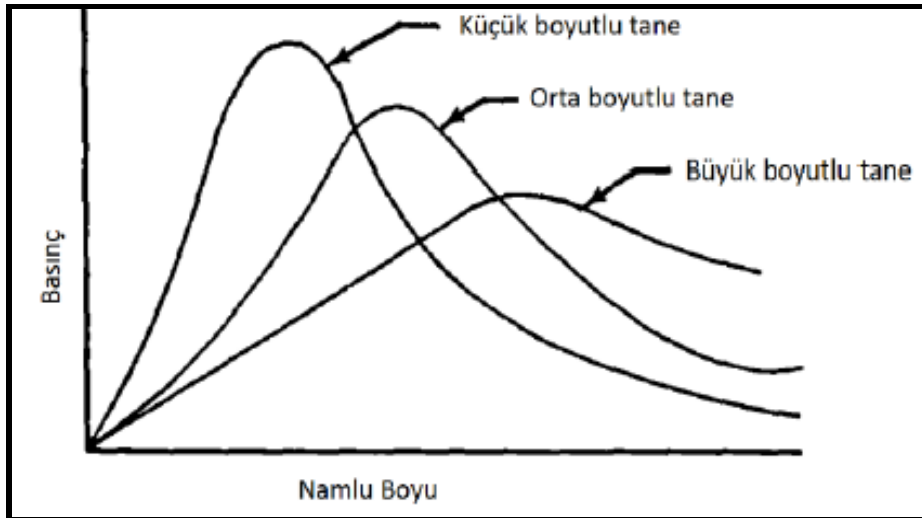
Rozet ve çok delikli silindirik tanelerinde yanma ilerledikçe yanma yüzeyinin alanı artmaktadır. Öte yandan, silindirik ve tek delikli silindirik tanelerde ise yanma ilerledikçe yanma yüzeyi alanı azalmaktadır (Şekil 1.4).

Yanma yüzeyi alanının yanma ilerledikçe artması, yanmanın proses boyunca hızlanarak ilerlemesine neden olmaktadır [30].



Şekil 1.4. Barut Tane Geometrisinin Yanma Miktarına Etkisi [30]

Küçük tane boyutlarına sahip barut yanmanın daha hızlı ve daha kısa sürede gerçekleşmesine ve basınç artışının daha kısa sürede elde edilmesine sebep olmaktadır. Barut tanesinin boyutunun büyümesi halinde ise yanma daha yavaş ve basınç artışı daha uzun sürede gerçekleşmektedir (Şekil 1.5) [30].



Şekil 1.5. Barut Tane Boyutunun Etkisi [30]

1.5.3.2. Barutların Nem ve Sıcaklıklarının Yanmaya Etkisi

Barutlarda aranan önemli özelliklerden birisi de barutların nem ve sıcaklık gibi etkilerden mümkün olduğu kadar az etkilenmesidir.

Barutların nem ve sıcaklıklarındaki değişimler, barutların, silahların haznelerinde yanmalarından ötürü oluşan gaz basınçlarında ve yanma hızlarında önemli değişiklikler meydana getirir. Sevk barutları her zaman nem alma eğilimindedirler. Ancak, nem miktarı barut tanelerinin biçimlerine, barutların kimyasal yapılarına ve havanın ihtiva ettiği nem miktarına bağlı olarak değişir.

Yaz ve kış mevsimleri arasında barutlarda ki nem miktarı, mermi ilk hızında ± 4 m/s ve maksimum basınçta ± 55 kg/cm² farklıklar gösterebilir. Hız ve maksimum basınçtaki değişiklikler aşağıdaki formülle hesaplanır [25]:

$$DV_0 = \frac{V_0 * DT}{100}$$

$$DP = \frac{P_{max} * DT}{100}$$

Burada, DV₀: Hız değişimi; V₀: İlk hız; DT: Sıcaklık değişimi; DP: Basınç değişimi; P_{max}: Maksimum basınç'dır.

1.5.3.3. Barutların Doldurma Yoğunluklarının Yanmalarına Etkisi

Silahların haznelerine bir kovan yada bez kese içine konulan sevk barutlarının miktarları ile içinde buldukları kovan iç hacmi yada silahın hazne hacmi (keseli barutlarda) arasında bir bağlantı vardır. Bu bağlantıya doldurma yoğunluğu denir.

$$\text{Doldurma Yoğunluğu} = \frac{\text{Barut Miktarı(g)}}{\text{Barutun Yanacağı yerin net hacmi(cm³)}$$

Top ve obüslerde doldurma yoğunluğu 0,50 - 0,60 g/cm³ arasındadır. Maksimum doldurma yoğunluğu 0,75 g/cm³ olabilir. Hafif silahlarda Nitroselüloz içeren barutlarda doldurma yoğunluğu 0,95 g/cm³'dür. Doldurma yoğunluğu arttıkça ilk hız ve basınç artar. Namlu ağzı basıncı da buna bağlı olarak artacağından kayıplar yükselir. Öte yandan doldurma yoğunluğu çok az olursa, mermi namluda kalır. Bu nedenle, en uygun doldurma yoğunluğu belirlenip kullanılmalıdır. Aşırı doldurma yoğunluklarında sevk barutlarında yanma yerine patlama meydana gelebilir. Bazen de aşırı doldurma yoğunluğu sevk barutunun bir kısmını yanmadan tane halinde namludan dışarıya atılmasına neden olur [29].

1.5.4. Barutlarda Kimyasal Kararlılık

Kararlılık testleri, tehlikeli bir malzemenin güvenli olup olmayacağını ve belirli bir depolama süresi boyunca özelliklerini koruyup korumadığını belirlemeye yardımcı olur. Kararlılık testinden beklenen sonuçlar ağırlıktaki değişiklikler, serbest bırakılan gazların hacmi, renk değişimi, oksitlerin oluşumu gibi özelliklerin değişiminin barutun uzun süreli depolama koşullarından sonra düzgün ve güvenli bir şekilde çalışıp çalışmadığı hakkında bilgi verir. Özellikle nem ve sıcaklık gibi iki çevresel faktör barutun kararlılığını etkileyebilir [31].

Barutların temel enerjik bileşenleri nitro esterlerdir (nitroselüloz ve nitrogliserin). Amaca bağlı olarak, istenen özelliklere ulaşmak için, barutlar başka katkı maddeleri de içerebilir. Barut bileşimindeki nitro esterlerin termal ayrışması üretimin en başında başlayıp depolama sırasında da devam eder. Azot oksitler, bozunma ürünleri olarak ortaya çıkar. Depolama sıcaklıklarında barutlar otokatalitik bozunmaya maruz kalırlar. Bozunma, barutların kendiliğinden yanmasına neden olabilir. Bu nedenle, barutlar depo veya mühimmattan ayrılarak güvenli bir şekilde imha edilmelidir. Bu gibi durumların ne zaman olabileceğini tahmin etmek için farklı kararlılık testleri geliştirilmiştir. Bunlardan Amerikan vakum kararlılık testi, bir patlayıcının teknik değerlendirmesi için daha uygundur [32].

Bununla birlikte, tek bazlı ve çift bazlı barutlar için klasik kimyasal kararlılık yöntemleri vardır. Metil Viyole yöntemi, tek bazlı barutların 100 °C ve 134,5 °C'de, çift bazlı barutların ise 120 °C'de ısıtmaya tabi tutularak barutların hızlandırılmış bir şekilde bozulmasına ve salınan azot oksitlerin kantitatif izlenmesine dayanmaktadır [32].

1.5.5. Barutlarda Termal Değerlendirme

Barutların termal özellikleri, ürün performansının ve uygunluğunun değerlendirilmesi açısından önemli bir yere sahiptir. Termal değerlendirme teknikleri ile başlangıç sıcaklığı, erime noktası, entalpi değişimi, sıcaklığın fonksiyonu olarak kütle kaybı, camsı geçiş sıcaklığı, ısı kapasitesi, ateşleme sıcaklığı, saflık vb. birçok parametrenin belirlenmesi mümkündür.

Bu amaçla, barut ısıtma işlemine tabi tutulur ve numuneden gelen tepki sıcaklığa göre kaydedilir. Termal değerlendirme teknikleri; termal kararlılık, raf ömrü, uyumluluk, güvenlik özellikleri, geçiş sıcaklığı, ısı kapasitesi, erime sıcaklığı, kristalizasyon kinetiği, tehlike değerlendirmesi, yaşlanma etkileri, kalite kontrol, dehidrasyon kinetiği, geçiş ısı, faz geçişi, camsı geçiş sıcaklığı, vb. hususlar hakkında daha iyi bilgiler elde edilmesini sağlar [33].

1.6. Literatür Değerlendirilmesi

Enerjik maddelerin katı yakıtı içeriğine ilave edilmesiyle kullanıldığı sistemlerde (silah sistemi, roket sistemleri vb.) performansı arttırdığı bilinmektedir. Bu nedenle daha çok metal esaslı enerjik malzemeler kullanılmıştır. Örneğin, HTPB bazlı kompozit yakıtlara alüminyumun balistik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması için on adet alüminyum katkılı numune hazırlanmış, Al katkılanması ile kalorifik enerjinin arttığını, ancak yakıt içindeki Al oranını %20 değerine ulaştığında, alüminyumun yanması için gerekli oksijen miktarının yetersiz olmasından dolayı kalorifik enerjinin tekrar azaldığı rapor edilmiştir [34].

Başka bir çalışmada, çift bazlı yakıt içeriğine farklı kütleli oranlarda (%0 - 12) Al takviye edilmiş ve kalorifik enerjisinin Al ilave miktarının artması ile birlikte arttığı belirlenmiştir [35].

Luman ve arkadaşları, yüksek enerjili metal esaslı alüminyum, bor ve metal olmayan yüksek enerjili Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20), Hidrazinium Nitroformate (HNF), HMX ve RDX maddelerini farklı 8 kompozisyonda katı roket yakıtı içeriklerine ilave ederek yanma hızı ve ısı enerjisi değişimi konusunu incelemiştir [36].

Galfetti ve arkadaşları, kompozit esaslı yakıt içeriğine alüminyum ilavesinin lineer yanma hızını artırdığını rapor etmişlerdir. Özellikle katı roket yakıtına ilave edilen alüminyumun tane yapısı küçüldükçe lineer yanma hızının da arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, alüminyum ilave miktarının belirli miktardan fazla olması durumunda, yanma esnasında oluşan Al_2O_3 miktarının da artması ve özgül itkinin azaltmasına neden olduğu bildirilmiştir [37].

Xiong-Gang Wu ve arkadaşları, Kompozit Modifiye Edilmiş Çift Bazlı yakıt içeriğine çeşitli yüksek enerjili metalik esaslı maddelerin sırayla Al, B, Ni, Mg ve Al/Mg karışımı ayrı ayrı ağırlıkça aynı miktarda ilave etmiş ve yanma hızlarına etkisi incelemiştir [7].

Katı yakıtlara yüksek enerjili metal esaslı katkı maddeleri olarak; alüminyum, bor temelli maddeler bor karbür, magnezyum kaplı bor (MgB) maddeleri farklı miktarlarda katkılı olduğu başka bir çalışmada, 883 cal/g kalorifik enerjiye sahip çift bazlı roket yakıtına kütlece %2, %4 ve %6 oranlarında Al katkılanmış, elde edilen yakıtın kalorifik enerjilerinin sırasıyla %5.1, %8.06 ve %12.58 oranlarında artarak 928, 954 ve 994 cal/g değerlerine ulaştığı rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, 898 cal/g kalorifik enerjiye sahip başka bir roket yakıtına %2 Al katkılanarak, yakıtın kalorifik enerjisinin %2,77 oranında artarak 923 cal/g ulaştığı rapor edilmiştir [9].

Ayrıca, 898 cal/g kalorifik enerjiye sahip çift bazlı roket yakıtına %2 B_4C katkılayarak hazırlanmış olduğu yeni yakıtın kalorifik enerjisini %2,88 oranında artırarak 924 cal/g çıkartmış ve %2 MgB katkılayarak enerjiyi %2 oranında artırarak 916 cal/g kalorifik enerji açığa çıkartmıştır. Ayrıca yakıt

numunelerinin yanma hızlarının da metal esaslı yüksek enerjili maddelerin eklenmesi ile arttığını belirtmiştir [9].

Liang ve arkadaşları, katı yakıtlar için Bor'un mükemmel gravimetrik ve hacimsel kalorifik enerji değerleri nedeniyle oldukça çekici olmasına rağmen, ateşleme zorluğu ve düşük yanma verimi gibi dezavantajlarının olduğunu belirtmişlerdir. Bor'un bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve enerji salınım özelliklerini geliştirmek için, Magnezyum diborür, B ikame maddesi olarak dikkat çekici olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, düşük erime ve kaynama noktalarına (650 °C ve 1107 °C) sahip ve bor'a nispeten daha iyi tutuşma ve yanma özelliklerine sahip magnezyum ile uygun miktarlarda karıştırılarak oluşturulan MgB₂'nin ateşleme gecikmesini önemli ölçüde azaltabileceğini ve yanma veriminin de artırabileceğini rapor etmişlerdir [38].

Stankovic ve arkadaşları, tek ve çift bazlı yakıtların termal analiz ve kimyasal kararlılıklarını inceleyerek, termal bozunmalarının, nitro-esterlerin bozunması ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir [39].

Rocca ve arkadaşları, Amonyum Perklorat (AP)/Hidroksil Uçlu Polibütadien (HTPB) katkılı kompozit yakıtların termal bozunması ve ekzotermik reaksiyon kinetiğini; azot ortamında, farklı ısıtma oranlarında ve izotermal olmayan koşullarda Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ile incelemişlerdir [40].

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Kullanılan Ekipmanlar ve Cihazlar

Sulu karıştırma kazanı: Fabrikasyon

Santrifüj: Fabrikasyon

Werner karıştırıcı: Fabrikasyon

Terazi: Radwag AS220 R2

Etüv: Mikro Test

Halojenli Nem Tayin Cihazı: Metler Toledo

Elek Sallama Cihazı: Haver EML 200

Değirmen: Arthur H. Thomas CO. Scientific Apparatus

Soxhlet Ekstraksiyon Cihazı: GFL

HPLC: Waters e2695

Kalorimetre Cihazı: IKA C2000

DSC: Universal V4.5A TA Instruments

Kararlılık Cihazı: Plants and Machinery For Chemical Industries

2.2. Kullanılan Kimyasallar

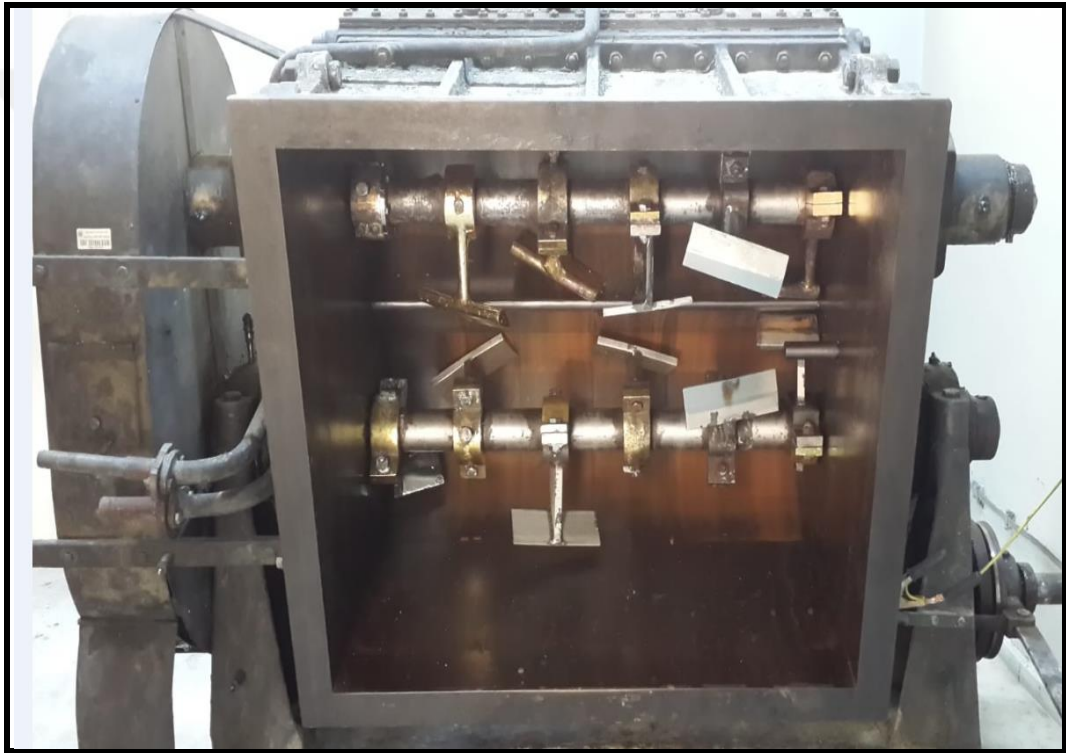
Nitrogliserin, nitroselüloz, Etil Santralit (EC) ve Dietil Ftalat (DEP) Makine Kimya Endüstri Kurumundan (MKEK) temin edildi. Diğer kimyasal maddeler analitik saflıkta olup, özellikleri Çizelge 2.1'de verildi.

Çizelge 2.1. Kullanılan Kimyasalların Özellikleri

Adı	Formülü	Özellikleri
Nitrogliserin	$C_3H_5(NO_3)_3$	Molekül Ağırlığı: 227.09 g/mol Azot > %18.40, CAS No: 55-63-0 EC No: 200-240-8, MKEK/ANKARA
Nitroselüloz	$C_{18}H_{21}N_{11}O_{38}$	Molekül Ağırlığı: 999.4 g/mol CAS No: 9004-70-0, Azot: %13.25 MKEK/KIRIKKALE
Dietil Ftalat	$C_{12}H_{14}O_4$	Molekül Ağırlığı: 222.24 g/mol CAS No: 84-66-2 EC No: 201-550-6 9004-70-0 Safılık ≥99%, İTHAL
Etil Santralit	$C_{17}H_{20}N_2O$	Molekül Ağırlığı: 268.35 g/mol CAS No: 85-98-3, EC No: 201-645-2 DN: 71 - 72.5 °C, İTHAL
Potasyum Nitrat	KNO_3	Molekül Ağırlığı: 101.10 g/mol CAS No: 7757-79-1, EC No: 231-818-8, Safılık ≥99%, MERCK
Alüminyum	Al	Molekül Ağırlığı: 26.98 g/mol CAS No: 7429-90-5 EC No: 231-072-3 Safılık ≥99%, Partikül Boyutu ~ 40 mikron, SİGMA-ALDRICH
Magnezyum	Mg	Molekül Ağırlığı: 24.31 g/mol CAS No: 7439-95-4 EC No: 231-104-6, Safılık ≥97% Partikül Boyutu < 0.1 mm, MERCK
Bor	B	Molekül Ağırlığı: 10.81 g/mol CAS No: 7440-42-8 EC No: 231-151-2, Safılık ≥95% SİGMA-ALDRICH
Bor Karbür	B_4C	Molekül Ağırlığı: 55.25 g/mol CAS No: 12069-32-8 EC No: 235-111-5
Bor Nitrür	BN	Molekül Ağırlığı: 24.82 g/mol CAS No: 10042-11-5 EC No: 233-136-6, Safılık ≥98% Partikül Boyutu ~ 1 mikron SİGMA-ALDRICH

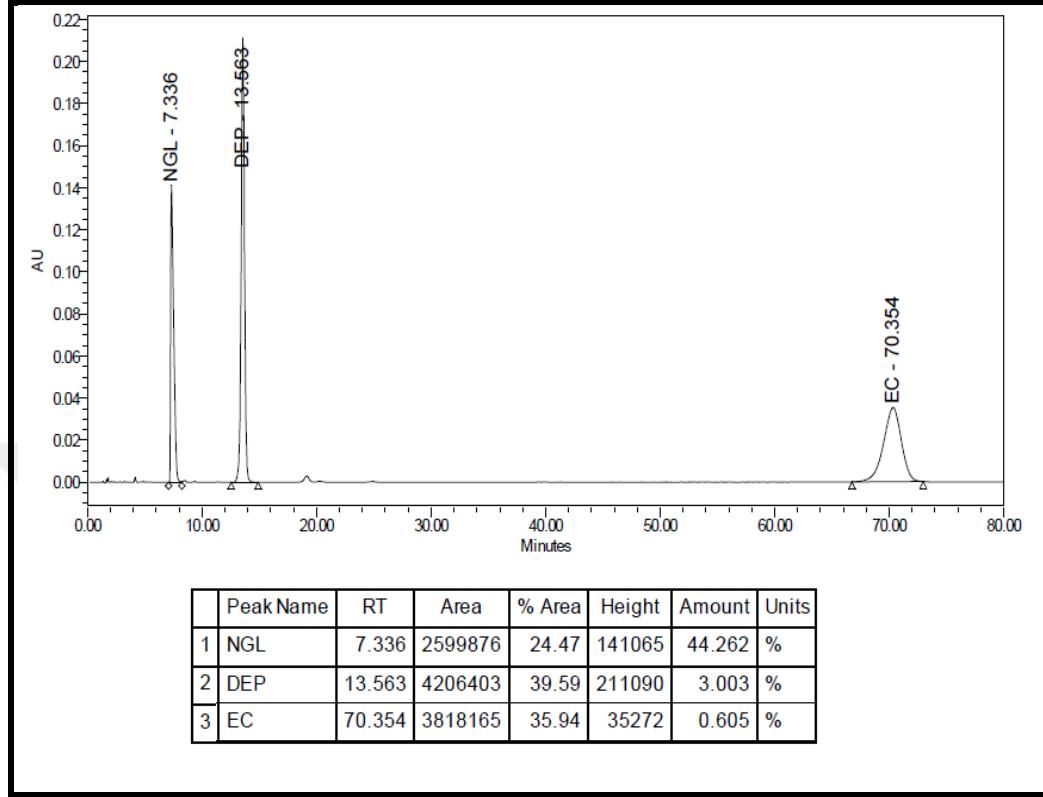
2.3. Barut Örneklerinin Hazırlanması

Katkılı sevk barut numuneleri, nitroselüloz sulu karıştırma kazanında karıştırıldıktan sonra nitrogliserin ilave edilerek, yapıdaki suyun uzaklaştırılması amacıyla, santrifüjlenerek su oranının yaklaşık %20 olması sağlandı. Santrifüjleme sonrası karışıma etil santralit ve dietil ftalat eklenerek Werner karıştırıcıda homojen karışım elde edilene kadar karıştırıldı (Şekil 2.1). Bu karışım bundan sonra ham kitle olarak anılacaktır.



Şekil 2.1. Werner Karıştırıcı (MKE Barutsan)

Hamkitlenin kimyasal kompozisyonu Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografi (HPLC) yöntemi ile belirlendi (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Hamkitlenin HPLC Kromatogramı (Akış hızı; 1.3 ml/dak, Mobil Faz; 50/50 metanol/su, Kolon Fırın Sıcaklığı; 50 °C, Kolon; C18, 5µm, 4.6mmx250mm)

Hazırlanmış olan hamkitleden belirli bir miktar numune alınarak etüvde 40 °C'de 48 saat boyunca kurutularak nem miktarı %0,5 altına düşürüldü. Bu aşamada meydana gelen hamkitle topaklanmaları, 0,850 mm elek açıklığına sahip elekten elenerek giderildi. Daha sonra Çizelge 2.2'de verilen kompozisyonlarda katkılı barut örnekleri hazırlandı.

Solventsiz olarak hazırlanan barut örneği dışındaki diğer tüm örneklere Etil Alkol (25 ml) ilave edildi ve kapalı ortamda etil alkol ile barut örnekleri homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırıldı. Daha sonra jelatinleştirmeyi sağlamak amacıyla aseton (25 ml) kapalı ortamda

eklenerek karıştırıldı. Homojen bir karışım haline gelen barut örnekleri, preslenerek oda sıcaklığında 2 saat, sonrasında 40 °C sıcaklıkta 48 saat boyunca bekletildi. Son olarak, oda sıcaklığında 2 saat şartlanması sağlanan numunelerin toplam uçucu analizleri yapıldı.

Örnekler MIL-STD-652D askeri şartnamesinde geçen M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için en fazla % 0,4 toplam uçucuya sahip olma şartını sağlayana kadar etüvde kurutuldu [41].

Solventsiz numunelerin hazırlanması için, %20,52 nem oranına sahip ham kitleden 62,91 g alındı ve üzerine 0,67 g Potasyum Nitrat (KNO_3) eklenerek homojen karışım elde edilene kadar karıştırıldı. Hazırlanmış olan bu karışım önceden 80°C'de şartlanmış valslerde işleme tabi tutularak jelatinize edilmesi sağlandı.

Çizelge 2.2. Barut Karışım Miktarları

Takviye oranı, %	0	1	2	4	6	4/1 BN
KNO_3, g	0,67	0,67	0,68	0,69	0,69	0,68
Takviye miktarı, g	-	0,51	1,03	2,11	3,24	2,14
BN, g	-	-	-	-	-	0,55
Hamkitle, g	50	50	50	50	50	50

2.4. Karakterizasyon ve Değerlendirme

Yeni bir barut kompozisyonu hazırlandığında, hazırlanmış olan yeni örneğin değerlendirilmesi büyük bir öneme sahiptir.

Karakterizasyon aslında bir tanımlama süreci, değerlendirme ise, belirli bir özelliğin ölçülmesi anlamına gelir. Örneğin, yeni bir karışımın, kimyasal bileşeninin ne olduğundan emin olması için kromatografi, spektroskopi, gravimetrik ve volumetrik yöntemler dahil sistematik işlemlerle karakterize edilir. Öte yandan, yeni karışımın belirli performans parametreleri veya performans potansiyelleri için değerlendirilir [33].

Bu nedenle, yeni kompozisyonda hazırlanmış olan barut, kalorifik değeri, tutuşma sıcaklığı, kararlılık ve termal analizler açısından değerlendirildi.

2.5. Barutların Test ve Ölçüm Yöntemleri

Hazırlanan barut örneklerinin toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji, kararlılık, yanma sonunda oluşan atık miktarı ile termal analizlerinin test ve ölçümleri yapıldı.

2.5.1. Toplam Uçucu Madde Tayini

Toplam uçucu madde tayini için, barut örneklerinden yaklaşık 1 g alındı ve nem analiz cihazı ile 80 °C'de kütle kayıpları belirlendi. Deneyler üç kez tekrarlanarak ortalama olarak verildi.

2.5.2. Kalorifik Enerji Değerinin Belirlenmesi

Hazırlanan barut örneklerinin kalorifik enerji değeri, sabit hacimli kapalı bomba kalorimetre cihazı ile tespit edildi. Kapalı bomba kalorimetre cihazının kalibrasyonu analizler öncesinde benzoik asit standardı ile yapıldı. Her bir barut örneği 0,0001 g hassasiyetinde hassas terazi kullanılarak yaklaşık 2,0000 gram tartıldı ve kalorimetre cihazı ile enerji değeri belirlendi. Bu analiz her bir barut numunesi üç kez tekrarlandı ve sonuçlar ortalama olarak hesaplandı.



Şekil 2.3. Kalorimetre Cihazı (MKE Barutsan)

2.5.3. Kararlılık Testi

Barut örneklerinin kararlılığı, Metil Viyole testi ile belirlendi. Bu analiz için, barut örneklerinden 2,5 g alınarak test tüpüne konuldu. Aynı koşullarda iki adet numune hazırlandı. Her tüpe standardize edilmiş 20*70 mm metil viyole test kâğıdının alt kısmı numuneden 25 mm yükseklikte olacak şekilde kısıpca takılıp tüpe yerleştirildi. Test tüpleri $120 \pm 0,5$ °C'deki test banyosuna konuldu. İlk 20 dakikadan sonra test kâğıtlarında renk değişiminin olup olmadığı kontrol edildi. Test kâğıtlarının tamamı pembe renge dönüştüğünde test sonlandırıldı ve test süresi kayıtlı edildi [42].



Şekil 2.4. Metil Viyole Kararlılık Test Cihazı (MKE Barutsan)

2.5.4. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre 'de numune ile referansın düzenli bir hızla sıcaklıkları artırılmaktadır. Ancak numune veya referansın sıcaklıklarının aynı olması için dışarıdan gerekli miktarda ısı katkısı yapılarak ilave edilen ısı kaydedilir. Numunede oluşan endotermik veya ekzotermik reaksiyonlar sonucu kaybedilen veya kazanılan ısı karşılaştırılmaktadır. DSC'de ısıtıcılar numune ve referans kaplarının çok yakınına yerleştirilmiştir. Sensör sıcaklık farkı algıladığında, numune ve referanstan soğuk olanın sıcaklığı diğeri ile aynı seviyeye gelecek miktarda ısı verilir. Isıtma hızı örnek sıcaklığının fonksiyonu olarak kaydedilmektedir [43].

DSC lm cihazı ile hazırladığımız örnekleri yaklaşık 1 mg ağırlıklarda tartıp 5 °C/dk ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar termal bozunmaları ölçüldü.



şekil 2.5. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Test Cihazı [42]

2.5.5. Yanma Sonunda Oluşan Atık Miktarı Analizi

Kalorifik enerji değerinin belirlenmesi için Bomba Kalorimetresinde yapılan analiz sonucunda yanmış olan barutun kalıntıları saf su ile bir behere toplandıktan sonra sabit tartıma getirilmiş No:3 Gooch krozesinden süzöldü ve 105 °C'ye ayarlı etüvde 2 saat kurutuldu. Desikatörde oda koşullarına kadar soğutulan atığın miktarı hassas terazi kullanılarak belirlendi ve sonuçlar yüzde olarak verildi.



3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Katkısız Barut Örnekleri

Solventli ve solventsiz barut numuneleri Bölüm 2.3'te anlatıldığı ve Çizelge 2.2'de verilen miktarlar kullanılarak hazırlandı.

Solventli ve solventsiz barutların, toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi (Çizelge 3.1). Elde edilen sonuçlara göre, 120 °C'de solventli ve solventsiz barut numunesinin metil viyoleto kararlılık testinde MIL-STD-652D askeri şartnamesinde geçen M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için en az 40 dk metil viyoleto kağıdının renk değiştirmeme şartını sağladığı belirlendi [41]. Aynı zamanda, her iki barut numunesinin kalorifik enerji değerlerinin de birbirlerine yakın olduğu ve literatür de geçen M8 terkipli barutlarda 1244 cal/g değeri ile uyumlu olduğu görüldü [44]. Böylece, barutun yapısındaki solventin kararlılık ve kalorifik enerji değeri üzerine bir etkisinin olmadığı belirlendi.

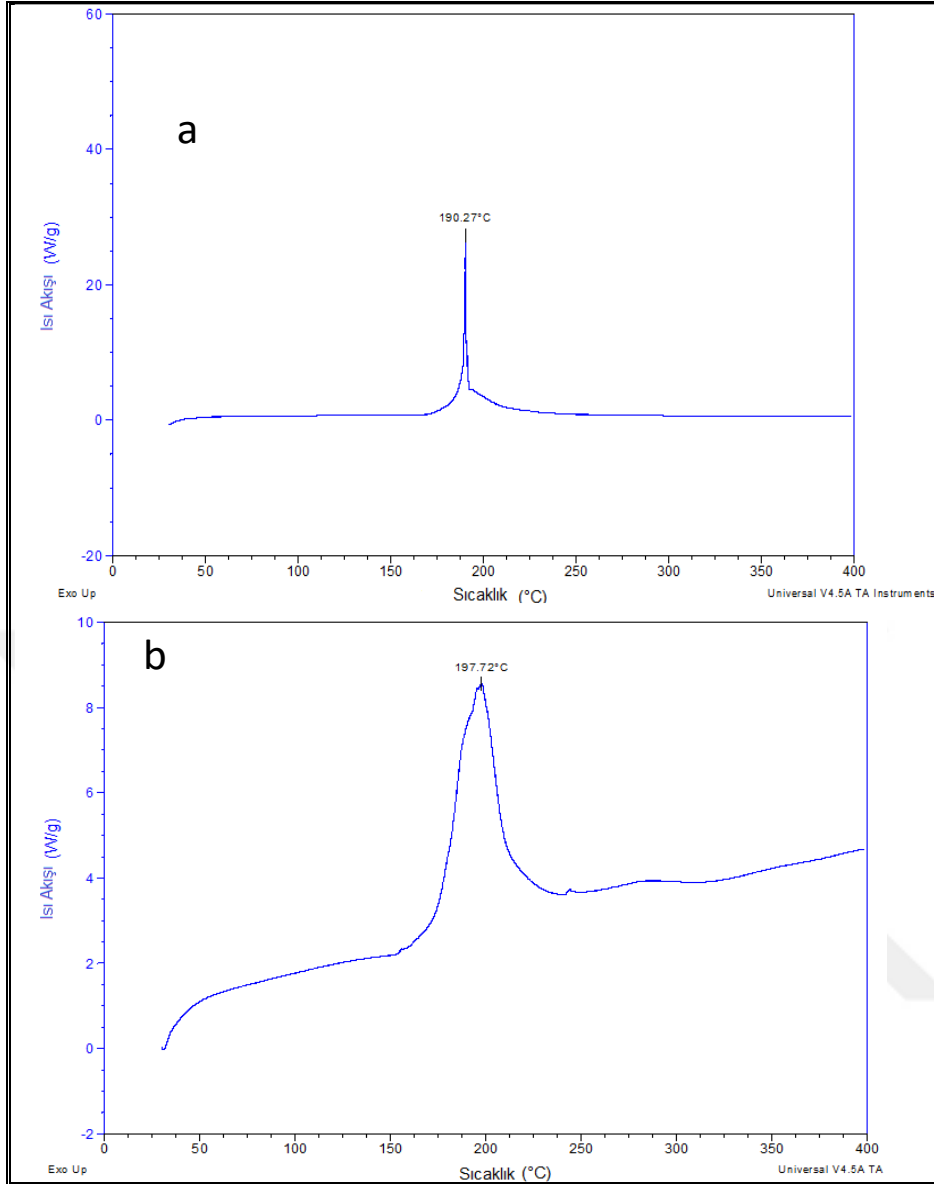
Bundan sonraki çalışmalarda, hamkitleye farklı takviyeler yapılarak solventli barut örnekleri hazırlandı ve kalorifik enerji değeri ve barutun yanma sonunda bıraktığı atık miktarı temel alınarak karşılaştırmalar yapıldı.

Çizelge 3.1. Katkısız Barut Analiz Sonuçları

Parametreler (%)	Solventli Barut	Solventsiz Barut
Nitrogliserin	43,67	43,67
Nitroselüloz	51,45	51,45
Potasyum nitrat	1,33	1,33
Etil santralit	0,59	0,59
Dietilftalat	2,96	2,96
Uçuşu Madde	0,33	0,24
Kararlılık, dakika	60	60
Kalori, cal/g	1242	1244
Atık	0,02	0,02

Laboratuvar koşullarında hazırlanan, solventli ve solventsiz katkısız barut numunesinin DSC termogramı Şekil 3.1'de verildi. Termogramdan solventli katkısız barutun, ekzotermik bir pike sahip olduğu, bozunmanın yaklaşık 170 °C'de başladığı ve 190,27 °C'ye kadar devam ettiği görüldü (Şekil 3.1a). Solventsiz katkısız barut örneğinin de benzer olarak tek bir bozunma pikine sahip olduğu ve bozunmanın yaklaşık 150 °C'de başladığı ve 197,27 °C'ye kadar devam ettiği görüldü (Şekil 3.1b).

Solventli ve solventsiz enerjik madde katkısız olarak hazırlanmış olan aynı kompozisyondaki numunelerin termal bozunmalarının başlangıç ve bitiş sıcaklıkları literatür ile uyum göstermektedir.



Şekil 3.1. Solventli (a) ve Solventsiz (b) Katkısız Barut Örneklerinin DSC Termogramı

Musanic ve arkadaşları çift bazlı (DB) bir yakıt numunesi 2 °C/dk ısıtma hızı ile elde ettikleri DSC termogramında DB yakıtının 150 °C'nin üzerinde ekzotermik olarak bozunmaya başladığı ve bozunmanın yaklaşık olarak 190 °C'ye kadar devam ettiğini rapor etmiştir [45].

Başka bir çalışmada ise bir çift bazlı yakıtın farklı ısıtma hızlarında DSC termogramları elde edilmiş, bozunmanın 2 °C/dk ısıtma hızı ile 189,5 °C, 5 °C/dk ısıtma hızı ile 195,6 °C, 7 °C/dk ısıtma hızı ile 199,9 °C ve 10 °C/dk ısıtma hızı ile 198 °C'de gerçekleştiği belirlenmiştir [46].

3.2. Alüminyum Takviyeli Barut Örnekleri

Alüminyum takviyeli barut örnekleri Çizelge 2.2'ye göre hazırlanarak, toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi (Çizelge 3.2).

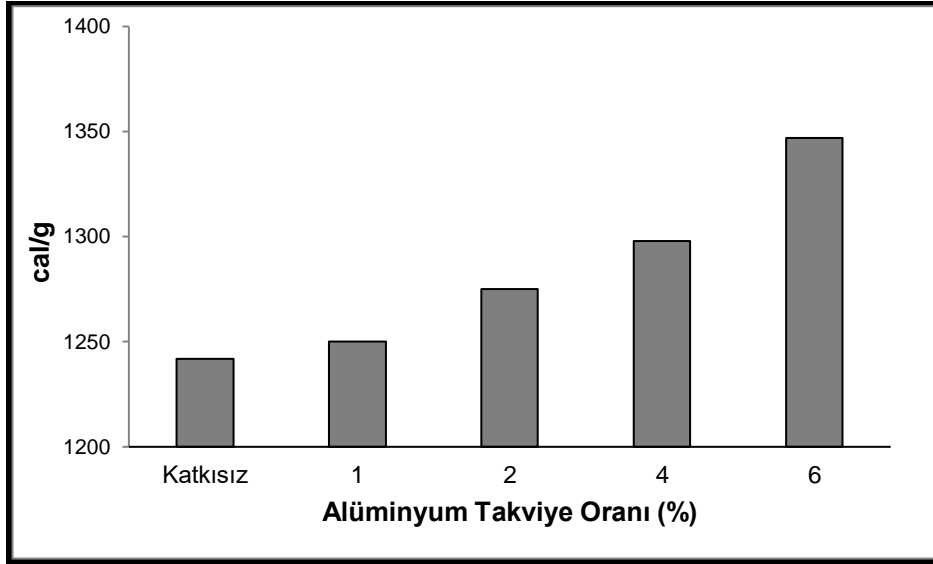
Hazırlanmış olan Al takviyeli barutun enerji değeri, solventli katkısız barut ile kıyaslandığında, Al katkısı arttıkça barutun kalorifik enerjisinin de arttığı belirlendi (Şekil 3.2). Gravimetrik yanma ısı 7405 cal/g olan alüminyumun barut içindeki oranı %1, %2, %4 ve %6'ya arttıkça kalorifik enerji değerlerindeki artışın %0.64, %2.66, %4.51 ve % 8.45 olduğu belirlendi [47].

Benzer bir çalışmada, 883 cal/g kalorifik enerji değerine sahip çift bazlı roket yakıtına %2, %4 ve %6 Al katkılanarak hazırlanmış yakıtın kalorifik enerjilerinin sırasıyla %5.1, %8.06 ve %12.58 oranlarında artarak 928, 954 ve 994 cal/g olduğu rapor edilmiştir. Aynı çalışma ile 898 cal/g kalorifik enerjiye sahip başka bir roket yakıtına %2 Al katkılanarak, roket yakıtının kalorifik enerjisinin %2,77 oranında artırarak 923 cal/g olduğu belirtilmiştir. Aynı oranlarda iki farklı kompozisyona sahip roket yakıtına ilave edilen %2 Al artış oranlarının aynı olmadığı görülmüştür [9].

Çalışmalar birbirleri ile kıyaslandığında çift bazlı yakıt kategorisinde olan roket ve barut örneklerinin kompozisyon oranları ve içeriklerinin farklı olmasından dolayı enerjik madde aynı oranda katkilansa bile enerji değerinde aynı oranlarda artış sağlamadığı görülmektedir. Bu da enerjik maddenin farklı içerik ve kompozisyonlarda yanma reaksiyonunun farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Başka bir çalışmada ise, HTPB bazlı kompozit yakıtlarda balistik ve mekanik özelliklere alüminyum etkisinin araştırılması için on adet alüminyum katkılı numune hazırlanmış ve kalorifik enerji değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, Al katkılamanın, kalorifik enerjiyi arttırdığı, ancak yakıt içindeki Al oranını %20 değerine ulaştığında, alüminyum tam olarak yanması için gerekli oksijen miktarının yetersiz olmasından dolayı daha düşük kalorifik enerjiye sahip olduğu rapor edilmiştir [34].

Enerjik metallerin çoğu yanmaya bağlı olarak, yanma sırasında oksijen difüzyonunu engelleyen ve yanma sonrasında da yanmamış metal kalıntıları ile birlikte atık olarak metal oksit bırakırlar. Yoğunlaşmış bu yanma ürünleri metal oranlarının ilavesiyle arttığından silah sistemlerinde istenilmeyen kalıntı bırakmaktadır. Bu nedenle, Al takviyesi arttıkça barutun kalorifik enerji değerinin artmasına rağmen, yanma sonrasında oluşan atık miktarının da paralel olarak arttığı belirlendi (Çizelge 3.2). Kütlece %4 Al ve %6 Al katkılı barutun yanması sonucunda sırasıyla %5,75 ve %7,70 atık bıraktığı, Al katkısının artmasıyla atık miktarının da arttığı görüldü. Kütlece %0,02 atığa sahip katkısız barut ile kıyaslandığında Al katkısı ile çok yüksek oranlarda atık oluşturduğu belirlendi. Al katkılı barutun 120 °C'de yapılan metil viyoleto kararlılık testinde ise, tüm katkı oranlarında katkısız baruta ait olan değere yakın sonuçlar elde edildi (Çizelge 3.2). Dolayısıyla, Al takviyesinin barutun kararlılığı üzerine olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlendi.



Şekil 3.2. Al Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi

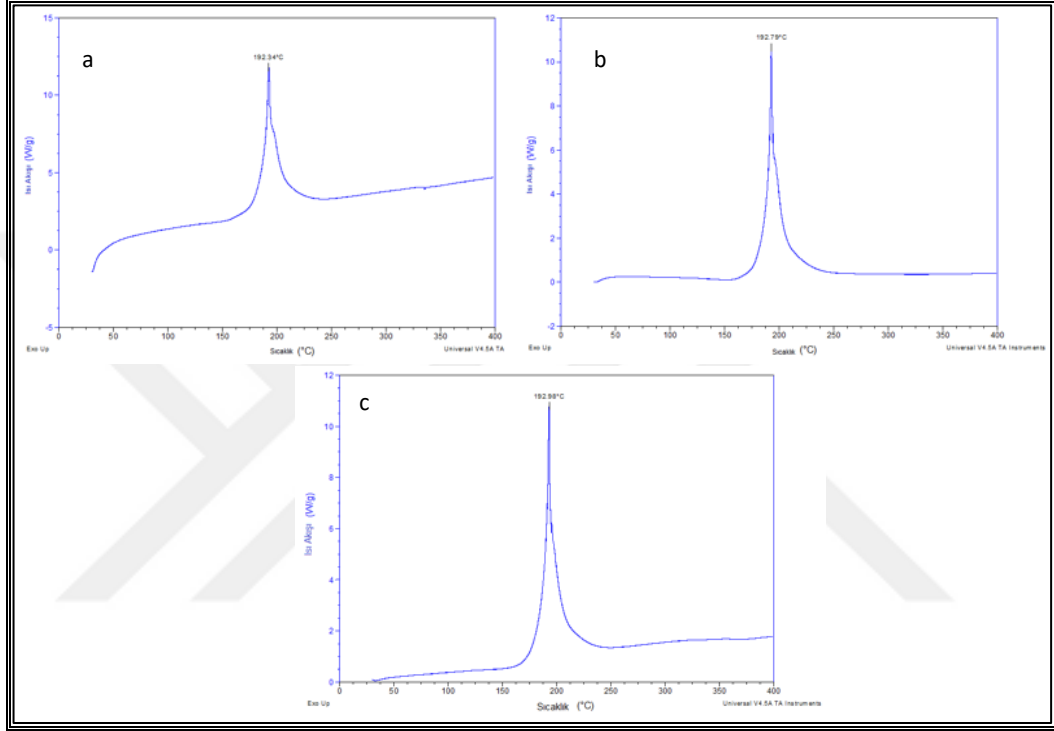
Çizelge 3.2. Alüminyum Takviyeli Barut Analiz Sonucu

Alüminyum, %	1	2	4	6
Uçucu Madde, %	0,34	0,35	0,34	0,37
Kararlılık, dakika	60	60	63	63
Kalori, cal/g	1250	1275	1298	1347
Atık, %	-	-	5,75	7,70

Alüminyum takviyesinin barutun termal davranışı üzerine etkisi DSC analizi ile belirlendi (Şekil 3.3). Elde edilen termogramlara bakıldığında, tüm Al katkılı barut numunelerinin ekzotermik bir bozunma pikine sahip olduğu ve takviye oranının %1'den % 4'e arttırılmasının barutun bozunma davranışını değiştirmedeği açıkça görülmektedir. Al takviyesinin %1 olduğu barut numunesinin yaklaşık 150 °C'de bozunmaya başlayıp 192,34 °C'ye kadar

devam ettiği görüldü (Şekil 3.3a). Benzer davranış, %2 ve %4 Al takviyeli barut örneklerinde de elde edildi. (Şekil 3.3b-c).

Al takviyeli barutun bozunma sıcaklığı ile katkısız barutun bozunma sıcaklığı karşılaştırıldığında, Al takviyeli barut örneklerinin katkısız baruta benzer bir bozunma davranışına sahip olduğu belirlendi.



Şekil 3.3.Farklı Oranlarda Al Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı; a) %1; b) %2; c) %4

Stankovic ve arkadaşları, tek ve çift bazlı yakıtların termal analiz ve kimyasal kararlılıklarını incelemiş ve termal bozunmanın nitro-ester stabilizörlerin tüketimi ile ilgili olduğunu belirtmiştir [39]. Bu nedenle, çift bazlı sevk baruta takviye edilen metal esaslı malzemelerin termal bozunma ve kararlılığa olumsuz yönde etkisinin olmamasının, kullanılan stabilizör oranından kaynaklandığı söylenebilir. Dolayısıyla, Alüminyum takviyesinin, barutun bozunma sıcaklığı ve kararlılık gibi özellikleri üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmaması, bununla birlikte kalorifik enerji değerini

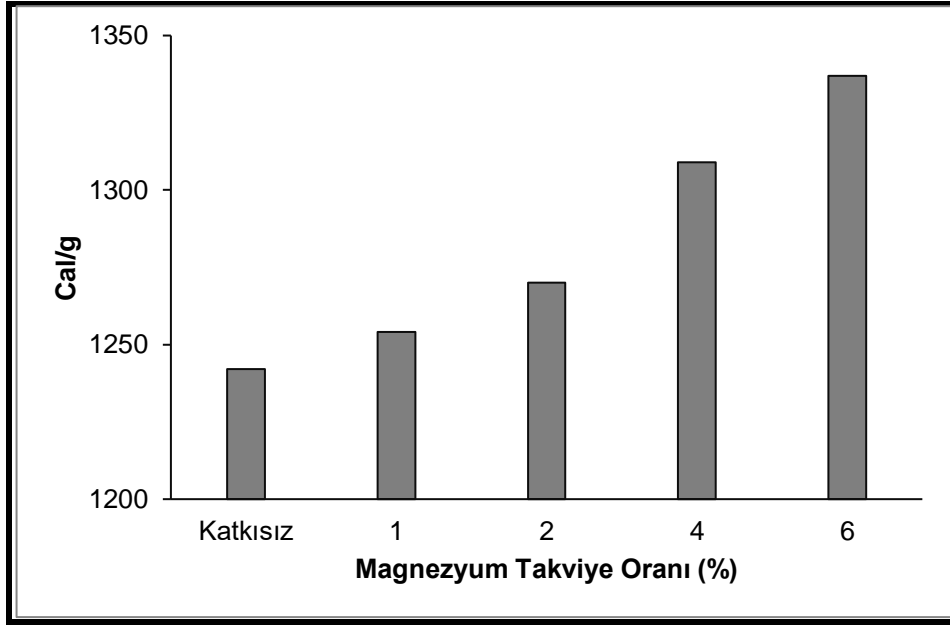
arttırması, doğada oldukça çok bulunması ve üretim maliyetinin ekonomik olması gibi özellikleri barutlarda enerjik malzeme olarak kullanılabilir bir takviye ajan olarak düşünülmektedir. Ancak, barutun tutuşmasından sonra silah sistemlerinde bıraktığı atık miktarının fazla olması önemli bir dezavantajdır.

3.3. Magnezyum Takviyeli Barut Örnekleri

Magnezyum takviyeli barut numuneleri Çizelge 2.2'ye göre hazırlanarak toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi.

Magnezyum takviyeli barut örneklerinin enerji değerleri, solventli katkısız barut ile kıyaslandığında, Mg katkısı arttıkça enerjinin arttığı belirlendi (Şekil 3.4). Gravimetrik kalorifik enerjisi 5924 cal/g olan magnezyum [48] barut içindeki oranının artmasıyla artan kalorifik enerji değerlerindeki artış %6 Mg içeriğinde %7,65 olarak belirlendi. Kütlece %6 Magnezyum katkılı barut ile %6 Alüminyum katkılı barutun kalorifik enerjileri birbirleri ile kıyaslandığında, alüminyum katkılı barutun kalorifik enerjisinin daha yüksek olmasının alüminyumun kalorifik enerji değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, Mg'nin de barut içindeki miktarı arttıkça, oluşan atık miktarının arttığı ve Al katkılı barutun atık miktarına yakın (%4 ve %6 katkı oranında sırasıyla %5,83 ve %7,12) olan bu değer katkısız barut ile kıyaslandığında (%0,02) çok yüksek olduğu görüldü (Çizelge 3.3).

Mg takviyeli barutun 120 °C'de kararlılıklarına bakıldığında, tüm katkı oranlarında 60 dk olduğu belirlendi (Çizelge 3.3). MIL-STD-652D askeri şartnamesine göre M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için en az 40 dk metil vioyle kağıdının renk değiştirmeme şartını sağladığı görüldü [41].



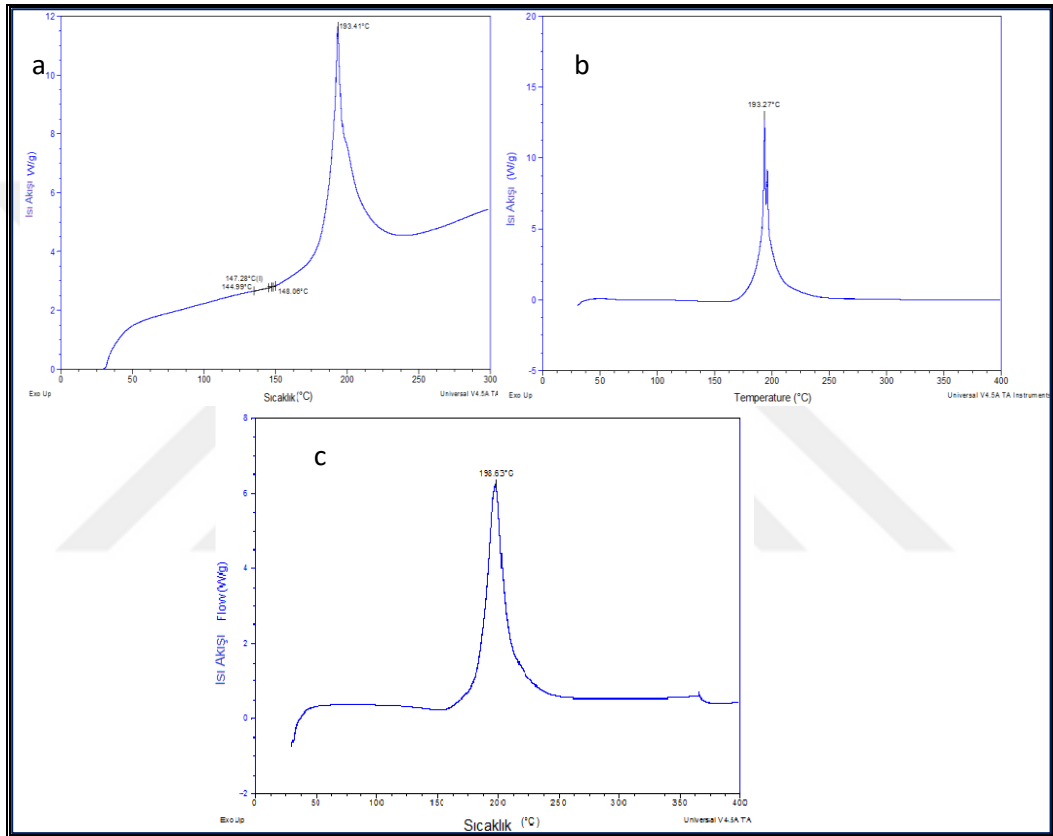
Şekil 3.4. Mg Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi

Çizelge 3.3. Magnezyum Takviyeli Barut Analiz Sonucu

Magnezyum , %	1	2	4	6
Uçuşu Madde, %	0,35	0,39	0,33	0,37
Kararlılık, dakika	60	60	60	62
Kalori, cal/g	1254	1270	1309	1337
Atık, %	-	-	5,83	7,12

Magnezyum takviyeli barutların DSC termogramından, %1 Mg katkılı barutun bozunmasının yaklaşık 150 °C' den başlayıp 193,41 °C'ye kadar devam ettiği (Şekil 3.5a), %2 Mg katkılı barutun bozunmasının yaklaşık 160 °C'den başlayıp 193,27 °C'ye kadar devam ettiği (Şekil 3.5b) ve %4 Mg katkılı barutun bozunması yaklaşık 150 °C'den başlayıp 198,63 °C'ye kadar devam ettiği görülmektedir (Şekil 3.5c).

DSC analizinden, Magnezyumun, baruta takviye edilmesinin barutun bozunma sıcaklığı ve kararlılığını olumsuz yönde etkilemediği söylenebilir. Kalorifik değerdeki artış ile birlikte Mg, M8 terkipli barut için elverişli bir enerjik malzeme olarak görünse de yanma sonrası silah sistemlerinde bıraktığı atık miktarının fazla olmasından dolayı silah sistemlerinde kullanılan barutlarda kullanımı sınırlı olabilir.



Şekil 3.5. Farklı Oranlarda Mg Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı; a) %1; b) %2; c) %4

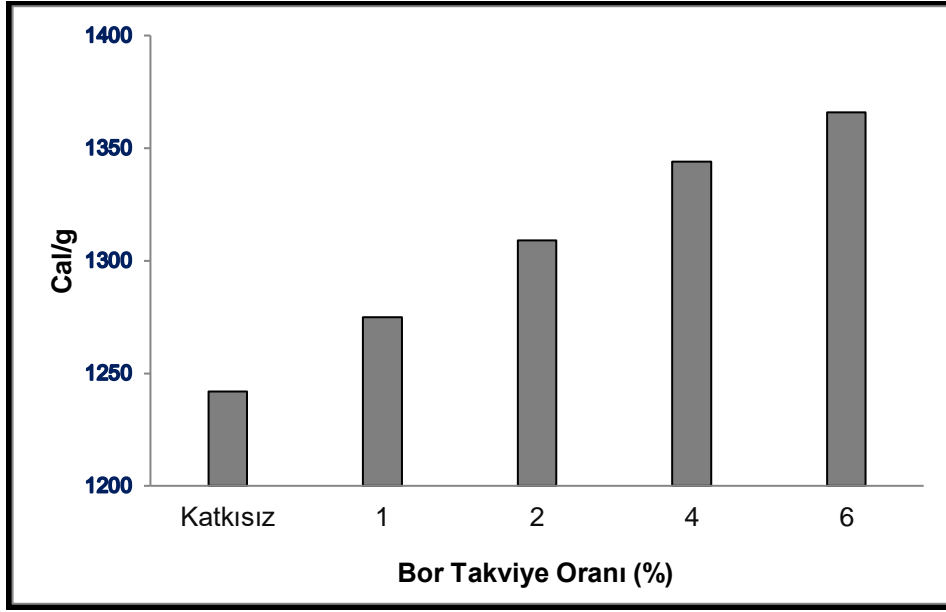
3.4. Bor Takviyeli Barut Örnekleri

Bor takviyeli barut numuneleri Çizelge 2.2'ye göre hazırlanarak, toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi (Çizelge 3.4).

Bor takviyeli barut numunelerinin enerji değerleri, solventli barut ile kıyaslandığında, bor katkısının artması ile birlikte barutun kalorifik enerji değerinin de arttığı belirlendi (Şekil 3.6). Kalorifik enerjisi 13955 cal/g olan bor [47] barut içindeki oranının artmasıyla artan kalorifik enerji değerlerindeki artış, en yüksek bor katkısında (%6) yaklaşık %10 olduğu belirlendi. Elde edilen kalorifik enerji değeri, %6 takviye oranında Mg ve Al ile kıyaslandığında, bor katkılı barutun kalorifik enerjisinin daha yüksek olduğu görüldü. Bor takviyeli barutun kalorifik enerji değerinin daha yüksek olmasının Bor elementinin enerji değerinin diğerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yanma sonu oluşan atık analizi sonuçları değerlendirildiğinde ise, bor katkısının artmasıyla atık miktarının arttığı, en yüksek B katkı oranında atık oranının %1,7 olduğu belirlendi. Ayrıca %0,02 atık miktarına sahip katkısız barut ile kıyaslandığında B katkısı ile yüksek oranda atık oluşturduğu ancak Mg katkılı ve Al katkılı barutların atık miktarları ile kıyaslandığında daha düşük değerlerde atık oluşturmasının B katkısının Mg ve Al'ye kıyasla daha elverişli olabileceği düşünüldü.

B takviyeli barut örneklerinin kararlılıkları, MIL-STD-652D askeri şartnamesinde M8 terkipli çift bazlı sevk barutları verilen en az 40 dk metil vioyele kâğıdının rengini değiştirmeme [41] şartını, sağladığı ve metil vioyele kâğıdının 60 dk sonunda renginin değiştiği belirlendi.

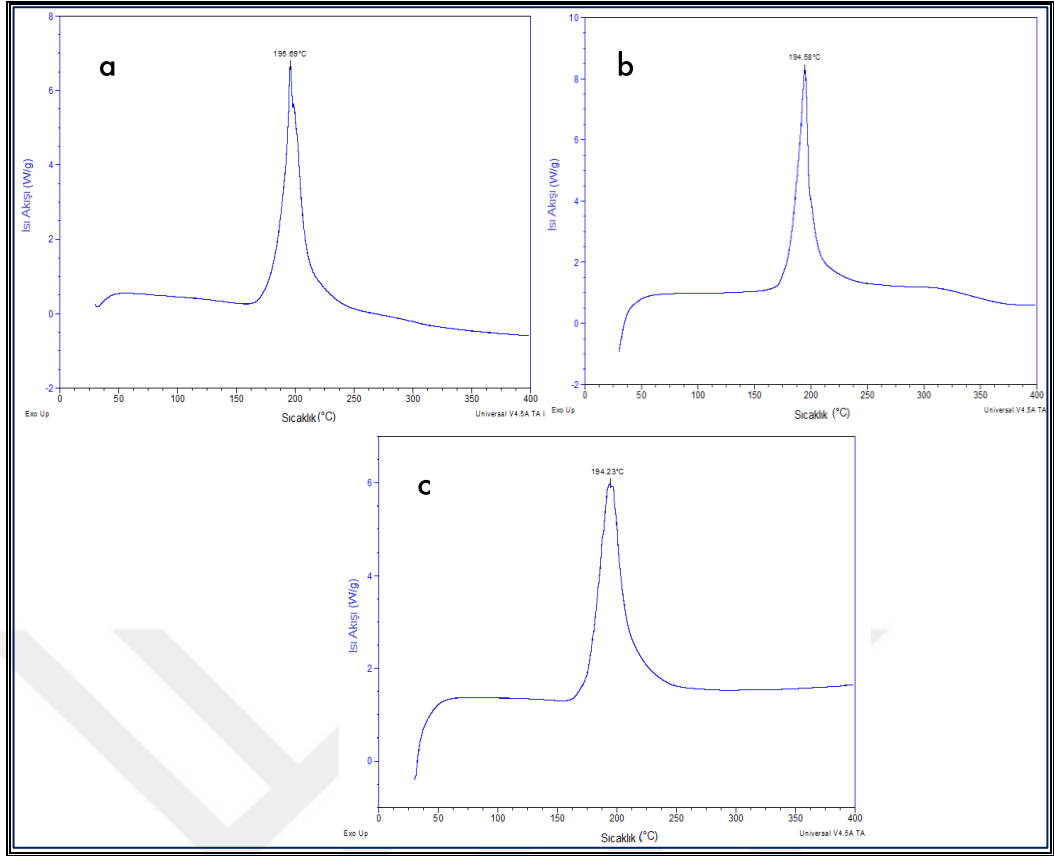


Şekil 3.6. Bor Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi

Çizelge 3.4. Bor Takviyeli Barut Analiz Sonucu

Bor , %	1	2	4	6
Uçuşu Madde, %	0,27	0,20	0,29	0,40
Kararlılık, dakika	60	60	60	60
Kalori, cal/g	1275	1309	1344	1366
Atık, %	-	-	0,99	1,70

Bor takviyeli barut örneklerinin DSC termogramından, tüm barut örneklerinde bozunmaya başlama sıcaklığının yaklaşık 160 °C olduğu ve yaklaşık 195 °C'ye kadar da bozunmanın devam ettiği görüldü (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Farklı oranlarda B Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı; a) %1; b)%2; c) %4

Barutlara bor takviyesi ile bozunma sıcaklıklarının ve kararlılıkları üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmaması, takviye miktarının artması ile barutun kalorifik enerji değerinin de artırması ve ülkemizde dünya bor rezervlerin %73'üne sahip olması [44] gibi özellikleri barutlarda enerjik malzeme olarak kullanılmasında avantaj sağlamaktadır. Ancak, barutun tutuşmasından sonra silah sistemlerinde bıraktığı atık miktarının fazla olması saf borun üretim maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptir.

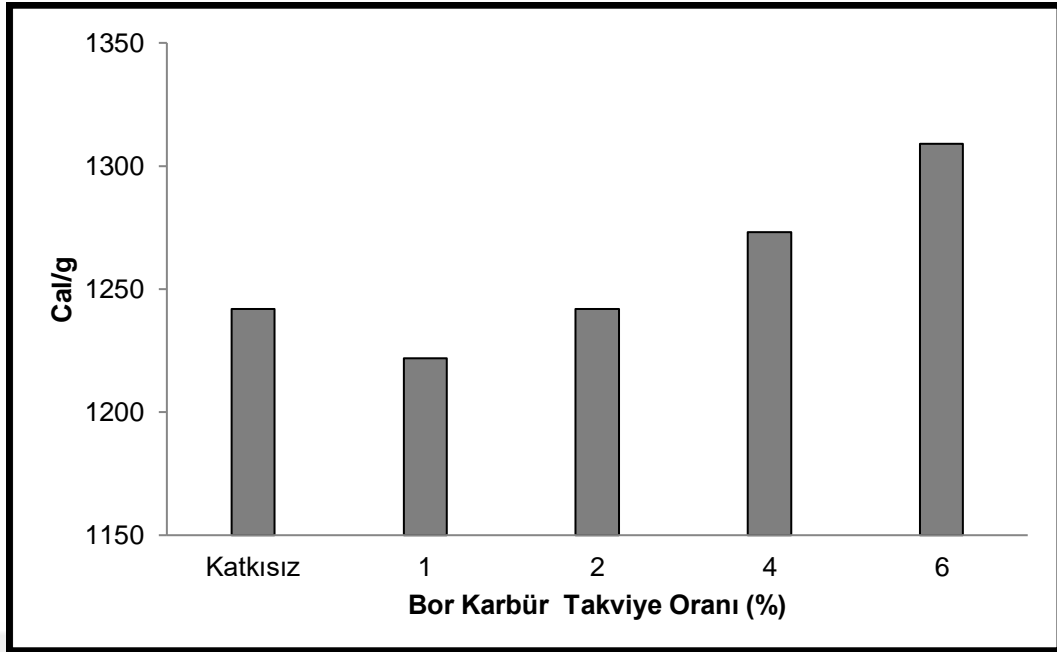
3.5. Bor Karbür Takviyeli Barut Örnekleri

Bor karbür takviyeli barut numuneleri Çizelge 2.2'ye göre hazırlanarak, toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi (Çizelge 3.5).

Bor karbür 11944 cal/g kalorifik enerjiye sahiptir [50]. B₄C katkılı barutun kalorifik enerji değeri, solventli katkısız barut ile kıyaslandığında, bor karbür katkısının artması ile birlikte barutun kalorifik enerji değerinin de arttığı belirlendi (Şekil 3.8). B₄C katkı oranının %1, %2, %4 ve %6 olduğunda, kalorifik enerji değerindeki artışın %1.12, %2.09, %4.34 ve %6.52 olduğu belirlendi (Şekil 3.8). Elde edilen kalorifik enerji değeri, %6 takviye oranında B, Mg ve Al ile kıyaslandığında, bor karbür katkılı barutun kalorifik enerjisinin daha düşük olduğu görüldü. Çift bazlı roket yakıtına B₄C ilave edilerek, enerji değerlerindeki artışın belirlendiği bir çalışmada, %2 B₄C katkısı ile yakıtın kalorifik enerjisinin %2,88 oranında arttığı belirtilmiştir [9].

Yanma sonu oluşan atık miktarı sonuçları değerlendirildiğinde ise Bor Karbür katkısının artmasıyla atık miktarının arttığı, en yüksek B₄C katkı oranında atık oranının %1,94 olduğu belirlendi (Çizelge 3.5). Katkısız baruta göre daha yüksek olan atık oranının, Mg katkılı ve Al katkılı barutların atık miktarları ile kıyaslandığında daha düşük olduğu, dolayısıyla B₄C katkılamanın Mg ve Al'ye kıyasla daha elverişli olabileceği düşünüldü.

Bununla birlikte, B₄C takviyeli barut örneklerinin kararlılıkları incelendiğinde, MIL-STD-652D askeri şartnamesinde M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için verilen en az 40 dk metil vioyele kağıdının rengini değiştirmeme [41] şartını, sağladığı ve metil vioyele kâğıdının 65 dk sonunda renginin değiştiği belirlendi.



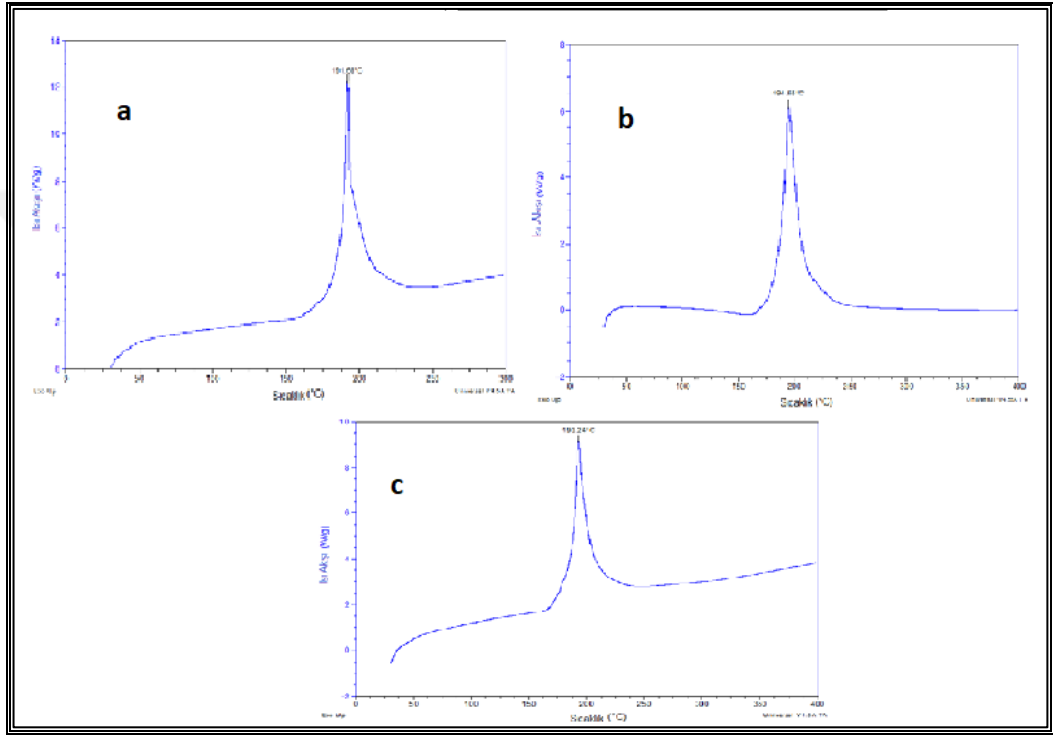
Şekil 3.8. B₄C Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi

Çizelge 3.5. Bor Karbür Takviyeli Barut Analiz Sonucu

Bor Karbür , %	1	2	4	6
Uçuşu Madde, %	0,40	0,39	0,35	0,37
Kararlılık, dakika	65	65	65	65
Kalori, cal/g	1256	1268	1296	1323
Atık, %	-	-	1,49	1,94

B₄C takviyeli barutların DSC termogramlarına bakıldığında, %1 B₄C katkılı barutun bozunması yaklaşık 150 °C'den başlayıp 193,42 °C'ye kadar devam ettiği (Şekil 3.9a), %2 B₄C katkılı barutun bozunmasının yaklaşık 160 °C'den başlayıp 191,01 °C'ye kadar devam ettiği (Şekil 3.9b) ve %4 B₄C katkılı barutun bozunması yaklaşık 160 °C'den başlayıp 190,51 °C'ye kadar devam ettiği görülmektedir (Şekil 3.9c).

Barutlara B_4C takviyesinin bozunma sıcaklığı ve kararlılık açısından olumsuz bir etkiye sebep olmaması, takviye miktarının artması ile barutun kalorifik enerji değerinin de artırması gibi özellikleri barutlarda enerjik malzeme olarak kullanılmasında avantaj sağlamaktadır. Ancak, barutun tutuşmasından sonra silah sistemlerinde bıraktığı atık miktarının fazla olması saf B_4C üretim maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptir.

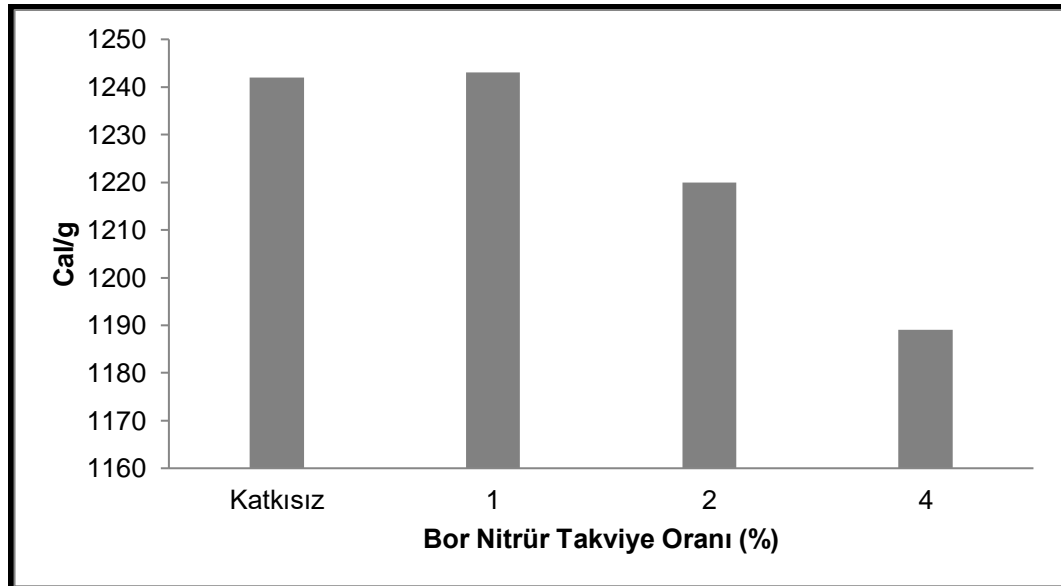


Şekil 3.9. Farklı Oranlarda B_4C Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı; a) %1; b) %2; c) %4

3.6. Bor Nitrür Takviyeli Barut Örnekleri

Bor nitrür takviyeli barut örnekleri Çizelge 2.2'ye göre hazırlanarak toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı belirlendi (Çizelge 3.6).

BN takviye edilerek hazırlanan barut örneklerinin enerji değeri, solventli katkısız barut ile kıyaslandığında BN oranı artıkça enerjiyi düşürdüğü, dolayısıyla enerjik olarak baruta bir katkısı olamayacağı düşünüldü (Şekil 3.10). Bununla birlikte, yanma sonrası bıraktığı atık miktarı, diğer takviye edici ajanlara kıyasla oldukça düşük olması önemli bir avantaj sağladığı düşünülmektedir. Çünkü, BN takviyesi baruta kalorifik enerji değeri açısından katkı sağlamasa da yağlayıcılık özelliğinden dolayı, silah namlusu için aşınma direncini arttıran ve düşük alev sıcaklıkları sağlayabilen [19], diğer katkılı ve katkısız barut numunelerine oranla proses işlemlerinde daha kolay işlem sağladığı tespit edildi. BN katkılı barut numuneleri kararlılık açısından olumsuz bir etkisi olmadığı belirlendi (Çizelge 3.6).



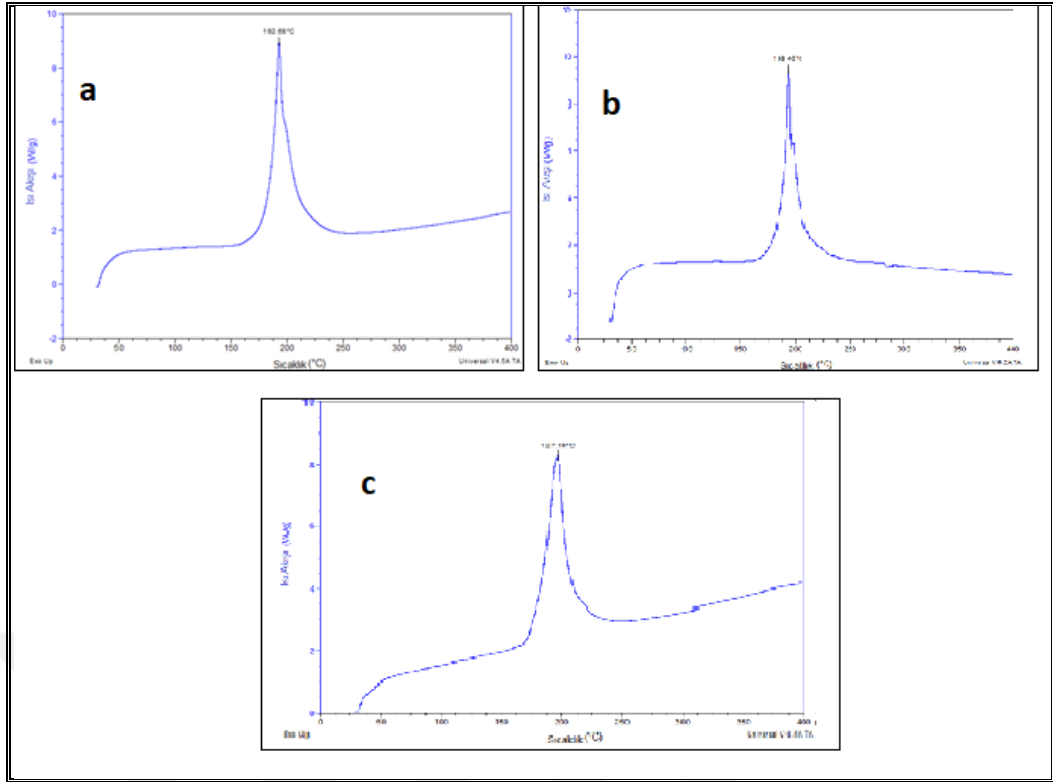
Şekil 3.10. BN Takviyesinin Barutun Kalorifik Enerji Değeri Üzerine Etkisi

Çizelge 3.6. Bor Nitrür Takviyeli Barut Analiz Sonucu

Bor Nitrür , %	1	2	4
Uçuşu Madde, %	0,38	0,39	0,38
Kararlılık, dakika	58	58	58
Kalori, cal/g	1243	1220	1189
Atık, %	0,17	0,29	0,53

Bor nitrür katkılı barutların DSC analizleri incelendiğinde, tüm katkı oranlarında yaklaşık 150 °C'den başlayan bozunma reaksiyonunun, 193 °C'ye kadar devam ettiği gözlemlendi (Şekil 3.11). BN katkılı barut örnekleri B₄C, B, Mg ve Al katkılı barut ile katkısız barutların bozunma sıcaklıklarına yakın olduğu gözlemlendi.

Baruta BN katkısı ile bozunma sıcaklıkları ve kararlılık üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmaması, BN katkısının kütlece %1 olduğu durumda kalorifik enerjide bir değişiklik yapmaması, yağlayıcılık özelliğinden ötürü prosese yardımcı ve silah namlusu için yüksek aşınma direnci ve düşük alev sıcaklıkları sağlamasına yardımcı olması gibi özellikleri barutlarda hammadde olarak kullanılmasının avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, diğer katkı ajanlarına ek olarak, proste kütlece %1 BN katkısının barutun özelliklerindeki değişim incelendi.



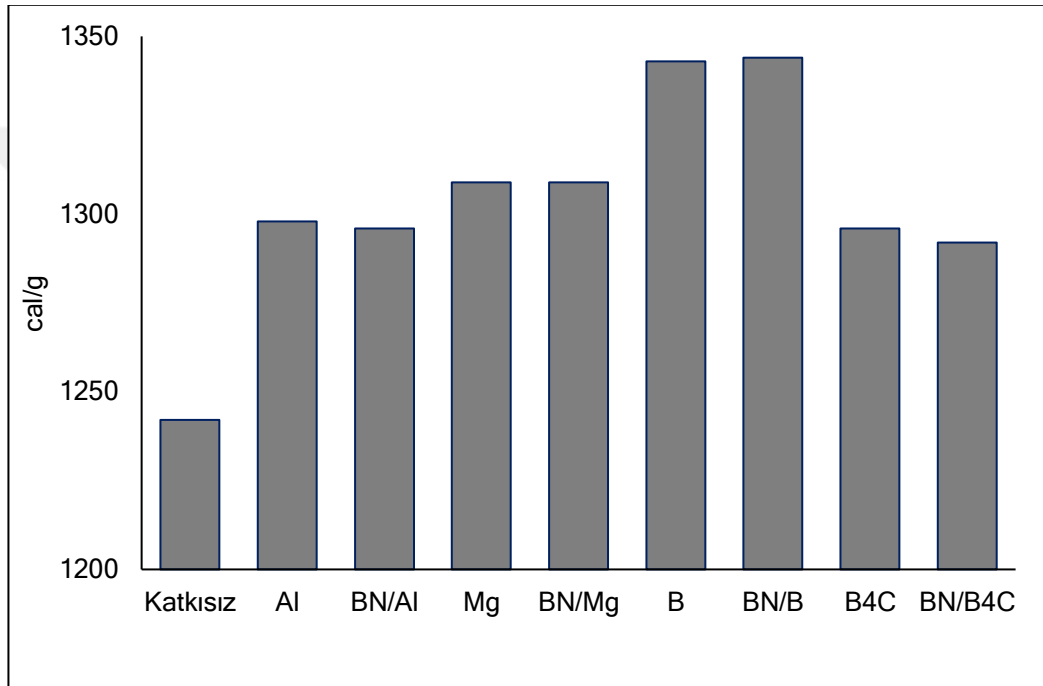
Şekil 3.11. Farklı Oranlarda BN Takviyeli Barut Örneklerinin DSC Termogramı; a) %1; b) %2; c) %4

3.7. Bor Nitrür ve Diğer Takviyeleri Birlikte İçeren Barut Örnekleri

BN yanma sonrası diğer malzemelere oranla daha az atık bırakmasından ve namlu için yüksek aşınma direnci ve düşük alev sıcaklıkları sağlamasından dolayı, kütlece %1 oranında katkılanarak, katkılı barutların enerjik değerlerine etkisi araştırıldı ve hazırlanan barut örneklerine ait toplam uçucu madde miktarı, kalorifik enerji değerleri, kararlılık ve yanma sonunda bıraktığı atık miktarı gibi sonuçlar Çizelge 3.7'de verildi.

%4 takviye malzeme ve %1 BN içeren katkılı barut numunelerinin enerji değeri, katkısız barut ile kıyaslandığında, kalorifik enerjide artış olduğu ve en yüksek kalorifik enerji değerinin % 8.13 oranında BN/B olduğu belirlendi (Şekil 3.12).

%4 takviye malzeme ve %1 BN katkılı barut numuneleri, aynı oranlarda (%4) katkılanan BN ilavesiz barut numuneleri ile kıyaslandı. %1 BN ilavesiyle; Al katlı baruta göre kalorifik enerji artışını %4,51'den %4,35'e, B katkılı baruta göre kalorifik enerji artışını %8,21'den %8,13'e ve B₄C katkılı baruta göre kalorifik enerji artışını %2,50'den %1,93'e azaldığı, Mg katkılı baruta göre kalorifik enerji artışında değişiklik yapmadığı belirlendi. Böylece %1 BN, %4 takviye malzemelerle birlikte barutlara katkılanması ile kalorifik enerjide önemli bir değişim olmadığı belirlendi.



Şekil 3.12. Takviye Malzeme/BN katkısının, Takviyeli Barut ile Karşılaştırılması

BN/Al katkılı barutun yanma sonrası bıraktığı atık %7.03, BN/Mg katkılı barutun yanma sonrası bıraktığı atık %6.59, BN/B katkılı barutun yanma sonrası bıraktığı atık %1 ve BN/B₄C katkılı barutun yanma sonrası bıraktığı atık %1.62 olduğu görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, %1 BN ve %4 takviye malzemelerin atık oranlarının aynı oranlarda katkılanmış barutların atık oranlarına yakın değerlerde gerçekleşti. BN/takviye malzeme barutun 120 °C kararlılıkları katkısız barut kararlılıklar değerleri ile aynı oranlarda (%4) katkılanan BN ilavesiz barut numunelerine yakın değerlere sahip olduğu görüldü.

Çizelge 3.7. Takviye Malzeme/BN Barut Örneklerinin Özellikleri

Parametreler (%)	Al/BN	Mg/BN	B/BN	B ₄ C/BN
Nitrogliserin	41,46	41,46	41,46	41,46
Nitroselüloz	48,84	48,84	48,84	48,84
Potasyum nitrat	1,27	1,27	1,27	1,27
Etil Santralit	0,62	0,62	0,62	0,62
Dietilftalat	2,81	2,81	2,81	2,81
Bor Nitrür	1	1	1	1
Alüminyum	4	-	-	-
Magnezyum	-	4	-	-
Bor	-	-	4	-
Bor Karbür	-	-	-	4
Uçuşu Madde	0,31	0,40	0,35	0,40
Kararlılık, dakika	60	60	60	67
Kalori, cal/g	1296	1309	1343	1292
Atık	7,03	6,59	1	1,62

BN'nin, takviye malzemelerle birlikte barutlara katılanmasının barutların bozunma sıcaklıkları ile kararlılıkları üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmaması, kalorifik enerji değerinde katkısız barutlara oranla artış gösterdiği ve yalnız takviyelerin kullanıldığı barut örneklerine göre önemsenmeyecek düzeyde düşüş göstermesi, BN'nin yağlayıcılık özelliğinden ötürü prosese yardımcı ayrıca silah namlusu için aşınma direncini arttırabilmesi ve düşük alev sıcaklıkları sağlaması gibi özelliklerini de göz önünde tutarak barutlarda takviye malzemelerle birlikte kullanılmasında avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak, barutun tutuşmasından sonra silah sistemlerinde takviye malzemelerinin atık bırakması en önemli dezavantajını oluşturmaktadır. Bu nedenle, B/BN katkılı barutun kalorifik enerjisinin yüksek olması, yanma sonrası düşük atık bırakması ve kararlılıklarının uygun olmasından dolayı büyük çaplı silahlarda kullanılan barutlarda ve roket yakıtlarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, BN/takviye malzemeleri (Al, Mg ve B₄C) özellikle atık miktarlarının yüksek olması sebebi ile roket yakıtı kompozisyonunda yer alabileceği ve bu konu ile ilgili daha ileri çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında M8 terkipli çift bazlı sevk barutu laboratuvar koşullarında farklı takviyeler (Alüminyum, Magnezyum, Bor, Bor Karbür ve Bor Nitrür,) ilave edilerek solvent ile jelâtinleştirilmiştir. Hazırlanmış olan barut numunelerinin; kalorifik enerji değerleri, kararlılık, yanma sonunda bıraktığı atık miktarı ve termal bozunma sıcaklık parametreleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Hamkitlenin hazırlanmasından sonra numunenin preslenmesini zorlaştıran ve homojenliğini etkileyen topaklanmanın olduğu görülmüş bu sorun, hamkitlenin eleme işlemine tabi tutulması ile ortadan kaldırılmıştır.

Takviyeli barut numuneleri; 120 °C kararlılık analizleri MIL-STD-652D askeri şartnamesinde geçen M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için en az 40 dk metil viyole kağıdının renk değiştirmeme şartını [41] sağladığı, DSC ile bozunma sıcaklıklarının katkısız barut numunesi ve literatür ile uyum içinde olduğu görüldü.

Çift bazlı sevk barutuna takviye edilen metal esaslı malzemelerin, bozunma sıcaklıkları ve metil viyole kararlılık sonuçları birbirlerine yakın değerlerde olduğu, dolayısıyla tüm takviye malzemelerinin her oranda kararlılığa olumsuz bir etkisinin söz konusu olmadığı belirlendi.

M8 terkipli çift bazlı sevk barutları için tez çalışmasında kullanılan takviye malzemelerin (BN hariç) kalorifik enerjisi artırdığı ancak yanma sonunda bıraktığı atık miktarının katkısız baruta oranla fazla olması sebebiyle silah sistemleri yerine çift bazlı roket yakıtı formülasyonların da kullanılmasının daha elverişli olabileceği düşünüldü.

Bor nitrür katkılanarak hazırlanan bütün numuneler diğer numunelere oranla daha akışkan yapıda olduğu ve presleme işleminin daha kolay gerçekleştiği görüldü.

BN takviyeli barutun kalorifik enerjii değiştirmemesine rağmen, preslemeye yardımcı olması, silah namlusu için aşınma direnci ve düşük alev sıcaklıkları sağlayabilen iyi bir yağlayıcı olması gibi özelliklerinden dolayı BN katkılı yakıtların kullanımı ile ilgili daha ileri araştırmaların yapılabileceği düşünölmektedir.

Bor nitrür (%1) ve takviye malzemelerin (%4, Bor, Bor Karbür, Alüminyum ve Magnezyum) birlikte kullanılması ile elde edilen barut örneklerinin kalorifik değerlerindeki değişme önemsizmeyecek kadar küçük olması nedeniyle, çalışılan formölasyonlar arasında, BN/B bileşiminin kalorifik enerji değeri ve yanma sonrası atık açısından değerlendirildiğine çift bazlı sevk barutunda kullanılabileceği düşünölmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Kuo, K.K., Acharya, R., Applications of Turbulent and Multiphase Combustion. 61-64. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2012.
- [2] Şahin, E.M., Küresel Barut Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Sentezi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [3] Yıldırım, F., Büyük Kalibre Mühimmatta Kullanılan Barutların Geometrik Şeklinin Değişiminin, Namlu İç Basıncı ve Namlu Çıkış Hızı Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara, 2013.
- [4] Agrawal, J.P., High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. 209-316. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA., Weinheim, 2010.
- [5] Schubert, H., Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 15930-15935. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA., Weinheim, 2005.
- [6] Price, E.W., Fundamentals of Solid Propellant Combustion. In the Combustion of Metallized Propellants. 479-489. Ed: by K.K. Kuo and M. Summerfield. AIAA Inc., New York, USA, 1984.
- [7] Wu, X. and G., Yan, Q. and L., Guo, X., Qi, X. and F., Li, X. and J., Wang, K. and Q., Combustion Efficiency and Pyrochemical Properties of Micron-Sized Metal Particles as the Components of Modified Double-Base Propellant. Acta Astronautica. Vol. 68 (7-8): 1098-1112, 2011.
- [8] Yaşar, H., Yıldız Kesitli Katı Yakıcı–Yakıtlı Bir Roket Motorunun Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1992.

[9] Yaman, H., Yüksek Enerjili Maddelerin Çift Bazlı (DB) Roket Yakıtlarında Kullanımı ve Performans Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2013.

[10] Anonim, Alüminyum, <https://www.diyadinnet.com/bilgi-1318-aluminyum> (Erişim Tarihi: 08.07.2019)

[11] Sullivan, K., Young, G., Zachariah., Enhanced Reactivity of Nano-B/Al/CuO MIC's. Combustion and Flame, Vol. 156: 302-309, 2009.

[12] Meyer, R., Kohler, J., Homburg, A., Explosives. 9-10. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., Germany, 2015.

[13] Erdem, A., Magnezyum-Kalay Esaslı Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Ekstrüzyon Sonrası Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük, 2019.

[14] Kıpçak, S.A., Çeşitli Magnezyum ve Bor Kaynaklarından Farklı Yöntemler ile Yapay Magnezyum Borat Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.

[15] Koch, E. and C., Klapötke, M.T., Boron-Based High Explosives. Propellants Explos. Pyrotech. 335-336. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.

[16] Mallı, O., Bor Nedir ve Borun Özellikleri, <https://www.muhendisbeyinler.net/bor-nedir-ve-borun-ozellikleri/> (Erişim Tarihi: 26.06.2019)

[17] Anonim, Bor Elementi, <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-elementi/23> (Erişim Tarihi: 26.06.2019)

- [18] Erdem, E., Öztürk, S., Bor'un Roket Yakıtlarında Kullanımı. Savunma Sanayiinde Bor Kullanımı Çalıştayı.14 Haziran, Ankara, 2011.
- [19] Akman, Ş., Bor Karbür (B₄C) Nedir –Bor Karbür Hakkında Bilgi, <https://www.enerjiportali.com/bor-karbur-b4c-nedir-bor-karbur-hakkinda-bilgi/> (Erişim Tarihi: 10.07.2019)
- [20] Bertuğ, B., Addemir, O., Hegzagonal Bor Nitrür Seramik Tozlarının Temel Endüstriyel Üretim Yöntemleri, https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi136/d136_5458.pdf (Erişim Tarihi: 10.07.2019)
- [21] Emrulloğlu, F.Ö., Emrulloğlu, B.C., Bor Nitrür Üretimi. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/914ecef9c12ffdb_ek.pdf (Erişim Tarihi: 10.07.2019)
- [22] Manning, T., Field , R., Klingaman, K., Fair, M., Bolognini, J., Crownover, R., Adam , P.C., Panchal, V., Rozumov, E., Grau, H., Matter, P., Beachy, M., Holt, C., Sopok, S., Innovative Boron Nitride-Doped Propellants. Defence Technology. Vol. 12: 69–80, 2016.
- [23] Anonymous, Propellant Management Guide. U.S. Army Defense Ammunition Center Logistics Review and Technical Assistance Office. 42-44, 1998.
- [24] Venugopalan S., Demystifying Explosives: Concepts in High Energy Materials. 120-121. Elsevier Inc., Amsterdam, 2015.
- [25] Kubato, N., Propellant And Explosives. 32-33. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA., Germany, 2002.
- [26] Farrar, L.C., Leeming W.D., Basic Military Ballistics, Battlefield Weapons Systems & Technology. 25-26. Ed: by Colonel R. G. L. OBE. Royal Military College of Science, Shrivenham, UK, 1983.

[27] Pun, K.M., Gallusser, A., Macroscopic Observation of the Morphological Characteristics of the Ammunition Gunpowder. Forensic Science International. Vol. 5279, 1-7, 2007.

[28] Krier H., Summerfield, M., Interior Ballistics of Guns. 20-21. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1979.

[29] Öztürk R.A., İç Balistik. MKE, Ankara, 1981.

[30] Gezer, A.H., Barut Tane Geometrisinin Silah İç Balistiğine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2016.

[31] Weinheimer, R., Properties of Selected High Explosives. 27th International Pyrotechnics Seminar, 16-21 Temmuz 2000 tarihlerinde Grand Junction, Page: 8, 2002.

[32] Fidanovski B., Dimic, M., Milojkovic, A., Rodic, V., Determination of Chemical Stability of Propellants Using the Vacuum Stability Test Method. Scientific Technical Review, Vol. 66 (1): 18-19, 2016.

[33] Klerk P.W., Thermal Analysis of Some Propellants and Explosives With DSC and TG/DTA. Defense Technical Information Center, DTIC ADA320678, 1996.

[34] Özkar, S., Pekel, F., Tüzün, N.F., Energetic Materials: Technology, Manufacturing and Processing. In the Effect of Aluminum Content and Particle Size on the Ballistic and Mechanical Properties of HTPB Based Composite Solid Propellants. Ch. 48. Ed: by Thomas K. 27th International Annual Conference of ICT, Germany, 1996.

[35] Akçil, M., Alüminyum İlavesinin Çift Esaslı Roket Katı Yakıt Performansına Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.

- [36] Luman, J.R., Wehrman, B., Kuo, K.K., Yetter, R.A., Masoud, N.M., Manning, T.G., Harris, L.E., Bruck, H.A., Development and Characterization of High Performance Solid Propellants Containing Nano-Sized Energetic Ingredients. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. 31 (2): 2089–2096, 2007.
- [37] Galfetti, L., Deluca, L.T., Severini, F., Colombo, G., Meda, L., Marra, G., Pre and Post-Burning Analysis of Nano-Aluminized Solid Rocket Propellants. *Aerospace Science and Technology*. Vol. 11 (1): 26–32, 2007.
- [38] Liang, D., Xiao, R., Li, H., Liu, J., Heterogeneous Decomposition and Oxidation During Combustion of Magnesium Diboride Particles. *Acta Astronautica*. Vol. 153: 159-165, 2018.
- [39] Stankovic, M., Filipovic, M., Kapor, V., Thermal Analysis in Propellant Stability Examinations. *Journal of Thermal Analysis*. vol. 52: 439-445, 1998.
- [40] Rocco, J.A.F., Lima, J.E.S., Frutuoso, A.G., Iha, K., Ionashiro, M., Matos, J.R., Suarez-Iha, M.E.V., Thermal Degradation of a Composite Solid Propellant Examined by DSC. Kinetic study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol.75: 551-557, 2004.
- [41] MIL-STD-652D (AR), Military Standard: Propellants, Solid For Cannons Requirements and packing. 1978.
- [42] MIL-STD-286C, W/CHANGE 2, Military Standard: Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing. 2010.
- [43] Dönmez, E.C., Kompozit Esaslı Katı Roket Yakıt Numunesinin Karakteristik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2018.

[44] Smith, S.D., Interior Ballistics of Guns. Headquarters United States Army Materiel Command. USA, 1965.

[45] Musanic, M.S., Houra, F.I., Suceasca, M., Applicability of Non-Isothermal DSC and Ozawa Method for Studying Kinetics of Double Base Propellant Decomposition. Central European Journal of Energetic Materials. Vol. 7 (3): 233-251, 2010.

[46] Pourmortazavi, M.S., Mirzajani, V., Farhadi, K., Thermal Behavior and Thermo Kinetic of Double-Base Propellant Catalyzed With Magnesium Oxide Nanoparticles. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol.137: 97-104, 2019.

[47] Bin, C., Xiang, H., Chao, J., Yongqi, W., Aijun, H., Mingquan, Y., Gong, L., Gongfu P., Nano Nickel Oxide Coated Modified Boron Fuel and Preparation Methods Thereof

<https://patents.google.com/patent/CN103333034A/en>

(Erişim Tarihi: 12. 10. 2019)

[48] Davenas, A., Solid Rocket Propulsion Technology. 408-409. Techology and Research Director, SNPE, France, 1993.

[49] Anonim, Türkiye'nin Yükselen Değeri: Bor,

<http://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> (Erişim Tarihi: 25.09.2019)

[50] Anonim, The Basics of Combustion,

<https://archive.cnx.org/contents/cf22e1e948574bef91cf60f13cf26033@2/the-basics-of-combustion> (Erişim Tarihi: 12.10.2019)