

## Alüminyum İlavesinin Çift Esaslı Roket Yakıtlarına Etkilerinin İncelenmesi

Mustafa AKÇİL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

\*(makcil@subu.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi

(Geliş Tarihi: 18 Haziran 2024, Kabul Tarihi: 27 Haziran 2024)

(3rd International Conference on Frontiers in Academic Research ICFAR 2024, June 15-16, 2024)

**ATIF/REFERENCE:** Akçil, M. (2024). Alüminyum İlavesinin Çift Esaslı Roket Yakıtlarına Etkilerinin İncelenmesi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(5), 238-250.

**Özet** – Bu çalışmada, polimer matrisli çift esaslı bir katı yakıt karışımına farklı oranlarda düzlemsel (flake) (%0,2-1,4) ve küresel tip (%1-12) alüminyum tozu eklenerek katı yakıt özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Alüminyum tozları, haddeleme işleminden önce karışıma eklenmiş, haddeleme sonucunda 2 mm kalınlığında levhalar üretilmiş ve deney numuneleri bu levhalardan alınmıştır. Farklı oranlarda alüminyum tozu içeren karışımların yanma hızı, yanma ısısı, mekanik özellikleri, ağırlık kaybı, sertlik ve yoğunluklarındaki değişimler incelenmiştir. Hem flake hem de küresel tip alüminyum tozu ilavesiyle çift esaslı katı yakıt karışımlarının lineer yanma hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Metalik katkıları içeren karışımlarda mevcut oksijen miktarı tüm elementlerin yanması için yeterli değildir, ancak yanma odası basıncı arttıkça lineer yanma hızı artar. Metalik katkıların tane inceliği ve oranı arttıkça lineer yanma hızı da artmaktadır. Oksitleyici tane boyutu küçüldükçe ve oksitleyici oranı arttıkça lineer yanma hızı artar. Flake ve küresel tip alüminyum tozu miktarı arttıkça yanma ısıları da artar. %12 küresel tip alüminyum tozu içeren karışımın yanma ısısı %50 oranında artmıştır. Yanma ısısının artmasıyla yanma odası sıcaklığı ve lineer yanma hızı artar. Flake yerine küresel tip tozların kullanımı, yanma ısısı açısından daha uygundur. Yanma ısısının artması, yanma ürünlerinin sıcaklığını ve basıncını artırarak itme kuvvetini yükseltir. Elde edilen sonuçlar, metalik toz ilavesi olmayan çift esaslı yakıt karışımı ve bazı kompozit yakıt karışımları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** – Roket yakıtı, Alüminyum, Polimer, Yanma, Isı

### I. GİRİŞ

13. yüzyıldan itibaren kara baruttan yapılan katı yakıtlar, donanma toplarında ve yivli silahlarda kullanılmıştır. Bu yakıtlar, roketlerin ilk uygulamalarında başarıyla kullanılmış ve katı yakıtların ilk örneklerini oluşturmuştur. 20. yüzyılın başlarında bilim insanları uzaya ulaşmayı hedefleyerek sıvı yakıt karışımlarına yönelmiştir. 1970'lere kadar katı yakıtlar, askeri silahlar ve uçaklarda itme uygulamaları için kullanılmıştır. II. Dünya Savaşı sonrası katı yakıt teknolojisi gelişmiş, değer kazanmış ve son zamanlarda uzay çalışmalarında sıvı yakıtların yerini almaya başlamıştır; ABD'nin kıtalararası balistik güdümlü roketleri bu teknolojinin en iyi örneklerindedir [1].

Roket motorlarında, yüksek ısı verimliliği sağlanması ve yakıtın yanmasından elde edilen ısı enerjisinin maksimum oranda kinetik enerjiye dönüştürülmesi hedeflenir. Roketin itme kuvveti, yanma odasındaki

sıcaklık ve basıncın etkisiyle oluşur [2]. Katı yakıt seçiminde balistik performans, mekanik özellikler, depolama kararlılığı, egzoz ürünleri ve maliyet gibi faktörler dikkate alınır. Son çalışmalar, dumanı azaltan, yüksek performans sağlayan ve başlangıç sıcaklığına bağımlılığı azaltan metal esaslı katkı maddeleri üzerinde yoğunlaşmaktadır [3].

Yakıtların yanması sonucu oluşan gazların roket nozulundan yüksek hızla çıkışı, itme kuvveti oluşturur. Yakıt bileşimlerine, yanma davranışlarını düzenlemek ve toplam itme kuvvetini artırmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Teorik çalışmalarla, kullanılacak yere uygun yakıt türü ve miktarı belirlenebilir. Roket yakıtları, kimyasal bileşimlerine göre tek esaslı, çift esaslı ve kompozit yakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bazen bu sınıflandırma, homojen ve heterojen karışımlar olarak da yapılmaktadır. Yakıt üretim miktarları birkaç kilogramdan birkaç tona kadar değişebilmektedir [4].

Yakıtların oksijensiz ortamda yanabilmeleri için bünyelerinde gerekli oksitleyici katkılar bulunmaktadır. Sıvı yakıtlı sistemlerde oksijen tankları bulunurken, katı yakıtlı sistemlerde hem yanıcı hem de oksijen verici elemanlar (oksitleyici) yakıt bileşiminde yer alır. Katı yakıtlı roketlerde yakıt, yanma odasında bulunduğu için yanma odasının boyutları sıvı yakıtlı roketlere göre daha büyüktür. Yanma olayını başlatmak amacıyla yanma odasının merkezi boşluğuna ateşleyici bir sistem yerleştirilmiştir [5].

Bu çalışmada, polimer matrisli çift esaslı bir katı yakıt karışımına değişen oranlarda düzlemsel şekilli (flake) ve küresel tip alüminyum tozu ilave edilerek katı yakıt özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Flake tipi tozlar için %0,2-1,4, küresel tip tozlar için %1-12 oranlarında alüminyum ilavesi yapılmıştır. Alüminyum tozları, haddeleme işleminden önce karışıma eklenmiştir. Haddeleme işlemi sonucunda 2 mm kalınlığında levhalar üretilmiş ve deney numuneleri bu levhalardan alınmıştır. Farklı oranlarda alüminyum tozu içeren karışımların yanma hızı, yanma ısısı, mekanik özellikleri, ağırlık kaybı, sertlik ve yoğunluklarındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, metalik toz ilavesi olmayan çift esaslı yakıt karışımı değerleri ve bazı kompozit yakıt karışımları ile karşılaştırılmıştır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

NG+NC katı yakıt karışımlarına değişik oranlarda metalik Al tozu ilave edilerek çeşitli deneyler yapılmıştır. Deneyler MIL-STD-286 B' ye göre yapılmıştır. Bu deneyler, lineer yanma hızı, yanma ısısı, çekme deneyi, sertlik ölçme, ağırlık kaybı ve yoğunluk deneyleridir. Lineer yanma hızı deneyi ile hem yakıtın toplam yanma süresi hem de istenilen itme kuvvetini elde etmek için gerekli yakıt miktarı belirlenir. Yanma ısısı deneyi ile yanma sonucu açığa çıkan enerji hesaplanır. Yanma ısısı, yanma odası içindeki reaksiyonlar ve açığa çıkan yanma gazlarının kinetik enerjilerini de etkiler. Mekanik özellikler, çekme gerilmeleri, uzama oranları ve sertlik deneyleriyle belirlenir. Ağırlık kaybı ile depolama esnasında, yakıt büyesinden uzaklaşan uçucuların miktarı bulunur. Yoğunluk, yanma odasına yüklenecek yakıt miktarının bulunmasında önemli bir özelliktir.

### A. Alüminyum Tozu İhtiva Eden Karışımların Hazırlanması

Alüminyum tozu ilave edilmeden önce katı yakıt bileşenleri NG, NC, DEP, 2NDPA, kurşun dietil hegzaat ve kandilavaks sulu ortamda karıştırılmıştır. Karıştırmanın sulu ortamda yapılması, sürtünmeler sebebiyle ısınmalardan dolayı meydana gelebilecek patlama riskini azaltmaktadır. Bundan sonra karışımın nemi santrifüj işlemiyle %25-30 oranlarına kadar düşürülmüştür. Bu sırada karışımda istenmeyen topaklanma meydana geldiğinden bir öğütme işlemi uygulanmıştır. Hem polimerleşmenin tamamlanması hem de nemin %10-12 oranlarına düşmesi için karışım, 40 °C' de %60 bağıl nem ortamında 7 gün süreyle bekletilmiştir. Bundan sonra karışıma yanma hızını arttırıcı bir bileşik olan kurşun salisilat ilave edilmiştir. Kurşun salisilatın suda çözünmesi sebebiyle bu safhada ilave edilmesi uygundur. Bekleme süresince, homojen polimerleşmenin meydana gelebilmesi amacıyla, NG molekülleri

arasında diğer moleküllerin yayınabilmesine izin verilmiştir. Bu karışıma, değişik oranlarda flake ve küresel tip alüminyum tozu ilave edilerek yeniden karıştırılmıştır. İlave edilen flake tipi alüminyum tozunun miktarı %0,2 ila %1,4 arasında değişmektedir. Küresel tip alüminyum tozu ise %1 ila %12 arasında değişen oranlarda ilave edilmişlerdir. Alüminyum tozu ihtiva eden karışımlar 5 kg'lık numuneler halinde hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların kimyasal bileşimi Tablo 1.' de verilmiştir. Kullanılan alüminyum tozları ~ 20 µm tane boyutunda ve %99 + saflıktadır. Bundan sonra, alüminyum tozu ilave edilen karışımlar önce, farklı hızda dönen ve sıcaklığı 105 °C olan merdaneler arasından geçirilerek haddelenmiştir. Daha sonra eşit hızda dönen merdaneler yardımıyla haddelenerek 2 mm kalınlığında levhalar üretilmiştir. Eşit hızda dönen merdanelerin sıcaklığı 75 °C' dir. Sıcak haddeleme işlemiyle, hem karışımın nem oranı %0,5- %0,6' ya kadar azalmış, hem de polimerleşmenin tamamlanması sağlanmıştır. Kurşun salisilat ve metalik alüminyum tozu ilavesi, katı yakıt karışımının sürtünme duyarlılığını arttıran bileşenlerdir. Bunun için haddeleme işlemi yapılmadan önce karışımın nem oranı en az %10 olmalıdır. Nem miktarı %10' dan düşük olması haddeleme sırasında ısınma ve yanmaya sebep olurken; fazla olması ise yakıtın şekillendirilmesini güçleştirir. Yakıt bileşenlerinin, karışımın hazırlanması esnasında birbirleriyle kimyasal reaksiyona girmemeleri gerekir. Tablo 1.' de hazırlanan katı yakıt karışımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum tozu ihtiva eden katı yakıt karışımının kimyasal bileşimi

Malzemeler	Oran (%)
Nitroselülöz (NC)	49,4
Nitrogliserin (NG)	35,2
Dietilflalat (DEP)	10,5
Dinitrodifenilamin (2NDPA)	2,0
Kurşunsalisilat	1,3
Kurşundietilhegzaat	1,4
Kandilavaks	0,2
Toplam Uçucu Miktarı	En çok 0,6
Alüminyum (Al)	0,2-12

### B. Lineer Yanma Hızının Ölçülmesi

Katı yakıtlarda lineer yanma hızı, birim zaman içerisinde tüketilen yakıt miktarının bir ölçüsüdür. Deneysel numunelerinin hazırlanması ve lineer yanma hızının ölçülmesi MIL-STD-286 B, Metod-T 803-1' e göre yapılmıştır. Haddeleme işlemiyle şekillendirilen yakıt karışımı levhalardan 27,94 cm (11") boyda, 10,16 cm (4") genişlikte şeritler kesilmiştir. Bu şeritlerden 0,2x0,3x20 cm boyutlarında ince çubuk şeklinde numuneler alınmıştır. Numunelerin yüzeyi, polivinilklorür asetatla kaplanmıştır. Bu numunelerin PVCA ile kaplanması, yanmanın sadece belirli bir yüzey boyunca ilerlemesini sağlamak içindir. Kaplanan numuneler 40 °C sıcaklıkta, 24 saat bir etüv içerisinde bekletilmiştir. Böylece numunelerin polimerleşmesi tamamlanmış olmaktadır. Deneysel ~ 983 cm<sup>3</sup> (60 inch<sup>3</sup>) hacimde, 350 atm. basınca dayanıklı, paslanmaz çelik, Strand-Burner yanma hızı ölçme cihazında, %99,9 saflıkta azot ortamında yapılmıştır. Deneysel yapıldığı yanma odası sıcaklığı 21-27 °C, nemi %21-55 arasındadır. Ölçme yapılmadan önce cihaz kalibre edilmiştir. Numunelerin tutuşturulması Cr-Ni alaşımı tellerle, elektriksel bir devre yardımıyla yapılmıştır. Numunelerin ortasına gelecek şekilde bir delik açılarak yanma süresi iki kademe ölçülmüştür. Önce numunenin yarısına kadar geçen yanma süresi, daha sonra numunenin tamamı yanıncaya kadar geçen süre kaydedilmiştir. Herbir karışım için üçer adet yanma hızı numunesi kullanılmıştır. Daha sonra numune uzunlukları, yanma süresine oranlanarak o numuneye ait yanma hızı hesaplanmıştır. Aynı karışıma ait numunelerin yanma hızı ortalamaları alınarak ortalama yanma hızları bulunmuştur. Lineer yanma hızlarının ölçülmesi hem flake tipi hem de küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden numunelerle ayrı ayrı yapılmıştır. Lineer yanma hızı değerleri her numune için hem yarısına hem de tamamı yanıncaya kadar geçen süreler ölçülerek o numunenin ortalama yanma hızı hesaplanmıştır. Her yakıt karışımı için en az üçer adet yanma hızı numunesinin ortalamaları alınarak o karışımın ortalama lineer yanma hızı değerleri bulunmuştur. Hesaplamalar (1) ve (2) denklemleri ile yapılmıştır.

$$\frac{2.t_1 + t_2}{2} = t_{ort} \quad (1)$$

$$r = \frac{l}{t_{ort}} \quad (2)$$

- $t_1$  : Numunenin yarısı yanıncaya kadar geçen süre (s)  
 $t_2$  : Numunenin tamamı yanıncaya kadar geçen süre (s)  
 $t_{ort}$  : Numunenin ortalama yanma süresi (s)  
 $l$  : Numunenin uzunluğu (mm)  
 $r$  : Lineer yanma hızı (mm/s)

### C. Yanma Isısının Ölçülmesi

Katı yakıtların yanma ısıları, onların enerji kapasitelerini ifade eder. Katı yakıtlarda yanma ısısı adyabatik kalorimetre cihazı ile ölçülür. Deney sırasında katı yakıtın toplam kalorifik değeri tayin edilir. Yanma ısısı MIL-STD 286 B, Metod-T 802-1' e göre ölçülmüştür. Deney en çok %0,01 oksijenli azot gazı ortamında yapılmıştır. Hazırlanan yanma ısısı numuneleri 5 gr ağırlıktadır. Bu numuneler 10 cm uzunluktaki ateşleme teli ile birlikte kalorimetre cihazına bağlanmıştır. Cihazın içerisindeki oksijen 30 atm'lik yüksek basınçta azot gazı gönderilerek boşaltılmıştır. Sistemin dengeye gelmesi için ~ 12-13 dakika beklenerek kalorimetrenin iç sıcaklığı ( $T_1$ ), soğutma suyunun debisi, soğutma suyunun sıcaklığı ve azot gazı basıncı kaydedilmiştir. Daha sonra ateşleme yapılarak numuneler tutuşturulmuştur. %0,01 °C hassasiyetle birer dakika aralıklarla sıcaklık artışları ölçülmüştür. Yeniden sistem dengeye gelinceye kadar ~ 12-13 dakika süreyle ölçmeye devam edilerek 13. dakikadaki en yüksek sıcaklık ( $T_2$ ) kaydedilmiştir. Ayrıca numunelerle birlikte telin ısı etkisinde kalan ve kalmayan kısımlarının uzunluğu ölçülmüştür. Telin ısı etkisinde kalan kısmının kalorifik değeri ( $L$ ) hesaplanmıştır. Cihazın kapağı açılarak içerisi damıtık su ile yıkanmıştır. Bu çözelti nitrik asit ile titrasyona tabi tutularak sarf edilen asit miktarı kaydedilmiştir. Daha sonra her numunenin yanma ısıları (3) denklemi yardımıyla hesaplanmıştır.

$$H = \frac{\bar{C}(T_2 - T_1) - Q_{AC} - L}{m} \quad (3)$$

$H$  : Yanma ısısı (cal/g)

$\bar{C}$  : Suyun kalorifik eşdeğeri (cal)

$T_2$ : 13. dakikanın sonunda kaydedilen en yüksek sıcaklık (°C)

$T_1$ : Denge halinde iç ceketin başlangıç sıcaklığı (°C)

$Q_{AC}$ : Titrasyon sırasında sarfedilen nitrik asitin kalorifik eşdeğeri (cal)

$L$ : Tutuşturma telinin kalorifik eşdeğeri (cal)

$m$ : Yanma ısısı numune ağırlığı (g)

İç ceketin 25 °C' deki damıtık su ile doldurulduktan sonra deney süresince toplam ağırlığı 2,5 kg olmalıdır. Bu miktar suyun kalorifik eşdeğeri için gereklidir. Yanma ısılarının bulunması için her karışımdan beşer adet numune alınmıştır. Daha sonra her karışımın ortalama yanma ısıları bulunmuştur.

#### D. Çekme Deneylerinin Yapılışı

Çekme deneyi MIL-STD-286 B' ye göre yapılmıştır. Haddelenerek şekillendirilen alüminyum tozu ilaveli NC ve NG karışımı levhalardan 10,16x27,94x0,2 cm' lik şeritler kesilmiştir. Bu şeritlerden 8x3,5x0,2 cm boyutlarında çekme numuneleri alınmıştır. Levhalar haddelene ile şekillendirildiği için yakıt karışımının özellikleri haddelene yönüne bağlı olarak değişmektedir. Her karışım için hem haddelene yönüne paralel hem de haddelene yönüne dik olarak altı adet numune hazırlanmıştır. Her bir karışım için alınan numuneler çekilmeden önce 25 °C' de, 24 saat süre ile bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda, üretim esnasında meydana gelen iç gerilmelerin giderilmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan numuneler en yüksek 1000 N (~ 102 kg) kapasiteli bir cihazda çekilmişlerdir. Çekme deneyi ile hem numunelere uygulanan kuvvet değerleri hem de uzama miktarları bulunmuştur. Haddelene yönüne paralel olarak alınan numunelerin çekme gerilmeleri aşağıda verilen (4) denklemiyle hesaplanmıştır.

$$T_{sp} = \frac{F}{9,81.w.e} \quad (4)$$

$T_{sp}$ : Haddelene yönüne paralel alınan numunelerin çekme gerilmesi (kg/cm<sup>2</sup>)

F: Çekme kuvveti (N)

w: Numunenin genişliği (cm)

e: Numunenin kalınlığı (cm)

Aynı şekilde haddelene yönüne dik alınan numunelerin çekme gerilmeleri (5) denklemiyle hesaplanmıştır.

$$T_{sw} = \frac{F}{9,81.w.e} \quad (5)$$

$T_{sw}$ : Haddelene yönüne dik alınan numunelerin çekme gerilmesi (kg/cm<sup>2</sup>)

Deney numunelerinin ilk ölçü uzunluğu ( $L_0$ ) ayrı ayrı deney öncesi ölçülerek kaydedilmiştir. Çekme deneyinde numuneler, uygulanan kuvvetin etkisiyle boyca uzamıştır. Çekme işlemi sonunda kopan numunelerin her birinin son uzunlukları ölçülerek ( $L_i$ ) kaydedilmiştir. Buradan (6) formülüne göre hem haddelene yönüne paralel hem de dik alınan numunelerin uzama miktarları hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Uzama} = \frac{L_i - L_0}{L_0} .100 = \frac{\Delta L}{L_0} .100 \quad (6)$$

$L_0$ : Numunelerin ilk ölçüm uzunluğu (cm)

$L_i$ : Numunelerin kopma sonundaki uzunluğu (cm)

$\Delta L$ : İlk ve son uzunluklar arasındaki fark

Çekme gerilmesiyle birlikte numunelerin uzama miktarları da beraber hesaplanmıştır. Gerek haddelene yönüne paralel gerekse dik alınan numunelerin uzama miktarlarının aritmetik ortalaması hesaplanarak her bir karışım için ortalama uzama değerleri bulunmuştur. Deneyler küresel tip alüminyum tozu ilave edilen numunelerle yapılmıştır.

#### E. Ağırlık Kaybının Ölçülmesi

Numune hazırlama işlemleri esnasında ilk karışım sulu ortamda yapılmıştır. Daha sonra santrifüj ve kurutma işlemleriyle nem oranı %10-12 değerlerine, sıcak haddelene yapılarak %0,5-0,6 mertebelerine

indirilmiştir. Bundan sonra meydana gelebilecek ağırlık kaybının bulunması için numunelere bu deney uygulanmıştır. Deney MIL-STD-286 B, Metod-404-1' e göre yapılmıştır. Numuneler 2,5 gr ağırlığında ve 5 adet olarak hazırlanmıştır. Her numune bir tüp içerisine yerleştirilerek, 8 saat ile 72 saat arasında değişen sürelerde bekletilmiştir. Boş tüpün, tüp+numune, daha sonra 8, 24, 32, 48, 56 ve 72. saat sonundaki tüp+numune ağırlıkları tartılmıştır. Bundan sonra (7) denklemiyle meydana gelen kayıp miktarı hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Ağırlık Kaybı} = \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_0} \cdot 100 \quad (7)$$

$x_1$ : Numunenin 8. saat sonraki ağırlığı (gr)

$x_2$ : Numunenin 72. saat sonraki ağırlığı (gr)

$x_0$ : Boş tüpün ağırlığı (gr)

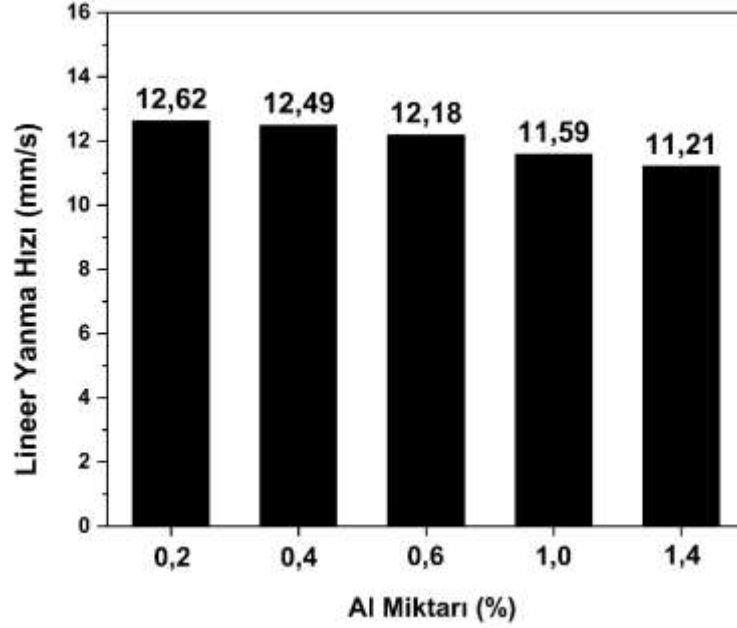
Aynı bileşime sahip karışım için iki adet numune alınarak ortalama ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Yüksek oranda küresel alüminyum tozu ihtiva eden karışımlarda meydana gelebilecek değişimler araştırılmıştır. Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımlar için iki, küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımlar için üç farklı bileşim seçilmiştir.

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

NG+NC karışımı çift esaslı katı yakıtlara MIL-STD-286-B' ye göre deneyler uygulanmış; bulunan sonuçlar alt bölümler halinde verilmiştir. Deneyler için iki ayrı alüminyum tozu kullanıldığından flake ve küresel tip toz ihtiva eden numunelerle yapılan deney sonuçları ayrı ayrı tablo ve grafikler halinde verilmiştir. Böylece katı yakıt karışımında meydana gelen değişimler daha açık gösterilmiştir.

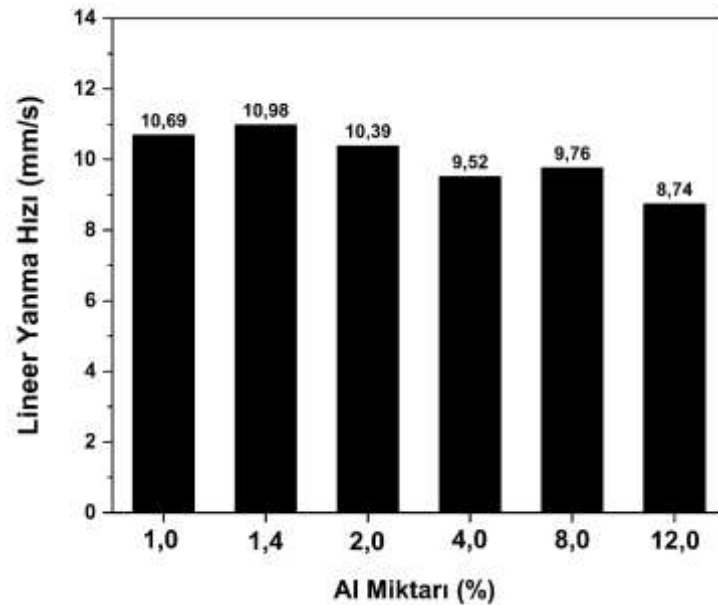
Lineer yanma hızı, ağırlıkça %0,2 ile %1,4 arasında flake tipi ve %1 ile %12 arasında küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımlardan alınan numuneler üzerinde ölçülmüştür. Deney 63 kg/cm<sup>2</sup> basınç, 54 °C sıcaklıkta Strand-Burner yanma hızı ölçüm cihazında yapılmıştır. Her karışım için üç adet numune kullanılmıştır. Her numunenin önce yarısına kadar, daha sonra tamamının yanması için geçen süre ölçülerek o numuneye ait ortalama yanma hızı hesaplanmıştır. Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımlara ait sonuçlar Şekil 1' de verilmiştir.

Karışımların ihtiva ettiği flake tipi alüminyum tozunun miktarı arttıkça, lineer yanma hızları azalmaktadır. Alüminyum tozunun oranı %0,2 iken lineer yanma hızı 12,62 mm/s, %1,4 alüminyum tozu ihtiva eden karışımın lineer yanma hızı 11,21 mm/s şeklinde bulunmuştur.



Şekil 1. Flake tipi Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarında lineer yanma hızının değişimi.

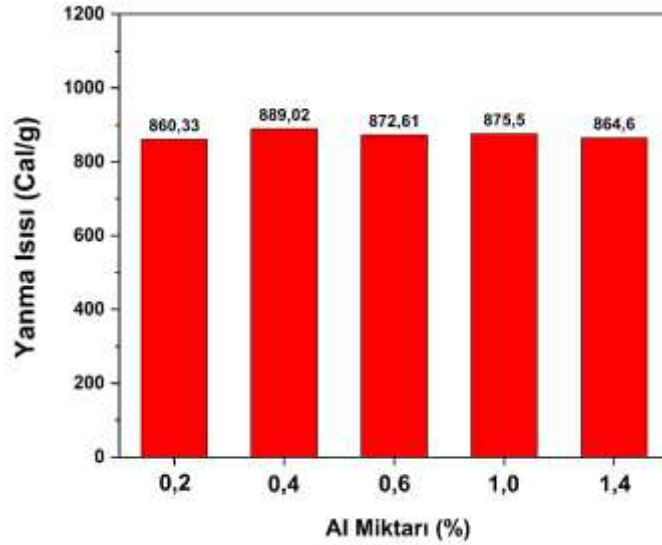
Küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden altı ayrı karışımın lineer yanma hızı sonuçları ise Şekil 2' de verilmiştir. Küresel tip alüminyum tozu miktarı arttıkça karışımın lineer yanma hızı azalmaktadır. %1 alüminyum tozu ihtiva eden karışımın lineer yanma hızı 10,69 mm/s, %12 alüminyum tozu ihtiva eden karışımında 8,74 mm/s 'dir. Küresel tip tozların kullanıldığı %1 ve %1,4 alüminyum tozu ihtiva eden karışımların lineer yanma hızları aynı orandaki flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımların lineer yanma hızlarından daha düşüktür. %1 alüminyumlu flake tipi karışımların lineer yanma hızı 12,62 mm/s, aynı orandaki küresel tip alüminyum ihtiva eden karışımlarda 10,69 mm/s olarak bulunmuştur. %1,4 flake tipi alüminyumlu karışımın lineer yanma hızı 12,49 mm/s, %1,4 küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımın lineer yanma hızı 10,98 mm/s 'dir. Burada alüminyum tozunun şekli lineer yanma hızını etkilemektedir.



Şekil 2. Küresel Tip Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarında lineer yanma hızının değişimi.

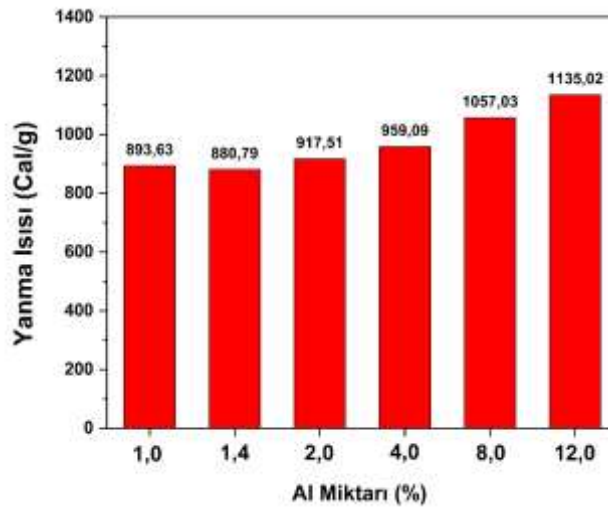
Hazırlanan karışımların yanma ısıları, adyabatik kalorimetre cihazında, azot gazı ortamında ölçülmüştür. Yanma ısıları hem flake, hem de küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımlardan alınan 5 gr'lık numunelerle yapılmıştır. Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden her karışım için beş ayrı numune kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 3' te flake tipi tozların kullanıldığı karışımlar için verilmiştir.

Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımların yanma ısıları önce artmasına rağmen daha sonra artan alüminyum miktarına bağlı olarak azalmıştır. %0,2 flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımın yanma ısıları 860,83 cal/g iken, %0,4 alüminyumlu karışımda 889,02 cal/g olarak ölçülmüştür. Fakat yanma ısıları %0,6 Al' lu karışımda 872,61 cal/g' a, %1,4 Al' lu karışım için 864,6 cal/g' a kadar azalmıştır.



Şekil 3. Flake tipi Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarında yanma ısılarının değişimi.

Küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden altı ayrı karışımın yanma ısıları, daha önce belirtildiği şekilde ölçülmüştür. Bulunan sonuçlar Şekil 4' te verilmiştir. Küresel tip alüminyum tozunun miktarı arttıkça yanma ısıları önce azalmasına karşılık daha sonra düzenli olarak artmıştır. %1 Al' lu karışımın yanma ısıları 893,63 cal/g iken %12 Al' lu karışım için 1135,02 cal/g değerine yükselmiştir. Küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımların yanma ısıları, aynı oranda flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımlara göre daha yüksektir.



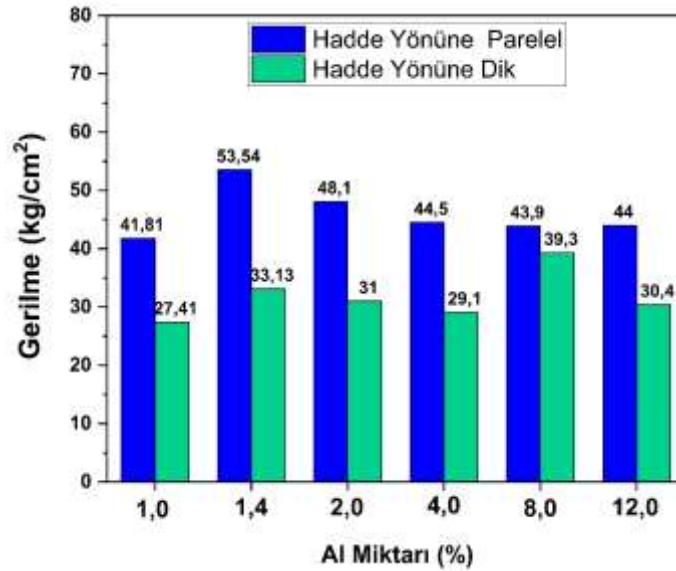
Şekil 4. Küresel tip Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarında yanma ısılarının değişimi.



Katı yakıt karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme deneyi önemli bir işlemdir. Küresel tip Al tozu ihtiva eden her karışımdan altı adet numune alınarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme işlemi oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir numunenin haddeleme yönüne paralel ve dik olarak çekme gerilmesi ile uzama değerleri bulunarak o karışımın ortalama değerleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 5’ te verilmiştir.

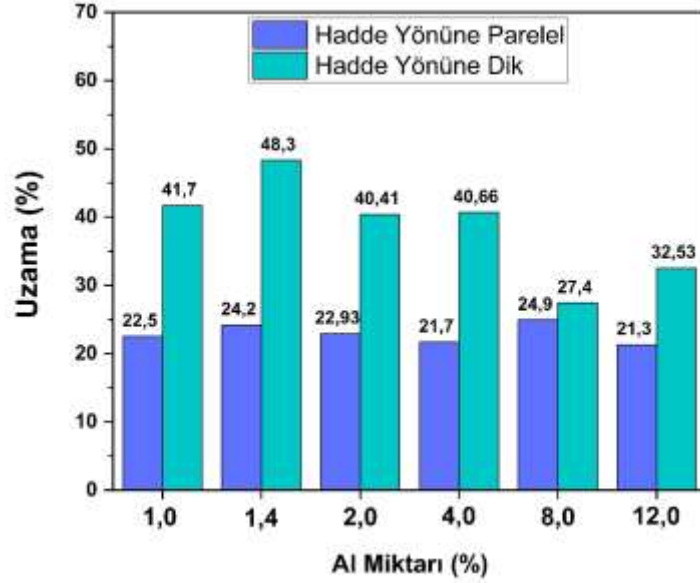
İlave edilen alüminyum tozunun miktarı arttıkça haddeleme yönüne paralel çekilen karışımların çekme gerilmelerinde önce bir miktar artma; daha sonra azalma meydana gelmiştir. Haddeleme yönüne dik olarak çekilen, çekilen karışımlarda da önce artma, sonra azalma meydana gelmiştir. %8 küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımın çekme mukavemeti yüksek oranda artmıştır. Bu karışımın haddeleme esnasında ısınarak sertleşmeye uğradığı tahmin edilmektedir.

Haddeleme yönüne paralel çekilen numunelerin çekme gerilmeleri %1,4 Al için 53,54 kg/cm<sup>2</sup>, %12 Al için 44 kg/cm<sup>2</sup>’ dir. Haddeleme yönüne dik çekilen numunelerde %1,4 Al için 33,13 kg/cm<sup>2</sup>, %12 Al için 30,4 kg/cm<sup>2</sup>’ dir. Haddeleme yönüne dik çekilen numunelerin %8 Al değeri için çekme gerilmesi 39,3 kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Küresel tip Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarında çekme gerilmesinin değişimi (haddeleme yönüne paralel ve dik çekilen).

Şekil 6’ da ise haddeleme yönüne paralel ve dik çekilen numunelerin uzama oranları verilmiştir. İlave edilen küresel tip alüminyum tozunun miktarı arttıkça haddeleme yönüne paralel çekilen numunelerin uzama oranlarında düşük miktarlarda da olsa belirli bir azalma meydana gelmiştir. %1,4 Al’ lu numunelerin uzama oranı %24,2 iken %12 Al’ lu numunelerin uzama oranı %21,2 olmuştur. %8 Al’ lu numunenin uzama oranı %24,9 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Küresel tip Al tozu ilave edilen numunelerin al miktarına bağlı olarak uzama değerleri (haddeme yönüne paralel ve dik çekilen)

Haddeme yönüne dik çekilen numunelerin uzama oranlarında da belirli bir azalma söz konusudur. Bu değerlerin %1,4 Al için %48,3, %12 Al için %32,53 olduğu görülmüştür. Burada %8 Al' lu karışımın uzama oranının %27,4 olduğu görülmüştür. Haddeme yönüne paralel çekilen numunelerin çekme gerilmeleri, dik çekilen numunelerin çekme gerilmelerinden daha yüksektir. %8 Al tozu ihtiva eden karışımın dışında, haddeme yönünde dik çekilen numunelerin uzama oranları, paralel çekilen numunelerin uzama oranlarından daha yüksektir.

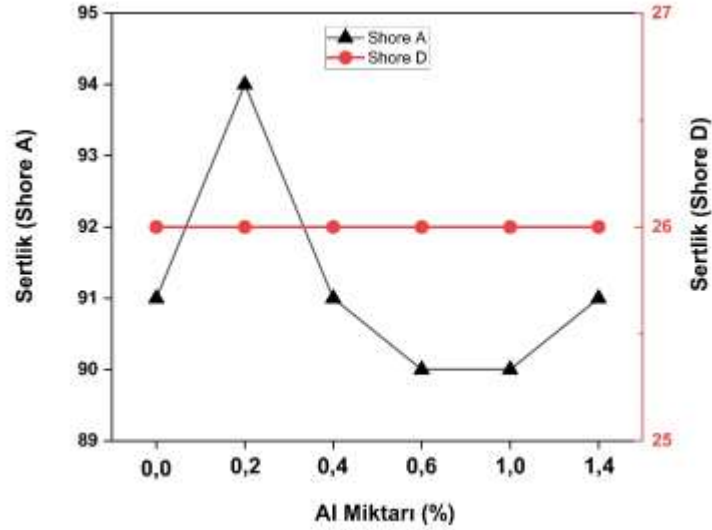
Haddeme işleminden sonra katı yakıt karışımlarının nem oranı %0,5-0,6 değerlerine düşmektedir. Ağırlık kaybının ölçülmesi için her karışımdan 2,5 gr ağırlığında iki adet numune alınmıştır. Bu numuneler 42 °C de önce 8 saat, sonra 72 saat bekletildikten sonra tartılarak hesaplanmıştır. Ağırlık kaybının hesaplanması için, flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden iki ayrı karışımdan, küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden üç ayrı karışımdan numuneler alınmıştır. Hesaplanan ağırlık kaybı değerleri Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Alüminyum tozu ihtiva eden katı yakıt karışımının kimyasal bileşimi

Al Miktarı (%)	Flake		Küresel		
	0,2	0,4	4	8	12
<b>Ağırlık Kaybı (%)</b>	1,1203	0,8402	0,9587	1,0499	0,8932

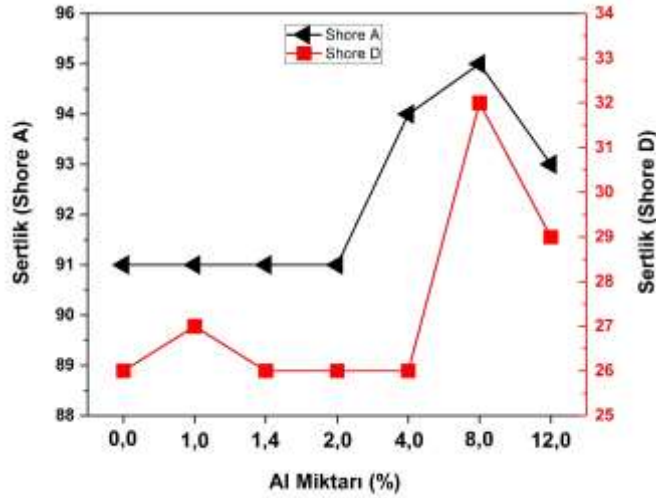
Ağırlık kaybı, flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden numunelerde en yüksek 1,1203, en düşük 0,8402 olarak bulunmuştur. Küresel tip alüminyum tozu ihtiva eden karışımlarda ise en yüksek %1,0499, en düşük %0,8932 bulunmuştur.

Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımların Shore A ve Shore D sertlik değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Flake tipi alüminyum tozu ihtiva eden karışımlarda, alüminyum tozunun artmasıyla Shore D sertliğinde bir değişme meydana gelmemiştir. Shore A sertliği %0,2 Al ihtiva eden karışımda 94, %1,4 Al ihtiva eden karışımda 90' dır. En düşük sertlik değerleri, hiç alüminyum tozu ihtiva etmeyen katı yakıt karışımının sertliğine eşittir. Şekil 7' de ise flake tipi alüminyum tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarının Shore A ve Shore D sertliklerinin değişimi görülmektedir. Flake tipi Al tozu ihtiva eden katı yakıt karışımlarının Shore D sertliklerinde bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



Şekil 7. Flake tipi Al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarının Shore A ve Shore D sertlikleri.

Şekil 8’ de küresel tip alüminyum tozu ilave edilen karışımların Shore A ve Shore D sertlik değerleri verilmiştir. Küresel tip alüminyum tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarının Shore A sertlikleri %1 Al ihtiva eden karışımda 91, %8 Al ihtiva eden karışımda 95’ dir. Shore D sertliği en düşük 26, en yüksek 32’ dir. %8 Al ilave karışımda, çekme mukavemeti ve uzama miktarlarının da elde edilen değişme sertlik değerlerinde de görülmektedir. Alüminyum ilaveli karışımların Shore D sertlikleri diğer plastiklere göre düşük, Shore A sertlikleri ise kauçuk türü malzemelere göre yüksektir.



Şekil 8. Küresel tip al tozu ilave edilen katı yakıt karışımlarının Shore A ve Shore D sertlikleri.

#### IV. SONUÇLAR

Katı yakıtlar, bünyesindeki bileşenlerin davranışları gereği farklı özellikler göstermektedirler. Bu çalışmada, metalik yakıt katkılı çift esaslı karışımlar üzerinde çalışılmıştır. Çift esaslı yakıtlar, tutuşma duyarlılığı yüksek olan karışımlardır. Metalik yakıt ilavesi ile bu duyarlılık daha da artmaktadır. Burada metalik katkılı çift esaslı yakıtlarda katı oksitleyici bulunmaksızın yakıt performansının nasıl değişebileceği araştırılmıştır. Yapılan deneyler ile aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

Gerek flake tipi gerekse küresel tip alüminyum tozu ilavesiyle çift esaslı katı yakıt karışımlarının lineer yanma hızının azaldığı görülmüştür. CMDB yakıt karışımları gözönünde bulundurulduğunda metalik katkıların yapıldığı çift esaslı katı yakıt karışımlarında bünyedeki mevcut oksijen bütün elemanların yanabilmesi için yeterli değildir.

Yanma odası basıncının artması ile lineer yanma hızı artmaktadır. Ayrıca kompozit karışımlarda metalik katkıların tane inceliği ve metalik katkıların oranı arttıkça lineer yanma hızı artmaktadır. Kompozit karışımlarda oksitleyici tane boyutu azaldıkça ve oksitleyici oranı arttıkça lineer yanma hızı artmaktadır.

Flake tip ve küresel tip alüminyum tozu miktarı arttıkça çift esaslı katı yakıt karışımlarının yanma ısıları da artmaktadır. Küresel tip tozların kullanıldığı %12 Al ihtiva eden karışımın yanma ısı %50 oranında artmıştır. Yanma ısısının artmasıyla yanma odası sıcaklığı ve dolayısıyla lineer yanma hızı da artmış olacaktır.

%1 ve %1,4 alüminyum ilaveli karışımların yanma ısıları karşılaştırıldığında, metalik yakıt olarak flake tip tozlar yerine küresel tip tozların kullanılmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Yanma ısısının artmasıyla yanma odası sıcaklığı artacak yanma daha sıcak ortamda devam edecektir. Böylece yanma verimi artarken yanmadan kalan artıkların oranı da azalmış olacaktır.

Yanma ısısının artmasıyla yanma ürünlerinin sıcaklığı, dolayısıyla yanma ürünü gazların basıncı da artmış olacaktır. Yanma odası basıncının artması itme kuvvetini de artıracaktır. Bunun yanında yanma odası basıncının artmasıyla lineer yanma hızı artacaktır.

İlave edilen alüminyum tozunun miktarının artması, yakıtın mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Haddeme yönüne dik ve haddeme yönüne paralel alınan numunelerin çekme gerilmelerinde artma ve süneklikte ise azalma meydana gelmiştir.

Haddeme yönüne bağlı olarak yakıtın mekanik özellikleri de değişmektedir. Haddeme yönüne paralel olarak çekme işlemine tabi tutulan numunelerin çekme gerilmeleri dik olarak çekilen numunelere göre daha yüksek iken, süneklik veya uzama oranları ise haddeme yönüne paralel numunelerde, dik olarak çekilen numunelere göre daha düşüktür.

%8 küresel alüminyum tozu ihtiva eden karışımın haddeme yönüne dik çekildiğinde elde edilen gerilim değeri daha yüksek, uzama oranı ise daha düşüktür. Bu durum karışım hazırlama işlemleri esnasında ısınma ve daha hızlı sertleşmeden meydana gelebilir. Böylece bu karışımın gerilme değeri yüksek,uzama oranı düşük olarak bulunmuştur.

Katı yakıtların şekillendirilmesi esnasında tutuşma ve yanma riskine karşı %0,5 civarında nem ihtiva etmesi istenmektedir. Daha yüksek oranda nem bulunması ise gözenek oluşumunu kolaylaştırır. Bu nem belirli bir süre içinde ağırlık kaybına sebep olabilir. Ağırlık kaybına alüminyum ilavesinin fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Yapılan Shore sertlik ölçme deneyleri sonunda alüminyum miktarının sertliği fazla etkilemediği görülmüştür. Karışım genel olarak plastik malzemelere göre düşük sertlikte, kauçuk esaslı malzemelere göre daha yüksek sertlikte. Sertlik değerinin alüminyum ilavesiyle önemli oranda değişmemesi şekillendirme işlemlerinde de herhangi bir problem olmadan şekil değiştirmenin mümkün olabileceğini göstermektedir.

Küresel tip alüminyum ilave edilen karışımlarda ise yakıt yoğunluğunun toz miktarına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Yakıt yoğunluğunun artması ise yanma odasına yüklenen yakıt hacmini azaltmaktadır. Katı yakıtlarda yakıt yoğunluğu metalik katkılarla arttırılabildiği gibi oksitleyici kristallerle ve şekil verme işlemleri ile de arttırılabilir.

Metalik yakıt ilavesiyle yanma ısısının artmasına karşılık lineer yanma hızı azalmaktadır. Bu durumda oksitleyici kullanılarak hem yanma ısısı hem de lineer yanma hızı arttırılabilir. Ancak bu durumda yakıt cinsi de kompozite değişmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda metalik yakıtlarla birlikte oksitleyici cinsi, miktarı ve boyutu değiştirilerek katı yakıt özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler araştırılabilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Akçıl M., “Roketlerde Katı Yakıtlar”, Seminer, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.T.Ü, 10 Nisan 1993.
- [2] Akçıl M., Çelik V., Yaşar H., Çizmecioğlu Z., “Çift Esaslı Katı Yakıtlarında Metalik Katkıların Yanma Özelliklerine Etkisi”, Hiteks I. Uluslararası Havacılık ve İleri Teknolojiler Sempozyumu, İ.T.Ü., 1995.
- [3] Akçıl M., Çelik V., Kolip A., Avcı E., Çizmecioğlu Z., “Katı Yakıt Üretiminde Şekillendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, 4. Uluslararası Yanma Sempozyumu, BURSA, 1995.
- [4] Asthana, S, N. Deshpande., “Evolution of Various Stabilizers For Stability and Increased Life of CMDB Propellants”, Propell. Expl. Pyrotech. V. 14, 1989, 170-175.
- [5] Asthana, S, N. Singh, H., “Ageing Behaviour of High Energy Composite Modified Double Base (CMDB) Propellants A Review”, Journal of Sci and Industrial Research, Vol. 48 February 1989, 92-99.