

**BOR POTASYUM NİTRAT PİROTEKNİK ÜRETİMİ VE
LAZER İLE ATEŞLENME KARAKTERİSTİĞİNİN
BELİRLENMESİ**

**PRODUCTION OF BORON POTASSIUM NITRATE
PYROTECHNIC AND DETERMINATION OF IGNITION
CHARACTERISTICS BY LASER**

İSMET KIZILIRMAK

PROF. DR. ZÜMRİYE AKSU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

Yüksek Lisans Tezi

olarak hazırlanmıştır.

2019

İSMET KIZILIRMAK'ın hazırladığı “ **Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Üretimi ve Lazer ile Ateşlenme Karakteristiğinin Belirlenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

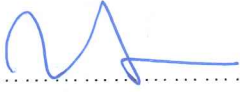
Prof. Dr. Nuray YILDIZ

Başkan



Prof. Dr. Zümriye AKSU

Danışman



Prof. Dr. Deniz TANYOLAÇ

Üye



Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN

Üye



Doç. Dr. Eda ÇELİK AKDUR

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak/...../..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Benim biricik oğluma...

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak

hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

29 / 05 / 2019



İSMET KIZILIRMAK

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

29 / 05 / 2019



İSMET KIZILIRMAK

ÖZET

BOR POTASYUM NİTRAT PİROTEKNİK ÜRETİMİ VE LAZER İLE ATEŞLENME KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ

İsmet KIZILIRMAK

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zümriye AKSU

Mayıs 2019, 115 sayfa

Bu tez çalışmasında, katı yakıtlı roket motorların ateşleyicilerinde kullanılan bor potasyum nitrat (BPN) piroteknik tozun üretimi gerçekleştirilmiş, piroteknik tozun pelet haline getirilmesi sağlanmış, peletin yeni tasarlanan lazer ateşleme test sistemi ile ateşlenme karakteristiği belirlenmiş ve kapalı bomba test sistemi ile pelet ortalama yanma hızı tayin edilmiştir.

Tez kapsamında ilk olarak, BPN piroteknik tozun MIL-P-46994B askeri standarda uygun olarak bor, potasyum nitrat ve Viton floroelastomer kullanılarak üretim çalışmaları yapılmış, standartta belirtilen gereksinimler karşılanmıştır. DSC analizi BPN piroteknik tozun tutuşma sıcaklığının 500-510°C arasında olduğunu göstermiştir. BPN piroteknik tozun kalorifik değeri ortalama 1675 cal/g olarak saptanmıştır. BPN piroteknik tozun yoğunluk tayini sonucunda en yüksek teorik yoğunluk 2,16 g/cm³ olarak bulunmuştur.

BPN piroteknik tozun raf ömrünü uzatmak ve küçük hacimde en fazla miktarda piroteknik kullanmak için piroteknik toz pelet haline getirilmiştir. BPN piroteknik toz yük altında presleme yapılarak 10 mm, 9 mm, 8 mm ve 3,27 mm çapına sahip pelet formlarına dönüştürülmüş ve üretilen peletlerin ortalama

yoğunlukları ölçülmüştür. Uygulanan yük altında farklı çaptaki peletlerin yoğunluklarının 1,64-1,69 g/cm³ arasında değiştiği saptanmıştır. Bu yoğunluk aralığının MIL-P-46994B standardında belirtilen isterleri karşıladığı gözlenmiştir. Pelet yoğunluğunun toz haldeki yoğunluğa oranlanması ile peletin gözenikliliği %24 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmasının sonraki aşamasında, yeni bir lazer ateşleme test sistemi tasarlanmış ve BPN peletlerin bu sistemde lazer ile ateşlenerek ateşlenme karakteristiği oluşturulmuştur. 3,27 mm çapında ve 1,69 g/cm³ yoğunluğundaki peletler Bruceton Test Metodu'na göre lazer ile ateşlenmiş, Neyer SenTest program yazılımı kullanılarak, %95 kesinlik seviyesinde %99,9 güvenilirlikte BPN peletlerin ateşlenmesi için gereken lazer gücünün 550 mW ve lazer ateşlenme süresinin 5,50 ms olduğu saptanmıştır. Güvenilirlik seviyesi %99,0 olduğu durumda ise lazer gücü 470 mW ve lazer ateşlenme süresi 10,45 ms olarak bulunmuştur. 550 mW güç ve 5,50 ms ateşlenme süreleri kullanılarak peletlerin ateşlenmesi için gereken güç yoğunluğu 5682 W/cm² ve enerji yoğunluğu 31,3 J/cm² olarak bulunmuştur.

Son olarak 3,27 mm çapta ve 4,60 mm boyundaki peletler, 550 mW lazer güçte kapalı bomba test düzeneğinde ateşlenerek peletlerin ortalama yanma hızı 39,5 mm/s olarak belirlenmiştir. Bu değer MIL-P-46994B standardında belirtilen en az 31,75 mm/s isterini karşılamıştır.

Tez çalışması sonucunda MIL-P-46994B askeri standardına uygun BPN piroteknik tozu ve peleti üretilmiş, yeni tasarlanan bir lazer ateşleme test sistemi sayesinde toz ve pelet ürünlerin kalorifik değer, yoğunluk ve yanma hızı gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Piroteknik, toz, pelet, Bor Potasyum Nitrat, kalorifik değer, ortalama yoğunluk, lazer, ateşlenme, kapalı bomba, yanma hızı

ABSTRACT

PRODUCTION OF BORON POTASSIUM NITRATE PYROTECHNIC AND DETERMINATION OF IGNITION CHARACTERISTICS BY LASER

İsmet KIZILIRMAK

Master of Science, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Zümriye AKSU

May 2019, 115 pages

In this thesis, the production of boron potassium nitrate (BPN) pyrotechnic powder used in igniter of solid propellant rocket engines was realized, the pyrotechnic powder was made to pellet, the pellet was determined with the newly designed laser ignition test system and the firing characteristic of the pellet was determined by the closed bomb test system.

In the scope of the thesis, firstly, BPN pyrotechnic powder was produced in accordance with MIL-P-46994B military standard by using boron, potassium nitrate and Viton fluoroelastomer. DSC analysis indicated that the BPN pyrotechnic powder had a ignition temperature of 500-510°C. The calorific value of BPN pyrotechnic powder was determined as 1675 cal/g. As a result of the density determination of BPN pyrotechnic powder, the highest theoretical density was found to be 2.16 g/cm³.

BPN pyrotechnic powder has been turned into pellets to prolong the shelf life of pyrotechnic powder and to use the maximum amount of pyrotechnic in small volume. The BPN pyrotechnic powder was converted into pellet forms with a diameter of 10 mm, 9 mm, 8 mm and 3.27 mm by pressing under load and the

average densities of the pellets produced were measured. The density of the pellets with different diameters was found to vary between 1.64-1.69 g/cm³. It has been observed that this density range meets the requirements specified in the MIL-P-46994B standard. The pellet porosity was calculated as 24% by the ratio of the pellet density to the density of the powder.

In the next phase of the thesis study, a new laser ignition test system was designed and the BPN pellets were ignited by laser in this system. Pellets with a diameter of 3.27 mm and a density of 1.69 g/cm³ were fired by laser according to the Bruceton Test Method, using the SenTest program software, the laser power required to fire BPN pellets at a 95% confidence level and 99.9% reliability level was found to be 550 mW and the duration of laser firing was 5.50 ms. When the level of reliability was 99.0%, laser power was found to be 470 mW and laser firing time was found as 10.45 ms. The power density required to fire the pellets using 550 mW power and 5.50 ms ignition time was 5682 W/cm² and the energy density was 31.3 J/cm².

Finally, the pellets of 3.27 mm diameter and 4.60 mm in length were fired at a 550 mW laser power in the closed bomb test apparatus and the average burning rate of the pellets was determined as 39.5 mm/s. This value corresponds to a minimum of 31.75 mm/s specified in the MIL-P-46994B standard.

As a result of the thesis, BPN pyrotechnic powder and pellet were produced according to MIL-P-46994B military standard, powder and pellet products have been shown to meet the calorific value, density and burning rate requirements thanks to a newly designed laser ignition test system.

Key Words: Pyrotechnics, Boron Potassium Nitrate, calorific value, average density, pellet, laser, ignition, closed bomb, burning rate

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, tez yazımım sırasında gösterdiği üstün ilgiden ve bana güveninden dolayı çok sevdiğim değerli hocam Prof. Dr. Zümriye AKSU'ya teşekkürlerimi iletmek borcumdur.

Tez çalışmasında bana sunmuş olduğu tüm imkânlardan dolayı öncelikle Devletime ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Savunma Sanayi Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü (TÜBİTAK SAGE)'ne teşekkür ederim.

Tez çalışmamda beni cesaretlendiren ve her zaman yanımda olan, çalışmam boyunca sağladığı katkılarından dolayı değerli çalışma arkadaşım Gonca ÖZKASAPOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi iletmek isterim.

Son olarak, sabrından ve desteğinden dolayı sevgili eşim Fatma'ya kucak dolusu sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Piroteknik Malzemelerin Fiziksel Özellikleri	4
2.2. Bor Potasyum Nitrat Piroteknikliği.....	6
2.2.1. BPN Piroteknik Tozunun Kimyasal Analizi	6
2.2.2. BPN Piroteknik Tozunun Hazırlanması	7
2.2.3. BPN Piroteknik Pelet Üretimi.....	11
2.2.4. BPN Piroteknik Peletlerin Balistik Özellikleri.....	12
2.3. Piroteknik Ateşleyici Sistemleri	15
2.4. Piroteknik Malzemenin Lazer İle Ateşlenmesi	18
2.4.1. Lazer Ateşleme Sistemlerinin Yapıları.....	18
2.4.2. Piroteknik Malzemenin Lazer İle Ateşlenme Karakteristiği	23
2.5. DeneySEL Verilerin Değerlendirilmesi.....	24
2.5.1. Doğruluk ve Duyarlılık	24
2.5.2. Ortalama Değer	24
2.5.3. Sapma.....	25
2.5.4. Güven Aralığı ve Güvenilirlik Seviyesi	26
2.6. Bruceton Test Metodu	29
2.7. Literatür Sonuçları	31

3. DENEYSEL ÇALIŞMA	33
3.1. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretimi	33
3.1.1. BPN Piroteknik Peletin Bileşenlerinin Seçimi ve Temini	33
3.1.2. Üretim Yöntemi	37
3.1.3. Üretilen BPN Piroteknik Peletin Kalite Kontrol Testleri.....	39
3.2. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretimi	40
3.2.1. Üretim Yöntemi	40
3.2.2. BPN Piroteknik Peletin Kontrolü.....	43
3.3. Lazer ile BPN Pelet Ateşlenmesi	43
3.3.1. Lazer Ateşleme Sistemi	43
3.3.2. Lazer Güç Ünitesi	44
3.3.3. Lazer Mercek Sistemi.....	50
3.3.4. Lazer Ateşleme Test Aparatları.....	53
3.3.5. Kapalı Bomba Test Düzenliği	54
3.3.6. Kapalı Bomba Test Sistemi.....	55
3.3.7. Lazer Işın Karakterizasyonu.....	58
3.4. Bruceton Testi	73
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	74
4.1. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretim Sonuçları	74
4.2. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretimi Sonuçları.....	76
4.3. Lazer ile BPN Peletin Ateşlenmesi Sonuçları.....	80
4.3.1. Bruceton Testi Sonuçları.....	84
4.3.2. BPN Pelet Lazer Ateşlenme Karakteristiği	94
4.3.3. Kapalı Bomba Testi.....	95
5. SONUÇLAR	100
KAYNAKLAR	102
EKLER.....	105
EK-1. BPN Piroteknik Tozu 042. , 043. ve 044. Kafelere Ait Kalorifik Değer Sonuçları	105
EK-2. BPN Piroteknik Tozu 042. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu.....	106

EK-3. BPN Piroteknik Tozu 043. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu	107
EK-4. BPN Piroteknik Tozu 044. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu	108
EK-5. Üretim sonrası 8 mm Çapındaki BPN Peletlerin Yoğunluk Hesapları..	109
EK-6. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-1	110
EK-7. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-2	110
EK-8. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-3	111
EK-9. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-4	111
EK-10. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-5	112
EK-11. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-6	112
EK-12. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-7	113
EK-13. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-8	113
EK-14. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-9	114
EK-15. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-10	114
EK-16. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç- Zaman Grafiği Test-11	115
EK-17. Tez Çalışması Orjinallik Raporu	116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	BPN Piroteknik Tozunun Termal Davranışı [2]	6
Şekil 2.2.	Farklı Bor Oranlarında Hazırlanan BPN, BPP ve BAP Piroteknik Peletlerin Yanma Hızlarının Karşılaştırılması [10].....	14
Şekil 2.3.	Farklı Bor oranlarında Hazırlanan BPN, BPP ve BAP Pirotekniklerinin Adyabatik Alev Sıcaklıklarının Karşılaştırılması [10].....	15
Şekil 2.4.	Piroteknik Ateşleyicilerin Görselleri	16
Şekil 2.5.	Ateşleyici Şematik Gösterimi	17
Şekil 2.6.	Elektriksel ve Lazer Ateşleme Sistemlerinin Şematik Karşılaştırması	19
Şekil 2.7.	Farklı Lazer Güç Yoğunluklarında Ateşlenen BPN Peletler için Elde Edilen Basınçların Zamanla Değişimleri [17]	23
Şekil 2.8.	Normal Dağılım Eğrisi	26
Şekil 3.1.	İletken Kutu	38
Şekil 3.2.	Turbula Karıştırıcı	39
Şekil 3.3.	Pinömatik Pres-1	41
Şekil 3.4.	Presleme İşlemi Sırasında Kullanılan Aparatlar	42
Şekil 3.5.	BPN Piroteknik Tozun Presleme Aşamaları.....	43
Şekil 3.6.	Deneylerde Kullanılan Lazer Güç Ünitesi	44
Şekil 3.7.	Lazer Güç Ünitesi Dokunmatik Ekranı	46
Şekil 3.8.	Lazer Diyotların Görselleri	47
Şekil 3.9.	Lazer Diyot Çalışma Akımına Karşılık Elde Edilen Lazer Işın Çıkış Gücü Grafiği.....	49
Şekil 3.10.	SMA Tipi Optik Konektör ve Fiber Optik Kablosu	50
Şekil 3.11.	Lazer Mercek Sisteminin Şematik Gösterimi	51
Şekil 3.12.	Lazer Mercek Sistemi ve Ateşlenme Test Aparatı Katı Modeli	52
Şekil 3.13.	Lazer Mercek Sistemi	52
Şekil 3.14.	Piroteknik Pelet Tutucu Aparat	53
Şekil 3.15.	100 cc Kapalı Bomba Test Düzenegi.....	55
Şekil 3.16.	Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç-Zaman Grafiğinden Basınç Sensörünün Gürültü Değerinin Bulunması.....	56

Şekil 3.17.	Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç- Zaman Grafiğinde Kullanılan Terimlerin Gösterilmesi.....	57
Şekil 3.18.	Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç- Zaman Grafiğinde 0,15 Bar'lık İlk Basınç Değerine Karşı Gelen Sürenin Tespit Edilmesi.....	58
Şekil 3.19.	Fotodiyot Sensör ve Optik Güç Ölçer	59
Şekil 3.20.	Ekrana Girilen Lazer Işın Gücünün Farklı Kalınlıklardaki PMMA Çıkışlarında Elde Edilen Lazer Güç Değerlerinin Karşılaştırılması.....	62
Şekil 3.21.	Lazer Ateşleme Sistemi Optik Işın Analizi	63
Şekil 3.22.	Lazer Işın Dağılımının Şematik Gösterimi	64
Şekil 3.23.	Fokal Mesafede Lazer Işın Çapı Ölçüm Sonuçları	64
Şekil 3.24.	Fokal Mesafede Lazer Işın Dağılımı	65
Şekil 3.25.	Odak Noktasındaki Lazer Işının Dağılımı	66
Şekil 3.26.	Lazer Işının Gaussian Model İle Uyumluluğu	66
Şekil 3.27.	2 mm Kalınlıktaki PMMA Kullanıldığında Lazer Işın Çapının ve Işın Dağılımının Gösterimi, (a) optik mesafe: 47 mm, (b) optik mesafe: 44 mm.....	67
Şekil 3.28.	Lazer Işın Süresi Doğrulama Yöntemi.....	68
Şekil 3.29.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 2 ms.....	69
Şekil 3.30.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 5 ms.....	69
Şekil 3.31.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 7 ms.....	69
Şekil 3.32.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:10 ms.....	70
Şekil 3.33.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:15 ms.....	70
Şekil 3.34.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:20 ms.....	70
Şekil 3.35.	Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:25 ms.....	71
Şekil 4.1.	Tez Çalışması Kapsamında Üretilen 34 Kafile BPN Piroteknik Tozun Kalorifik Değer Sonuçlarının Karşılaştırılması	75
Şekil 4.2.	BPN Piroteknik Tozun DSC Analizi	76
Şekil 4.3.	10 mm Çapındaki Peletlerin Üretiminde Uygulanan Yükün Pelet Yoğunluğuna Etkisi.....	78
Şekil 4.4.	9 mm Çapındaki Peletlerin Üretiminde Uygulanan Yükün Pelet Yoğunluğuna Etkisi.....	79
Şekil 4.5.	Lazer Ateşleme Test Düzeneği	81

Şekil 4.6.	Lazer Ateşlemede Kullanılan BPN Peletin Yüzey Fotoğrafı	83
Şekil 4.7.	SenTest Programı Test ve Analiz Ayarları	86
Şekil 4.8.	Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	87
Şekil 4.9.	Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	88
Şekil 4.10.	540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	89
Şekil 4.11.	540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	90
Şekil 4.12.	470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	92
Şekil 4.13.	470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı	93
Şekil 4.14.	Kapalı Bomba Testinde Kullanılan M12 Gövde Bütünü	95
Şekil 4.15.	Kapalı Bomba Testinde Kullanılan BPN Peletlerin Ateşlenme Görüntüleri	97
Şekil 4.16.	Kapalı Bomba Test-1'e Ait Basınç-Zaman Grafiği	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Piroteknik Malzeme Üretiminde Kullanılan Metal Tozlarının Özellikleri [2]	4
Çizelge 2.2.	Piroteknik Malzeme Üretiminde Kullanılan Oksitleyicilerin Fiziksel Özellikleri [1,2]	5
Çizelge 2.3.	MIL-P-46994B Standardında Belirtilen BPN Piroteknik Malzemenin Özellikleri	7
Çizelge 2.4.	BPN Piroteknik Tozu Bileşenlerinin Özellikleri.....	8
Çizelge 2.5.	MIL-P-46994B Standardında Verilen BPN Piroteknik Tozun Balistik Özellikleri.....	9
Çizelge 2.6.	BPN Piroteknik Tozun Termal Özellikleri.....	10
Çizelge 2.7.	BPN Piroteknik Tozunun Balistik Özellikleri.....	11
Çizelge 2.8.	MIL-P-46994B Standardında Verilen BPN Peletlerin Fiziksel Özellikleri	12
Çizelge 2.9.	BPN Piroteknik Peletlerin Balistik Özellikleri [8,9].....	13
Çizelge 2.10.	Çeşitli Ticari Piroteknik Ateşleyicilerin Özellikleri	16
Çizelge 2.11.	Farklı Lazer Tiplerinde Farklı Piroteknik Malzemelerin Ateşlenme Özellikleri	21
Çizelge 3.1.	BPN Piroteknik Üretiminde Kullanılan Bor, Potasyum Nitrat ve Bağlayıcının Malzeme Özellikleri	33
Çizelge 3.2.	Bor Metal Tozun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	34
Çizelge 3.3.	Potasyum Nitratın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	35
Çizelge 3.4.	Viton'un Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	36
Çizelge 3.5.	Viton'un Malzeme Özellikleri	36
Çizelge 3.6.	BPN Piroteknik Tozun Bileşen Oranları.....	37
Çizelge 3.7.	50 gramlık katile için gerekli bileşen miktarları	38
Çizelge 3.8.	Lazer Diyot Çalışma Akımına Karşılık Elde Edilen Lazer Işın Gücü Verileri.....	48
Çizelge 3.9.	Farklı PMMA Kalınlıkları Çıkışında Lazer Güç Ölçüm Sonuçları.....	60
Çizelge 3.10.	Lazer Işın Süresi Doğrulama Sonuçları	71

Çizelge 4.1.	Lazer Ateşlemede Kullanılan 3,27 mm Çapındaki BPN Peletlerin Özellikleri.....	80
Çizelge 4.2.	Bruceton Testi Öncesi BPN Pelet Ateşlenme Denemeleri	82
Çizelge 4.3.	Bruceton Test Matrisi (Sabit Atım Süresi: $t=20$ ms)	85
Çizelge 4.4.	540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Elde Edilen Bruceton Test Matrisi	89
Çizelge 4.5.	470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Elde Edilen Bruceton Test Matrisi	91
Çizelge 4.6	Hesaplanan Lazer Güç ve Enerji Yoğunlukları	94
Çizelge 4.7.	Kapalı Bomba Testi Çalışma Koşulları.....	96
Çizelge 4.8.	Kapalı Bomba Test Sonuçları	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

a/a	Ağırlıkça oran
A	Alan
A	Amper
AC	Alternatif Akım
AISI	<i>ing. American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>ing. American Society for Testing and Materials</i>
B	Bor
BAP	Bor Amonyum Perklorat
BN	Bor Nitrit
BPN	Bor-Potasyum Nitrat
BPP	Bor Potasyum Perklorat
B₂O₃	Borik Oksit
BO	Bor Oksit
B₂O₂	Dibordioksit
cal	Kalori
cc	Santimetreküp
cm²	Santimetre Kare
cm³	Santimetre Küp
CO₂	Karbon Dioksit

DSC	<i>ing. Differential Scanning Calorimetry</i>
DTA	<i>ing. Differential Thermal Analysis</i>
g	Gram
HFP	Hekzafloropropilen
Hz	Hertz
J	Joule
K	Potasyum
K	Kelvin
KBO₂	Potasyummetaborat
KNO₃	Potasyum Nitrat
KClO₃	Potasyum Klorat
KClO₄	Potasyum Perklorat
K₂O	Potasyum Oksit
M	Metrik
Mg	Magnezyum
MIL	<i>ing. Military</i>
mg	Miligram
ml	Mililitre
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
M12	Metrik-12

NO	Azotoksit
nm	Nanometre
NSI	Nasa Standard Initiator
P	Güç
PMMA	Polimetilmetakrilat (Pleksi)
rpm	Devir/Dakika
s	Saniye
STD	<i>ing. Standard</i>
t	Zaman
TFE	Tetrafloroetilen
TGA	<i>ing. Thermal Gravimetric Analysis</i>
VF2	VinilidinFlorid
ZPP	Zirkonyum Potastum Perklorat
Zr	Zirkonyum
ZrKClO₄	Zirkonyum-Potasyum Perklorat
W	Watt
µm	Mikrometre
λ	Dalgaboyu
Ψ	Güç Yoğunluğu
ξ	Enerji Yoğunluğu

1. GİRİŞ

Piroteknik malzeme, katı fazda bulunan, kimyasal reaksiyona girdiğinde dışarıya ısı, ışık, gaz, sis veya ses verme özelliğine sahip malzemedir. Piroteknik malzeme, düşük hacimlerde en az ağırlığa sahip, yüksek alev sıcaklığına ulaşabilen malzemedir. Piroteknik malzemeler, oksijen varlığında yanma tepkimeleri ile kimyasal reaksiyona başlarlar. Bu nedenle bir piroteknik malzeme oksijen sağlayan oksit bileşiklerle kompozisyon oluşturarak kullanılır. Bu sayede piroteknik kompozisyonlar ortamda oksijen olmadan tutuşma sıcaklığına geldiklerinde reaksiyona başlayabilirler.

Piroteknik kompozisyonlar özellikle savunma sanayiinde; roketlerde, füzelerde, ağır silah sistemlerinde, savaş uçağı koltuk fırlatma aygıtlarında, hava yastığı sistemlerinde, havai fişek ve buna benzer birçok sistemlerde sıkça kullanılmaktadır.

Piroteknik sistemlerin dünyada geniş ölçüde kullanılmasına karşın, sadece son 20 yılda piroteknik sistemler ile ilgili önemli çalışmalar yapılmaktadır [1]. Bu çalışmalar, katı fazda gerçekleşen yanma reaksiyonlarını etkileyen parametrelerin neler olduğunu göstermektedir. Bu parametreler arasında piroteknik içerisinde oksitleyicinin varlığı, piroteknik bileşenlerin ortalama tanecik boyutları, yakıt ve oksitleyicilerin saflık değerleri, yakıt üzerindeki oksit tabakasının varlığı vb. bulunmaktadır [1].

Günümüzde yakıt olarak sıkça Zirkonyum (Zr), Magnezyum (Mg) ve Bor (B) piroteknikleri kullanılmaktadır. Zr, Mg ve B, oksidasyon reaksiyonları sonucunda yüksek ısı veren enerjik malzemelerdir. Potasyum Klorat (KClO_3), Potasyum Perklorat (KClO_4) ve Potasyum Nitrat (KNO_3) ise piroteknik sistemlerde oksitleyici olarak sıkça kullanılmaktadır [1]. Günümüzde Zirkonyum-Potasyum Perklorat (ZrKClO_4) ve Bor-Potasyum Nitrat (BKNO_3) piroteknik kompozisyonlar sıkça kullanılmaktadır. Birçok piroteknik kompozisyon yapısında viton ve nitroselüloz gibi bağlayıcıları içermektedir. Bazı piroteknik kompozisyonlara sürtünme hassasiyetini azaltmak için grafit tozu da ayrıca eklenmektedir. Ancak piroteknik kompozisyonun formülasyonundaki en ufak değişiklik bile piroteknik malzemenin karakteristik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir [1, 2].

Zirkonyum-Potasyum Perklorat (ZPP), piroteknik sistemlerde birincil piroteknik malzeme olarak kullanılmakta ve yüksek yanma hızı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bor-Potasyum Nitrat (BPN) ise genel olarak ikincil piroteknik olarak kullanılmaktadır. BPN pirotekniğin kullanılmasındaki bazı avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

- Yanma hızının basınca duyarlılığının az olması,
- Düşük basınçlarda yüksek yanma hızı elde edilmesi,
- Vakum altında kolay ateşlenebilme özelliği,
- Yanma hızının sıcaklığa duyarlılığının az olması,
- Yanma basıncındaki hassasiyetin düşük olması,
- Raf ömrünün uzun olması,
- Sıcaklığa karşı kararlı olması,
- Yanma sıcaklığının yüksek olması ve sıcak tanecikler yayması.

BPN piroteknik tozun üretiminde raf ömrünü arttırmak ve presleme sonucu elde edilecek farklı geometrik yapılara sahip tabletlerin mekanik dayanımlarının artırılması için yapıya polyester bağlayıcı katılmaktadır. En az hacimde en yüksek miktarda BPN içeren tablet formundaki elde edilen piroteknik, toz formunda üretilen BPN piroteknikle birlikte kullanılabildiği gibi, toz ve tablet formundaki piroteknikler ayrı ayrı da kullanılabilmektedir. BPN pirotekniğinin en önemli özelliklerinden birinin kısa sürede yüksek alev sıcaklığına ulaşması olarak gösterilmektedir. BPN pirotekniğinin ateşlenmesinden sonra milisaniyeler içerisinde yanma reaksiyonu tamamlanmaktadır. BPN pirotekniği yanma sonucunda en az 2900°C'lık alev sıcaklığına ulaşmakta, yanma ürünleri de %60 oranında gaz fazında bulunmaktadır.

Toz ve tablet formunda üretilmiş BPN pirotekniklerin tutuşma sıcaklıkları TGA veya DSC yöntemleriyle, kalorifik değerleri kalorimetre kullanılarak karakterize edilmektedir [2]. Ayrıca bu pirotekniklerin yanma hızının ölçülmesi de önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Yanma hızı çalışmaları genel olarak

BPN pirotekniklerin başka bir piroteknik ateşleyiciyle tutuşturulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak, başka bir piroteknik ateşleyicinin kullanılması yanma hızı ölçümlerinde doğru sonuçlar vermemektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, savunma sanayiinde ihtiyaç duyulan ateşleyici sistemlerinde kullanılacak BPN piroteknik malzemenin askeri standarda göre uygun üretilmesi, üretilen pirotekniğin ateşlenme ve ateşlenmeme karakteristiğini yeni tasarlanan bir lazer ateşleme sistemi kullanarak belirlenmesidir. Bu bağlamda, BPN piroteknik tozunun üretimi sırasında dünya genelinde kullanılan MIL-P-46994B askeri standardı referans olarak alınmış ve standartta belirtilen gereksinimler karşılanarak BPN piroteknik tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca aynı standartta BPN pelet için belirlenen boyutsal özellikteki ve yoğunluktaki pelet üretimleri de gerçekleştirilerek, peletlerin yeni tasarlanan bir lazer ateşleme sistemi ile ateşlenme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarla BPN peletlerin ateşlenme ve ateşlenmeme karakteristikleri belirlenmiş ve yanma hızları ölçülerek, MIL-P-46994B askeri standartta verilen yanma hızı gereksinimini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, Bor-Potasyum Nitrat pirotekniğini oluşturan bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile pirotekniğin balistik özellikleri verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, piroteknik kompozisyonunu oluşturan bileşenlerin ağırlıkça oranlarından, pelet üretiminden ve peletin balistik özelliklerinden de bahsedilmiştir.

2.1. Piroteknik Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Piroteknik kompozisyon üretirken dikkat edilmesi gereken parametrelerin başında, kullanılan piroteknik bileşenlerin saflık oranı, tanecik boyutu, tanecik geometrisi ve nem içeriği gelmektedir. Piroteknik malzemelerin yanması, 1500°C - 4000°C arasında sıcaklığa ulaşan redoks tepkimeleridir [2].

Piroteknik kompozisyonlarda sıkça kullanılan B, Zr ve Mg metal tozlarının fizikokimya özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Piroteknik Malzeme Üretiminde Kullanılan Metal Tozlarının Özellikleri [2]

Malzeme	Moleküler Ağırlığı	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
B	10,82	1,73	2050	2550
Zr	91,22	6,52	1530	2900
Mg	24,32	1,74	650	1102

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere oda şartlarında katı halde bulunan piroteknik metal tozlarının erime ve kaynama noktaları oldukça yüksektir.

Piroteknik kompozisyonlarda kullanılan oksitleyici bileşenlerin fiziksel özellikleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Piroteknik Malzeme Üretiminde Kullanılan Oksitleyicilerin Fiziksel Özellikleri [1,2]

Malzeme	Moleküler Ağırlığı	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	Ayrışma Sıcaklığı (°C)
KNO ₃	101,11	2,109	339	700
KClO ₄	138,65	2,52	610	-
KClO ₃	122,55	2,34	356	472

Çizelge 2.2’de görüldüğü üzere piroteknik kompozisyonlarında kullanılan oksitleyiciler, piroteknik metal tozlara göre erime ve ayrışma noktaları (*ing. decomposition*) oldukça düşüktür. Bu durum, katı fazdaki kimyasal reaksiyonların ilk olarak oksitleyici malzemelerde gerçekleştirerek piroteknik metal tozları için oksijen sağlandığını göstermektedir.

Piroteknik malzemelerin genel davranış özellikleri şu şekilde incelenebilmektedir [2] :

- Termal davranışlar Termal Gravimetrik Analizle (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre’de (DSC) incelenmektedir.
- Ateşlenme Sıcaklığı (tutuşma sıcaklığı, *ing. ignition temperature*) DSC’de incelenebilmektedir.
- Yanma sonucu açığa çıkan ürünler önce DSC’de ve sonrasında kütle spektrometrede incelenebilmektedir.

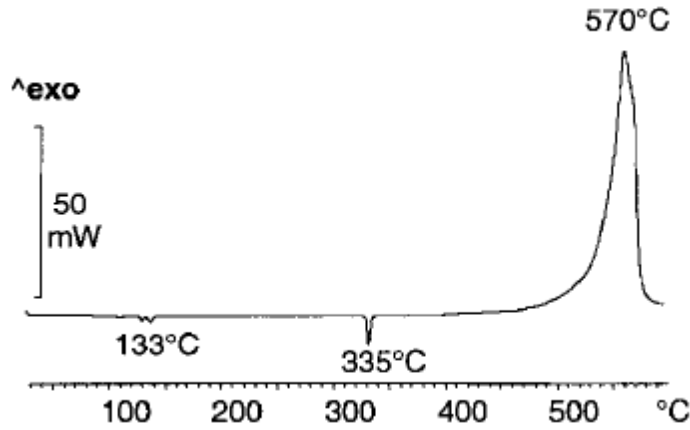
Pirotekniklerin yanma reaksiyon sonuçlarına etki eden en önemli parametreler şu şekilde listelenmektedir:

- Bileşen tipleri
- Oksijen dengesi
- Tanecik boyutu/geometrisi
- Bağlayıcı çeşidi/konsantrasyonu
- Karışım prosesi

2.2. Bor Potasyum Nitrat Pirotekniği

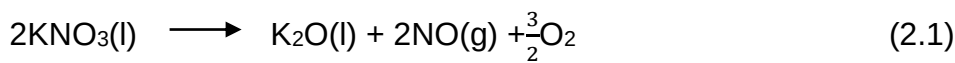
2.2.1. BPN Piroteknik Tozunun Kimyasal Analizi

Bor potasyum nitrat piroteknik tozunun termal davranışları TGA ve DSC’de incelendiğinde Şekil 2.1’deki grafik elde edilmiştir [2]. Analizlerde kullanılan bor potasyum nitrat piroteknik tozunda ağırlıkça %20 oranında bor ve %80 oranında potasyum nitrat bulunmaktadır. Grafikten 130-135°C’da ilk faz değişiminin olduğu ve potasyum nitratın kristal yapısının değiştiği, ikinci faz değişiminin 335°C’da gerçekleşerek potasyum nitratın eridiği anlaşılmaktadır. Yine aynı şekilden 570°C’da ekzotermik bir reaksiyonun gerçekleştiği gözlenmektedir. Ekzotermik reaksiyonun olduğu sıcaklık BPN pirotekniğin tutuşma veya ateşlenme sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1. BPN Piroteknik Tozunun Termal Davranışı [2]

Yapılan başka bir araştırmada TGA ve DSC analizlerinde potasyum nitratın ayrışma evresinin iki sıcaklık aralığında gerçekleştiği belirtilmiştir. 500-770°C arasındaki kütle kaybı $72,0 \pm 1,2$ iken, 770-1000°C arasındaki $14,0 \pm 1,0$ olmaktadır [3]. Potasyum nitratın ayrışma tepkimesi ve ayrışma sonucu açığa çıkan oksijenin bor ile girdiği tepkime Eşitlik 2.1 ve 2.2’de verilmiştir.



Potasyum nitratın ayrışması ile K_2O , NO ve O_2 açığa çıkmaktadır. Çıkan oksijen, bor ile tepkimeye girerek yanma reaksiyonunu oluşturmaktadır.

Krishnan et. al [4]'un yaptıkları çalışmada ise bor ile potasyum nitratın tepkimesi sonucunda $BN(s)$, N_2 , B_2O_3 , BO , B_2O_2 ve KBO_2 ana ürünlerinin oluştuğundan bahsedilmektedir.

2.2.2. BPN Piroteknik Tozunun Hazırlanması

2.2.2.1. Kompozisyon Oranı

BPN piroteknik tozunun hazırlanmasında bor metal tozu enerjik malzeme, potasyum nitrat oksitleyici olarak kullanılmaktadır. Bu iki toz bileşeni bir arada tutabilmek, tablet formuna getirebilmek ve raf ömrünü arttırabilmek için belirli oranda polyester bağlayıcı kullanılmaktadır.

BPN piroteknik tozu içerisindeki bor ve potasyum nitrat ağırlıkça oranları %25/%75 [2, 4, 5], %30/%70 [6] veya %20/%80 [7] şeklinde ayarlanmaktadır. Polyester bağlayıcı ise %5 civarında sabit tutulmaktadır [8].

BPN pirotekniği özellikle savunma sanayisinde sıkça kullanıldığı için üretimi ve karakteristik özellikleri ile ilgili olarak çeşitli standartlar mevcuttur. İlk standart 1982 yılında MIL-P-46994B adı altında askeri standart olarak ABD'de yayınlanmıştır. MIL-P-46994B standardına göre BPN piroteknik özellikleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. MIL-P-46994B Standardında Belirtilen BPN Pirotekniğin Özellikleri

Bileşen	Referans Standart	İşlevi	% (a/a)
Bor Metal Tozu	MIL-B-51092	Enerjik Malzeme	23,7±2,0
Potasyum Nitrat	MIL-P-156	Oksitleyici	70,7±2,0
Polyester Bağlayıcı	MIL-P-81351	Bağlayıcı	5,6±2,0

2.2.2.2. Tanecik Boyutu ve Saflık Analizi

Çizelge 2.4'te MIL-P-46994B standardında tanımlanan bileşenlerin genel özellikleri ve ilgili standartlar verilmiştir.

Çizelge 2.4. BPN Piroteknik Tozu Bileşenlerinin Özellikleri

Bileşen	İlgili Standart	Özellik
Bor Metal Tozu	MIL-B-51092	Tanecik boyutu: en fazla 1,5 µm Bor: %90-92 (a/a) Mg: < %8 (a/a)
Potasyum Nitrat	MIL-P-156	Tanecik boyutu: en fazla 15 µm
Polyester Bağlayıcı	-	Hızlandırıcı: Kobalt Naftanat %0,5±0,01 (a/a)
	MIL-R-7575 Derece A, Sınıf O, Form K	Polyester Reçine: Laminac 4116 veya 4110, %98,0±1,0 (a/a)
	MIL-P-81351	Katalizör: Metil Etil Keton Peroksit (MEKP) %1,5±0,1 (a/a)

MIL-P-46994B standardında özellikle bor ve potasyum nitratın saflık ve tanecik boyutuna dikkat çekilmiştir. Tanecik boyutunun bor için 1,5 µm'den ve potasyum nitrat için 15 µm'den küçük olması gerektiği vurgulanmıştır.

Krishnan et al. [4]'un yaptıkları çalışmada BPN pirotekniği içerisindeki bor (saflık %95) oranı ağırlıkça %25 ve potasyum nitrat (saflık % 99,5) oranı ağırlıkça %75 olarak seçilmiştir. Aynı çalışmada, bor ve potasyum nitratın ortalama tanecik boyutlarının sırasıyla 1 µm ve 75 µm olduğu da belirtilmiştir.

Bhingarkar ve Singh [5] tarafından yapılan çalışmada bor (saflık %97) tanecik boyutunun 1 µm'nin altında, potasyum nitrat tanecik boyutunun ise 90 µm'nin altında kullanıldığı belirtilmiştir.

Lai'nin [9] BPN pirotekniğinin yaşlanması üzerinde yaptığı çalışmada piroteknik malzemenin zamanla nem ile reaksiyona girerek oksit ve hidroksit bileşenlerini oluşturduğundan, bu durumun piroteknik malzemenin servis ömrü için önemli bir faktör olduğundan bahsedilmiştir. Ayrıca, piroteknik malzemenin toz veya tablet formunun, bileşenlerinin saflık oranlarının ve tanecik boyutlarının yaşlanma sürecini etkileyen en önemli etkenler olduğunu belirtmişlerdir.

BPN pirotekniği üretimi sırasında bağlayıcı kullanılmadığı durumlarda, piroteknik toz neme karşı aşırı duyarlı olmakta ve yaşlanma çok hızlı gerçekleşmektedir. Ancak, polyester bağlayıcı kullanıldığında yaşlanmanın geciktiği, hatta servis ömrünün sonsuz olduğu Lai [9] tarafından ayrıca belirtilmiştir. Aynı çalışmada BPN piroteknik tozun %80 ve daha yüksek nem oranlarında ve oda sıcaklığında kaldığı durumlarda raf ömrünün 6 aydan daha kısa olduğu belirtilmiştir. Bu duruma, bor metal toz içerisinde bulunan %8 oranındaki magnezyum neden olmakta, magnezyum nem ile reaksiyona girerek oksitlenmektedir. Magnezyum-oksit bileşikler tozun veya tabletin yüzeyinde oluşmakta ve bu durum piroteknik tozunun ateşlenebilirliğini, tepe basıncını ve tepe basıncına ulaşma süresini değiştirmektedir. Oksit tabakası gözle veya düşük büyütme oranına sahip mikroskopla rahatlıkla görülebilmektedir. Oksitlenen piroteknik malzemenin kurutma fırınlarında belirli sıcaklıklarda ve sürelerde tekrar kurutulmasının da işe yaramayacağı ayrıca vurgulanarak belirtilmiştir [9].

2.2.2.3. BPN Piroteknik Tozu Balistik Özellikleri

MIL-P-46994B standardına göre üretilen BPN piroteknik tozun balistik özellikleri Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. MIL-P-46994B Standardında Verilen BPN Piroteknik Tozun Balistik Özellikleri

Yoğunluk (g/cm³)	Ölçülebilir Değil
Nem Oranı (%)	En Yüksek 0,75
Yanma Hızı (mm/s)	En az 31,75
Kalorifik Değer (cal/g)	En az 1500

Çizelge 2.5’de belirtildiği üzere BPN piroteknik tozun kalorifik değeri raf ömrü boyunca en az 1500 cal/g, yanma hızı ise en az 31,75 mm/s olmalıdır. Ancak BPN piroteknik tozun yanma hızı basınç ile artacağı için kullanıldığı yer ve kullanılan ateşleyici diğer etken parametrelerdir. Nem değeri, BPN piroteknik tozun özelliğini olumsuz etkileyen bir parametredir. Bu nedenle standartta bu değer en yüksek % 0,75 olarak belirtilmiştir. Çizelgede “Ölçülebilir Değil” olarak ifade edilen yoğunluk parametresi, standartta herhangi bir değer olarak belirtilmemiştir. Ancak, yapılan analizlerle BPN piroteknik tozun teorik en yüksek yoğunluğu yoğunluk tayini ile bulunabilmektedir.

Çizelge 2.6’da literatürde farklı kompozisyonlarda elde edilen BPN piroteknik tozların termal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. BPN Piroteknik Tozun Termal Özellikleri

B (%)	PN (%)	Bağlayıcı (%)	Alev Sıcaklığı (°C)	Yanma Entalpisi (kJ/kg)	Isı Kapasitesi (J/g.K)	Referans
25	75	0	2910	-	1,16	[4]
25	75	0	2946	-3195	1,4	[5]
30	70	0	-	-4021	1,62	[7]
20	80	0	-	-5221	1,62	[7]

Krishnan et al. [4]’un yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %25 bor ve ağırlıkça %75 potasyum nitrat ile elde ettikleri BPN piroteknik tozun alev sıcaklığını 2910°C ve kalorifik değerini yaklaşık olarak 1600 cal/g olarak bulmuşlardır.

Bhingarkar ve Singh [5] yaptıkları çalışmada BPN pirotekniği üretiminde bor oranını ağırlıkça %25 ve potasyum nitrat oranını ağırlıkça %75 olarak belirlemişler ve bağlayıcı kullanmamışlardır. Çalışma sonunda, BPN

pirotekniğinin alev sıcaklığı 2946°C olarak saptanmıştır. Hesaplamalarında BPN pirotekniği yanma reaksiyonu entalpi değerini -3195 kJ/kg olarak bulmuşlardır.

Roduit ve grubu [7] BPN kompozisyonunda bor oranı ağırlıkça %20 ve %30 olmak üzere iki farklı bor oranı kullanmışlardır. Çalışma sonunda entalpi değerleri hesaplanmış ve %20 bor oranına sahip piroteknik tozun entalpi değerinin daha yüksek olduğunu saptanmıştır.

Çizelge 2.7’de farklı oranlarda elde edilen BPN piroteknik tozların yanma hızı, ateşlenme gecikmesi ve kalorifik değeri balistik özellikler olarak incelenmiştir. Çizelgeden piroteknik tozların kalorifik değerlerinin 1570 ile 1751 cal/g arasında değiştiği görülmektedir. Yanma hızındaki belirgin farklılık ise çalışmalarda kullanılan BPN piroteknik tozlarının kompozisyon oranlarının farklı olmasından ve kullandıkları test aparatlarından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.7. BPN Piroteknik Tozunun Balistik Özellikleri

B (%)	PN (%)	Bağlayıcı (%)	Yanma Hızı (mm/s)	Ateşlenme Gecikmesi (ms)	Kalorifik Değer (cal/g)	Referans
20	80	0	-	-	1751	[2]
25	75	0	-	-	1570	[4]
25	75	0	-	60	-	[5]
30	70	10	7,03	24	1696	[6]

2.2.3. BPN Piroteknik Pelet Üretimi

Pelet terimi, herhangi bir tozun belirli bir yük altında preslenerek tablet haline getirilmesidir ve İngilizce “pellet”den Türkçe’ye çevrilmiştir. Piroteknik kompozisyonlar ilk olarak toz şeklinde üretilmektedir. Üretilen piroteknik toz elek işleminden geçirilerek üretim sırasında oluşan topaklanma giderilmekte ve kurutma işleminin ardından kullanım amacına yönelik olarak belirli yük altında preslenerek pelet haline getirilmektedir.

MIL-P-46994B standardında, BPN piroteknik tozundan farklı geometrilerde elde edilen peletlerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. MIL-P-46994B Standardında Verilen BPN Peletlerin Fiziksel Özellikleri

Tip	Geometri	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Ağırlık (mg)
IA	Silindirik	3,175	4,775	1,772	67
IB		3,175	2,540	1,542	31
IIA	Bi-Konveks	3,175	2,540	1,542	31
IIB		6,350	3,302	1,339	140
IIC		6,350	6,350	1,517	305
IID		12,700	6,350	1,324	1.065

Çizelge 2.8’den Tip IA ve IB geometrisine sahip peletlerin çapları aynı tutulduğunda, yoğunluklarının 1,54 ile 1,77 g/cm³ arasında değiştiği görülmektedir. Buradan Tip IA ve Tip IB pelet oluşturulurken farklı presleme yükleri kullanıldığı anlaşılmaktadır. Tip IA ve IB şeklinde peletlerin silindirik yapılarından dolayı alt ve üst yüzeylerinde keskin köşelerin oluştuğu, bu keskin köşelerin zaman içerisinde bulunduğu titreşim altında kırıldığı belirtilmiştir. Kırılmaların önüne geçilmesi için Tip II geometrisi geliştirilmiş ve piroteknik peletler aspirin şeklinde bi-konveks yapıda üretilmiştir. Tip II modelinde daha büyük çapta ve kalınlıkta peletler elde edildiği standartta ayrıca tanımlanmıştır.

2.2.4. BPN Piroteknik Peletlerin Balistik Özellikleri

Carr ve Thomas [8] ile Lai [9]’nin yaptıkları çalışmalarda MIL-P-46994B standardında bahsedilen Tip IA ve Tip II-D geometrilerine sahip BPN piroteknik peletlerin yanma hızları hakkında bilgiler vermişler ve sonuçlar Çizelge 2.9’da verilmiştir.

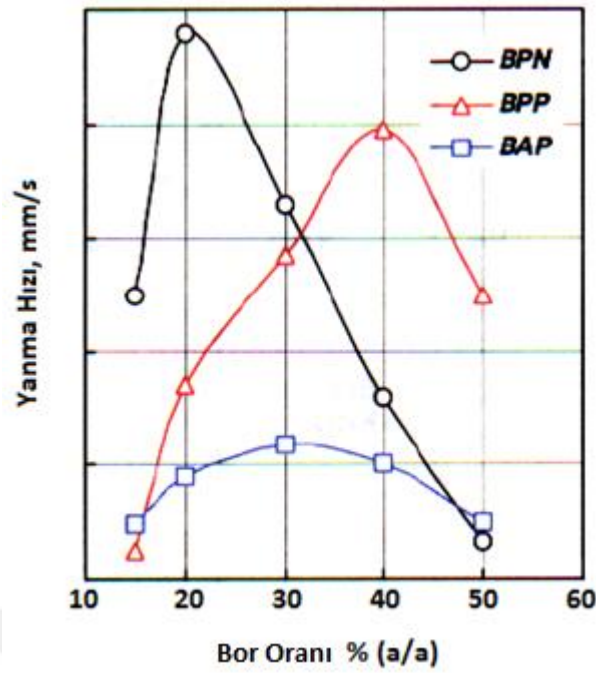
Çizelge 2.9. BPN Piroteknik Peletlerin Balistik Özellikleri [8,9]

Pelet Geometrisi	Yanma Hızı (mm/s)
Bi-Konveks II-D	42,7-61,2
Silindirik I-A	Tepe basıncına ulaşma süresi en fazla 15 ms

MIL-P-46994B standardına göre yanma hızının en az 31,7 mm/s olması gerekmektedir. Carr ve Thomas [8] ise yanma hızının 42,7-61,2 mm/s arasında değiştiğini saptanmışlardır. Bu durum ateşleme sırasında oluşan basıncın yanma hızını artırması şeklinde açıklanmıştır. Ayrıca, test sırasında BPN piroteknik peletlerin yüzeylerindeki kırılmaların yüzey alanını arttırdığı ve bu durumun tepe basıncını daha yükseğe çıkarabileceği vurgulanmıştır. BPN piroteknik peletlerin yüzeylerinde kırılmaların en aza indirilmesi için peletlerin ezilme dayanımının (*ing. crush strenght*) 15000 gramın üzerinde olması gerektiği görülmüştür. Kullanılan geometrik yapıların farklı olmasının yanma hızını etkilemeyeceği, sadece peletlerde oluşabilecek kırılma oranını değiştireceği vurgulanmıştır.

Lai [9] yaptığı çalışmada BPN piroteknik peletlerin ateşlenmesi ile elde edilen ilk basıncın görüldüğü an ile tepe basıncı arasındaki sürenin en yüksek 15 ms olması gerektiğini belirtmiştir. Bu sürenin kısa olmasının nedeninin BPN piroteknik peletlerin ateşlenmesi için piroteknik ateşleyicinin kullanılması olduğu ayrıca belirtilmiştir.

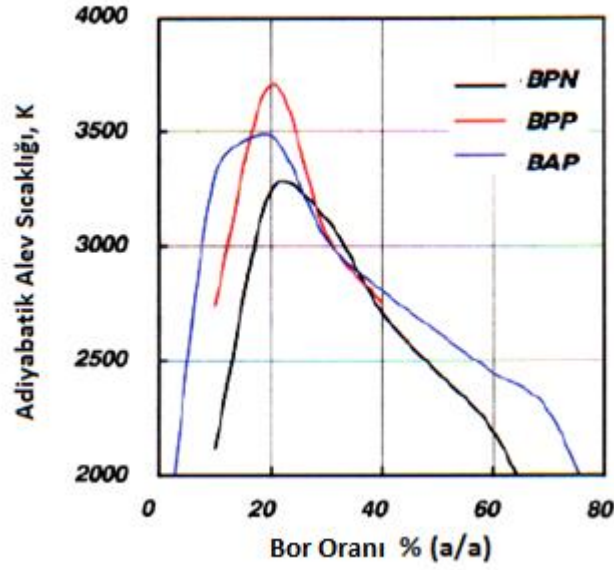
Miyata [10] çalışmasında farklı bor ve potasyum nitrat oranları ile ağırlıkça %3 Viton-A kullanarak hazırladığı BPN piroteknik tozlarından 7 mm çapında ve 10 mm kalınlığında peletler elde etmiş ve yanma hızı ile alev sıcaklığı ölçümleri yapmıştır. Çalışmada Bor Potasyum Perklorat (BPP) ve Bor Amonyum Perklorat (BAP) piroteknik tozlarından aynı geometride elde edilen peletlerin yanma hızları da ayrıca saptanmıştır. BPN, BPP ve BAP piroteknik peletlerin yanma hızı sonuçları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Farklı Bor Oranlarında Hazırlanan BPN, BPP ve BAP Piroteknik Peletlerin Yanma Hızlarının Karşılaştırılması [10]

Şekil 2.2'den görüldüğü üzere %20 bor oranı içeren piroteknik tozdan elde edilen BPN piroteknik peletlerin yanma hızı en yüksek çıkmıştır. Bor oranındaki daha fazla artışın yanma hızını düşürdüğü yine aynı grafikten gözlenmektedir. BPP piroteknik pelet için ise bor oranının %40 olduğu durumda yanma hızının en yüksek olduğu görülmüştür. BAP piroteknik pelet için ise bor oranının %30 olduğu durumda yanma hızının en yüksek olduğu, ancak bor oranının azaldığı ve arttığı durumlarda yanma hızında önemli bir değişikliğin olmadığı saptanmıştır.

Aynı çalışmada BPN, BPP ve BAP piroteknik peletlerin adyabatik alev sıcaklıkları ayrıca incelenmiş ve adyabatik alev sıcaklığı sonuçları karşılaştırılmıştır. Her üç piroteknik için bor oranının ağırlıkça %20 olduğu durumda alev sıcaklığının en yüksek çıktığı, BPN piroteknik için alev sıcaklığının yaklaşık 3200 K (yaklaşık 2900°C) olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Farklı Bor oranlarında Hazırlanan BPN, BPP ve BAP Pirotekniklerinin Adyabatik Alev Sıcaklıklarının Karşılaştırılması [10]

2.3. Piroteknik Ateşleyici Sistemleri

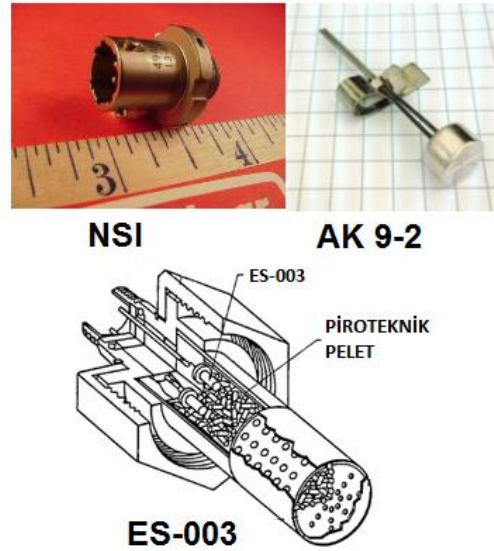
Günümüzde pirotekniklerin ateşlenmesi için en yaygın yöntem piroteknik üzerinden tel köprü ile akım geçirmektir. Tel köprüye iletilen akım sonucunda tel köprü ısınmakta ve açığa çıkan yüksek ısı piroteknik malzemeyi ateşlemektedir. Piroteknik malzemelerin bu şekilde ateşlenmesini sağlayan mekanizma veya aygıt “Piroteknik Ateşleyici” olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 2.10’da günümüzde yaygın olarak kullanılan ticari piroteknik ateşleyicilerden ES-003, NSI ve AK 9-2 piroteknik ateşleyicilerin özellikleri verilmiştir. Bu ateşleyicilerden NSI, NASA tarafından uydu fırlatma sistemlerinde kullanılan ve en yüksek güvenilirlik değerine sahip ateşleyicidir. Günümüzde özellikle ısıl pillerde sıkça kullanılmaktadır. Kullanılan tüm ateşleyicilerin ateşlenme süreleri 5 ms’den daha düşük olması nedeniyle birincil ateşleyiciler olarak kullanılmaktadır. Ateşleyicilerin içerisinde bulunan piroteknik miktarının farklı olması basınç çıktılarının farklı olmasına neden olmaktadır. Ateşleyicilerin kullanılacağı yere göre bu miktar değiştirilebilmektedir. Çizelge 2.10’da görüldüğü üzere ateşleyicilerin basınç çıktıları 10 cm³ hacme sahip kapalı bombada en az 8 bar olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.10. Çeşitli Ticari Piroteknik Ateşleyicilerin Özellikleri

Ateşleyici	Çıkış Basıncı (bar)	Ateşlenme Akımı (A)	Ateşlenme Süresi (ms)	Standart
ES-003	8,2	1,2-2,0 A	<5	MIL-STD-1512
NSI	40	3,5-5,0 A	<5	MIL-DTL-23659
AK 9-2	8,0	3,5-5,0 A	<5	MIL-DTL-23659

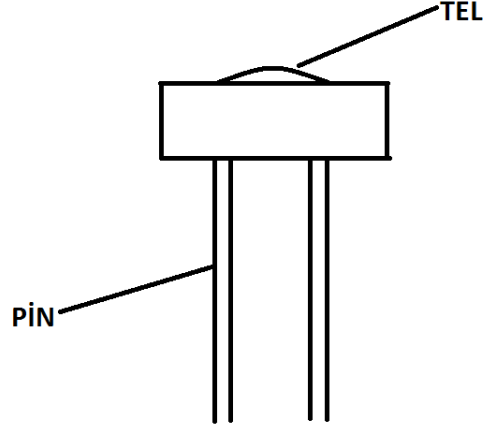
Çizelge 2.10'da belirtilen askeri standartlar, belirtilen ateşleyicilerin üretim sonrası doğrulanması için yapılacak testleri içermektedir. Çizelgede bahsedilen piroteknik ateşleyicilerin görselleri Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Piroteknik Ateşleyicilerin Görselleri

Yukarda belirtilen ateşleyicilerin içerisinde telne temas eden piroteknik olarak Zirkonyum Potasyum Perklorat (ZPP) pirotekniği kullanılmaktadır. BPN pirotekniği yanma hızının ve yanma basıncının ZPP pirotekniğine göre daha düşük olması nedeniyle ikincil piroteknik olarak kullanılmaktadır.

Literatürde kullanılan ateşleyici kapsülün şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Ateşleyiciye uygulanacak akım, ateşleme pimlerinden geçerek birincil piroteknik ile temas halinde olan tele ulaşmaktadır. Telden geçen akım telni ısıtarak piroteknik malzemenin ateşlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.5. Ateşleyici Kapsül Şematik Gösterimi

Tele sahip piroteknik ateşleyicilerde, elektrostatik boşalma, elektromanyetik alan, radyo frekansı absorpsiyonu, elektromanyetik titreşim veya operatör kaynaklı kontrol edilemeyen elektriksel enerji gibi etkilere bağlı istenmeyen ateşlenmeler olabilmektedir. Ateşleyici bileşenleri bu tarz etkilerden elektriksel yalıtım yolu ile kısmen uzaklaştırılmakla birlikte, yalıtım hiçbir zaman tam anlamıyla etkin olmamakta ve prosesi oluşturan bileşenlerin maliyetini artırmaktadır.

Elektriksel ateşleme sistemlerinden kaynaklanan bu sorunları gidermek amacıyla, enerjik malzemelerin, lazer ile ateşlenme çalışmaları 1960 yılında başlamıştır. Lazer ile gerçekleştirilen sonraki çalışmalar, ikincil patlayıcıların doğrudan lazer kaynakları ile ateşlenmesine yönelik olup, bu tez çalışması ile hassasiyeti yüksek birincil patlayıcılara duyulan ihtiyacın ortadan kalkması ve sistemin istem dışı ateşlenmesinin engellenmesi amaçlanmıştır.

2.4. Piroteknik Malzemenin Lazer İle Ateşlenmesi

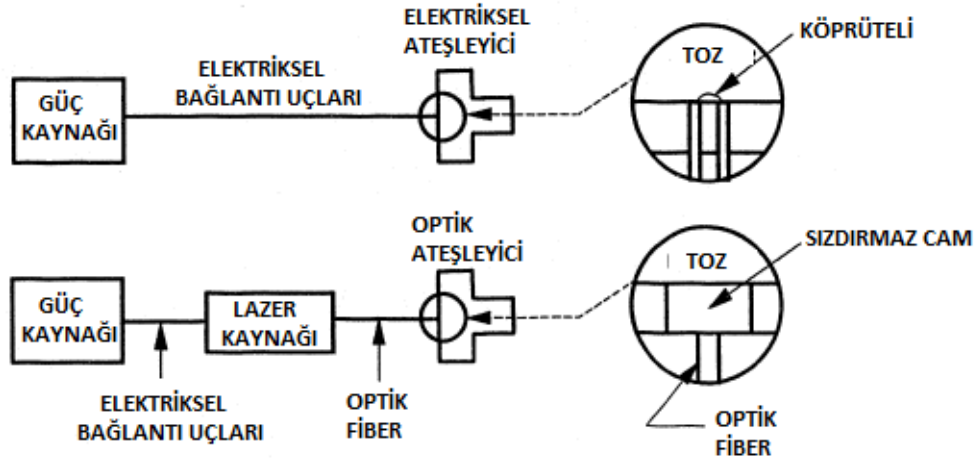
Lazer ateşlenme sistemlerinin, elektriksel ateşleme sistemlerine kıyasla avantajları aşağıda listelenmiştir [11-14].

- Elektromanyetik alanlardan, elektrostatik boşalmadan ve kaçak elektrik enerjisinden dolayı oluşabilecek istem dışı ateşlenmeleri söz konusu değildir.
- Birçok piroteknik malzeme düşük miktarda enerji ile ateşlenebilir. Bu sebeple düşük enerjili diyotlar kullanılmaktadır.
- Tamamlanmış sistemin kalite kontrolü, sistem güvenliğini etkilemeden yapılmaktadır.
- Lazer ateşleme ekipmanları herhangi bir elektrik akımından bağımsız olduğundan, güvenlik ve teçhizat sistemleri tamamen elektronik aksamdan oluşmaktadır.
- Lazer çıkış enerjisi ve gücü, köprü teli sistemlerine göre daha yüksek seçilebileceği için, düşük hassasiyette piroteknik malzemelerin ve patlayıcıların kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.
- Tel bulunmadığından, tel korozyonu yoktur. Böylelikle sistemin güvenlik ve raf ömrü uzamaktadır.
- Lazer ateşleyici, tel bulunan sistemlere göre daha küçük ve hafiftir.
- Tek kullanımlık tel sistemlerine kıyasla lazer sistemleri birçok kez kullanılabilir.
- Kompleks mekanik güvenlik ve teçhizat sistemlerine gerek yoktur.
- Üretim maliyeti daha düşüktür.

2.4.1. Lazer Ateşleme Sistemlerinin Yapıları

Piroteknik malzemeleri ateşleyebilmek için Ruby, Nd:YAG, CO₂, Nd:Cam, Argon İyon, Lazer Diyotlar gibi çeşitli lazer kaynakları kullanılmaktadır.

Şekil 2.6'da elektriksel ve lazer ateşleme sistem tasarımlarının karşılaştırıldığı şematik çizimler verilmiştir.



Şekil 2.6. Elektriksel ve Lazer Ateşleme Sistemlerinin Şematik Karşılaştırması

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere her iki ateşleme sistemi için bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır.

Lazer ateşleme sistemlerini etkileyen temel iki unsur, lazer güç kaynağı ve piroteknik malzemedir. Lazer parametreleri aşağıda belirtilmiştir [11];

- Foton Enerjisi: Lazer kaynaktan çıkan lazer ışınının dalgaboyu olarak tanımlanmaktadır ve dalgaboyu ölçü birimi nanometre (nm) olarak verilmektedir.
- Lazer Ortalama Güç: Darbeli lazer sistemlerinde 1 saniye içerisinde uygulanan lazerin ortalama gücüdür (W).
- Lazer Tepe Gücü: Lazer ışının ulaştığı maksimum güç değeridir (W).
- Lazer Güç Yoğunluğu: Birim kesitteki lazer ışının gücüdür (W/cm^2)
- Lazer Işın Dağılımı: Lazer ışının Gaussian profil yapısında ilerlemesidir.
- Lazer Işın Süresi: Lazer ışının hedefe ulaştığı an ile bittiği an arasında geçen süredir (genellikle milisaniye olarak ifade edilmektedir).
- Lazer Işın Çapı: Lazer ışının odak noktasındaki çapıdır (μm).

Lazer ateşleme sisteminde kullanılacak piroteknik peletleri etkileyen parametreler ise [11];

- peletin termal iletkenliği,
- peletin homojenliği,
- peletin ateşlenme sıcaklığı,
- peletin kimyasal kompozisyonu ve morfolojisi,
- pelet yüzeyinin spektral absorplama miktarı,
- pelet içerisindeki optik özellikleri artırıcı katkı maddelerinin miktarıdır.

Piroteknik peletler ateşlenmeleri için belirli bir enerjiye ihtiyaç duyarlar. Peletler bu enerjiyi lazer ışınından alacak ise piroteknik peletin spektral absorplama miktarı önem kazanmaktadır. Işımanın %100'ünü absorplayan maddelere siyah cisim (*ing. black body*) denir. Ancak piroteknik peletlerin lazer ışınının %100'ünü absorplaması mümkün değildir. Piroteknik peletlerin yüzey kalitesi, rengi, tanecik boyutu ve benzeri etmenlerden dolayı lazer ışının belirli bir kısmı pelet yüzeyinden yansımaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda argon-iyon lazer, diyot lazer ve Nd:YAG (*ing:neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) lazerin kullanıldığı görülmüştür. Farklı tip lazer sistemler farklı dalga boylarına sahiptir. Farklı dalga boylarındaki lazer ışınları ise farklı foton enerji seviyelerine sahiptirler. Bu nedenle lazer ateşleme sistemlerinde kullanılan lazerin güç ve enerji ölçümleri güç ölçer (*ing. powermeter*) ile yapılmaktadır.

Günümüzde piroteknik ateşleme sistemlerinde kolay bulunabilirliği ve küçük boyutlarda olması nedeniyle diyot lazer tercih edilmektedir. Nd:YAG lazer ise genellikle lazer kaynak işlemlerinde kullanılmaktadır. Literatürde verilen ZPP ve BPN piroteknik malzemelerin farklı lazer tipleri ile ateşlenme özellikleri Çizelge 2.11'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.11. Farklı Lazer Tiplerinde Farklı Piroteknik Malzemelerin Ateşlenme Özellikleri

Lazer Çeşidi ve Dalga Boyu	Piroteknik Malzeme	Lazer Güç Yoğunluğu (W/cm ²)	Lazer Uygulama Süresi (ms)	Lazer Enerji Yoğunluğu (J/ cm ²) (Hesaplanan)	Referans
Ar-lyon $\lambda=500$ nm	BPN	55	260-570	14,3-31,4	[12]
Diyot Lazer $\lambda =980$ nm	BPN	12700	2	25	[13]
Nd:YAG $\lambda = 1064$ nm	ZPP	7700	20	154	[14]
Diyot Lazer $\lambda = 808$ nm	BPN	6660	20,6	137	[15]
Diyot Lazer $\lambda = 815$ nm	BPN	2450	16	39,2	[16]

Ahmad ve Russell [12] multimod lazerle farklı dalga boylarında üretilen lazer ışınlarını kullanarak barut, BPN ve Magnezyum-Potasyum Nitrat pirotekniklerini ateşlemişlerdir. Araştırmacılar 50 mg BPN piroteknik toza 55 W/cm² lazer güç yoğunluğu ile 260 ms ve 570 ms’de lazer uygulamıştır. Verilen güç yoğunluğu ve uygulanan lazer uygulama sürelerinden 14,3 J/cm² ve 31,4 J/cm² olarak hesaplanan enerji yoğunlukları Çizelge 2.11’de sunulmuştur.

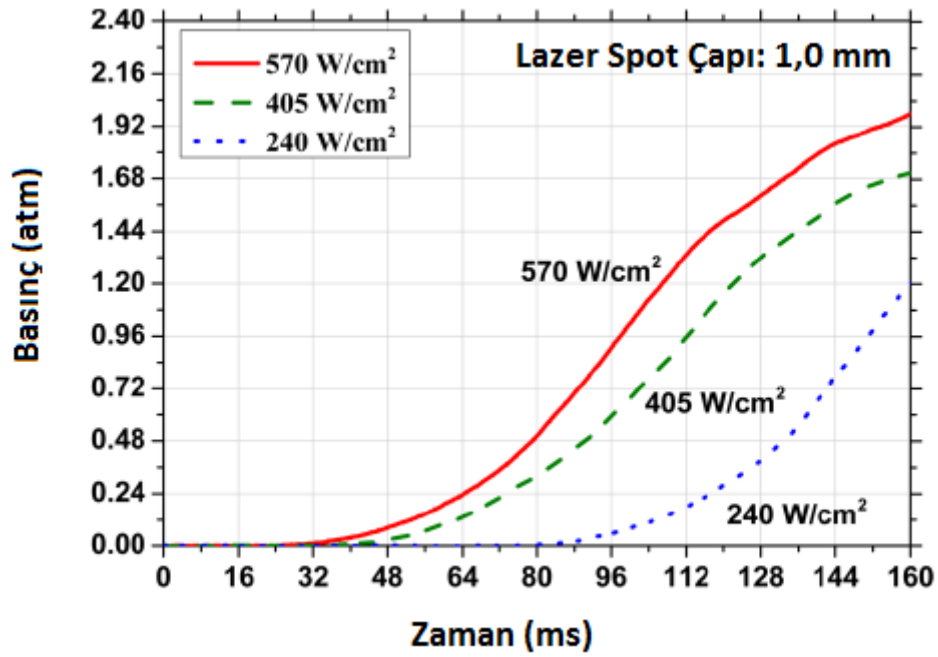
Lee et al. [13] BPN piroteknik tozu aseton ile ıslatarak lazer fiber optik kablo ucuna yerleştirmiştir. 2 saat kurutma işlemi yaparak piroteknik tozun fiber kablo ucunda kalması sağlanmıştır. Çalışmada 1W lazer gücüne ve 980 nm dalga boyuna, 0,100 mm lazer çapına sahip diyot lazer kullanılarak BPN pirotekniği ateşlendiğinde, ateşlenme enerji yoğunluğu 25 J/cm² olarak hesaplanmıştır.

Yong et al. [14] yayınladıkları özet makalede ZPP pirotekniğini Nd:YAG lazer kullanarak ateşlediklerini belirtmişlerdir. Kullanılan lazer güç ve lazer uygulama süresinden BPN pirotekniğin ateşlenme enerji yoğunluğu 154 J/cm² olarak hesaplanmıştır.

Ahmad ve Russell [15] bir diğ er çalışmalarında BPN pirotekniğini 100-1000  m arasında değişik lazer spot çaplarında lazer ile ateşlediklerini ifade etmişlerdir. Çizelge 2.11'de 100  m lazer spot çapı ile yaptıkları çalışma sonuçları verilmiştir. Çalışma sonucunda BPN pirotekniğini 137 J/cm² lazer enerji yoğunluğu ile 17,4 ms'de ateşlemişlerdir.

Gillard ve Opdebeck [16] BPN ve BPP pirotekniklerini 7 W - 815 nm lazer diyot ile ateşleme çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada tanecik boyutları 1  m olan bor ve 25  m olan potasyum nitratla ağırlıkça %20, %30 ve %40 bor kullanılarak hazırlanan peletler kullanılmıştır. Uyguladıkları farklı presleme yükleri ile BPN pelet içerisindeki gözenek oranını değişirmiştir. %21,5 gözenekliliğe sahip ağırlıkça %30 bor ve %70 potasyum nitrattan oluşan piroteknik peletlerin, 39,2 J/cm² lazer enerji yoğunluğu ile ateşlenme sonuçları  izelge 2.11'de sunulmuştur.

Sivan ve Haas [17] yaptıkları çalışmada kompozisyon oranları ağırlıkça %29 bor, %66 potasyum nitrat ve %5 polyester bağlayıcıdan (Laminac 4116) oluşan BPN piroteknik tozundan, yoğunluğu 1,65 g/cm³ ve çapı 7 mm olan peletler hazırlamışlardır. 10 W- 820 nm lazer diyot kullanarak kapalı bomba içerisinde BPN peletleri ateşleyerek yanma ürünlerini dalga boylarına göre incelemişlerdir. Lazer uygulama süresini en az 200 ms'ye ayarlamışlardır. Farklı lazer g   yoğunluklarında elde edilen ateşlenme sonuçları şekil 2.7'de verilmiştir. şekilden lazer güç yoğunluğu arttıkça ateşlenen BPN peletlerin tepe basıncına ulaşma sürelerinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 2.7. Farklı Lazer Güç Yoğunluklarında Ateşlenen BPN Peletler için Elde Edilen Basınçların Zamanla Değişimleri [17]

2.4.2. Piroteknik Malzemenin Lazer ile Ateşlenme Karakteristiği

Lazer sistemlerinde, piroteknik malzemelerin ateşlenme karakteristiğini etkileyen üç ana parametre vardır:

- ✓ Lazer Güç (P) ,
- ✓ Lazer Spot Çapı (d),
- ✓ Lazer Uygulama süresi (t).

Lazer güç, sistemlerde Watt (W) olarak, lazer spot çapı milimetre (mm) ve lazer uygulama süresi milisaniye (ms) olarak kullanılmaktadır. Ancak, lazer ateşleme sistemlerinde farklı dalga boyları, farklı spot çapları ve farklı lazer uygulama süreleri uygulandığı için genel olarak Güç Yoğunluğu (Ψ , W/cm²) veya Enerji Yoğunluğu (ξ , J/cm²) terimleri kullanılmaktadır.

Lazer ışının malzeme üzerine düştüğü yerdeki alan lazer spot alanı olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 2.3). Lazer güç yoğunluğu, lazer gücünün lazer spot alanına oranlanması ile bulunmaktadır (Eşitlik 2.4). Enerji yoğunluğu ise lazer güç yoğunluğunun lazer uygulama süresi ile çarpılması sonucunda elde edilmektedir (Eşitlik 2.5).

$$A = \frac{\pi d_{spot}^2}{4} \quad (2.3)$$

$$\Psi = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

$$\xi = \Psi \times t \quad (2.5)$$

2.5. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

Ölçme, bir nesnenin bazı özelliklerinin (kütle, uzunluk vb.) standart olarak belirlenmiş birimlere göre belirlenmesi işlemidir. Ölçme, bir büyüklük için yapılabilecek en iyi tahmin işlemidir. Laboratuvar da deneylerde elde edilen sonuçların ne oranda doğru olabileceği bazı yöntemlerle tahmin edilebilir. Bir veya iki analiz ile elde edilen sonucun gerçeği ne derece yansıttığının tahmin edilmesi oldukça güç hatta olanaksızdır. Bu nedenle, deneysel çalışma sonrasında elde edilen verilerin doğru bir şekilde kullanılabilmesi ve tahmin güvenilirliğinin artırılması için doğruluk (*ing. accuracy*), duyarlılık (*ing. precision*), ortalama (*ing. mean*), sapma (*ing. deviation*), güven aralığı (*ing. confidence interval*) ve güvenilirlik seviyesi (*ing. reliability level*) gibi terimler kullanılmaktadır [18-22].

2.5.1. Doğruluk ve Duyarlılık

Doğruluk, analiz sonucunun gerçek değere ne kadar yakın olduğunun (hata) ifadesidir. Duyarlılık ise yapılan ölçümlerin birbirine ne kadar yakın olduğunun (sapma) ifadesidir.

2.5.2. Ortalama Değer

Ortalama değer, bir analizde yapılan ölçümlerin toplamalarının ölçüm sayısına bölünmesi sonunda bulunan değerdir ve $\bar{x}$ ile gösterilir. Eşitlik 2.6'da ortalama değer formülü verilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2.6)$$

2.5.3. Sapma

Sapma, ölçümlerin duyarlılığının bir ifadesidir ve çeşitli şekillerde tanımlanabilir. Mutlak sapma (*ing. absolute deviation*), ortalama değer ile her bir ölçüm arasındaki farka denir. Eşitlik 2.7’de mutlak sapma ve Eşitlik 2.8’de adım aralığı (*ing. step size*) tanımlanmıştır.

$$x_2' \text{ nin mutlak sapması} = |x_2 - \bar{x}| \quad (2.7)$$

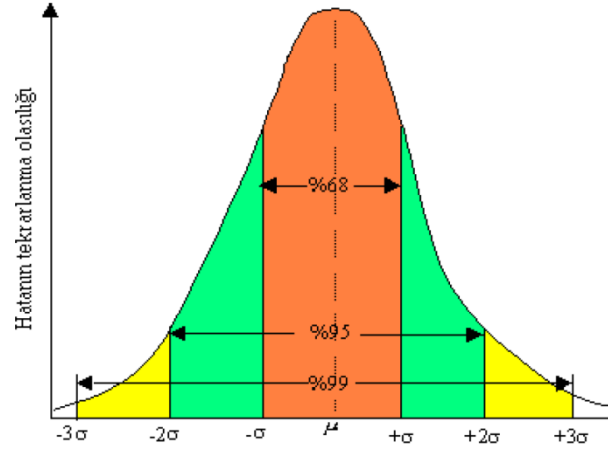
$$\text{adım aralığı} = d_1 = |x_i - \bar{x}| \quad (2.8)$$

İstatistiki değerlendirmelerde her bir ölçümden ziyade ortalama değerlerle ilgilenilir. Bunun için ortalama değer, standart sapma ve ölçüm aralığının hesaplanması gerekir.

Standart sapma (*ing. standard deviation*), “S” ile gösterilir ve duyarlılığın ölçümü için daha geçerli bir birimdir. Her bir ölçümün mutlak sapmalarının kareleri toplamının ölçüm sayısının bir eksiğine bölümünün kareköküne eşittir (Eşitlik 2.9).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.9)$$

Yapılan her analiz farklı sonuçlar verebilir. Bunun nedeni numune hazırlanırken yapılan hatalardır. Bu hatalar bir dereceye kadar azaltılabilse de tamamen giderilemez. Ortalama değer etrafında düzensiz dağılım gösterir. Bu tür hatalar için en iyi fikri normal dağılım eğrisi verir. Bir analizde ölçüm sayısı arttıkça yapılan hatanın yalnız belirsiz hatalardan geldiği kabul edilir. Analiz için sonsuz sayıda ölçüm yapıldığı kabul edilirse buradaki ölçümler; artık örneğin birer ölçümü olarak değil ölçümler kümesi olarak değerlendirilir. Bu kümenin aritmetik ortalaması artık $\bar{x}$ ile değil μ ile gösterilir. Böyle bir ölçümdeki hata dağılımı normal dağılım eğrisi adı verilen eğriyle gösterilir. Bu eğride y eksenini belli bir hatanın tekrarlanma olasılığını yani $x_i - \mu$ değerini gösterir (her bir $x - \mu$ değeri için bulunma frekansı), x eksenini üzerindeki σ ise kümenin standart sapmasıdır. Şekil 2.8’de normal dağılım eğrisi (*ing. Normal Distribution Curve*) örneği verilmiştir.



Şekil 2.8. Normal Dağılım Eğrisi

Normal dağılım eğrisi başlıca üç noktayı belirler:

1. Eğri simetrik olduğundan bir ölçümde pozitif hatalar kadar negatif hatalar da vardır. Bu nedenle gerçeğe en yakın değer aritmetik ortalamadır.
2. $\pm\sigma$: Toplam ölçümün % 32'sinin hatası $\pm\sigma$ kadardır.
3. $\pm3\sigma$: Toplam ölçümün ancak % 1 kadarının hatası $\pm3\sigma$ 'dır.

Böylece, az sayıdaki ölçüm ile sonsuz sayıdaki ölçümle varılabilecek sonuçlar tahmin edilmiş olur.

2.5.4. Güven Aralığı ve Güvenilirlik Seviyesi

Standart sapmanın hesaplanması analiz sonucu hakkında bir tahmin yapmayı sağlasa da bulunan ortalama değer gerçeğe ne kadar yakın olduğu bilinemez. Bu nedenle sonucun doğruluğu hakkında kullanılan matematiksel yöntemde, gerçek değer ortalama değere yakın bir aralıkta olduğu kabul edilir. Ortalama değere yakın olan bu aralığa "güven aralığı" denir. Bu aralık ne kadar geniş ise, gerçek değer bu aralığa düşme olasılığı o kadar fazladır. Bu aralığın sınırlarına "güvenlik sınırları" denir. Gerçek değer yüzde olarak bu aralıkta olma olasılığına ise "kesinlik seviyesi" (*ing. confidence level*) denir [18-22]. Kesinlik seviyesi Eşitlik 2.10'da tanımlanmıştır. Bu eşitlikte μ gerçek değeri, $\bar{x}$ ortalama değeri, S standart sapmayı, N ölçüm sayısını belirtmektedir. t ise seçilen kesinlik seviyesine ve ölçüm sayısına bağlı bir sabittir.

$$\mu = \bar{x} \pm t. \left(\frac{s}{\sqrt{N}} \right) \quad (2.10)$$

Piroteknik aygıtların başarılı bir şekilde çalışmasının belirlenmesinde kullanılacak en iyi yöntem, piroteknik aygıtları ateşlemektir [18] . Kullanılacak piroteknik aygıtların yüksek güvenilirlik değerine sahip olması gerekmektedir. Yüksek güven aralığı ve yüksek güvenilirlik değeri için, çok fazla sayıda piroteknik aygıtın istenilen gereksinimlerde ateşlenmesi gerekmektedir. Örnek olarak, bir piroteknik aygıtın %95 kesinlik seviyesinde ve %99,9 güvenilirlikte ateşlenebildiğini ispatlamak için 2996 adet piroteknik aygıtın hiç bir hata olmadan ateşlenmesi gerekmektedir [18]. Bu kadar yüksek sayıda aygıtın ateşlenmesi, üreticilere inanılmaz derecede maliyet getirmektedir. Bu nedenle, piroteknik aygıtların istenilen güvenilirlik değerlerinde olduğunu ispatlamak için bir takım istatistiksel çalışmalar yapılmıştır.

Güvenilirlik analizi, bir sistem içinde yer alan kritik ürün güvenilirliğinin ölçülmesi, hesaplanması ve bu hesaplamalara göre değerlendirilmesidir. Güvenilirlik çalışmaları sistem içerisindeki tek bir parçaya yapılabildiği gibi sistemin tümüne de yapılabilmektedir [19].

Güvenilirliğin tahmin edilebilmesi ve hesaplanması için öncelikle tanımlanması gerekmektedir. Birçok alanda (tıp, petro-kimya, uzay sistemleri, havacılık, savunma sistemleri gibi) güvenilirlik terminolojisi kullanılmaktadır. Literatürde güvenilirlikle ilgili olarak birçok tanım yapılmaktadır. Ancak, kabul görmüş tanım şu şekildedir: “Herhangi bir parçanın, ürünün, sistemin veya alt sistemin belirli şartlar altında istenilen emniyet düzeyinde, belirlenen süre boyunca fonksiyonunu hatasız olarak yerine getirebilme olasılığıdır” [20].

Ebeling’in [20] çalışmasında tanımlanan “olasılık” kelimesi sistemin çalışma veya çalışmama durumunun kesinlik arz etmediği anlamına gelmektedir. Bu nedenle olasılık hesabı içeren güvenilirlik analizleri, değişkenler ve olasılık dağılımları kullanılarak yapılır. Sistemin kendisinin veya sistem içerisinde bulunan parçaların hata yapıcaya kadar geçen süreleri farklılık gösterir. Değişken olan bu süre, bir rasyonel değişken olarak tanımlanarak parçaya uygun bir olasılık dağılımıyla karakterize edilir [19].

Easterling [21] ise “güven aralığı” tanımını şu şekilde yapmıştır: “Güven aralığı, bazı bilinmeyen sabit veya parametrenin mevcut elde edilen veriler içerisinde uygun bir ölçüde yerleştirilmesiyle oluşan aralık ifadesidir”. Kesinlik seviyesi tarif edilirken genelde %95 değeri kullanılır, bu değer elde edilen sonuçları ifade ederken ne kadar emin olduğunu gösterir. Bir başka deyişle %95 emin olunan durumda %5 hatalı da olunabileceğini göstermektedir. Genel olarak kesinlik seviyesinde %90, %95 ve %99 değerleri kullanılmaktadır [22]. Bir güven aralığının alt ve üst noktası güven sınırları olarak tanımlanmaktadır. Eğer, güven seviyesi arttırılırsa (örn. %95’den %99’a), bu durum güven aralığının genişlemesine yol açmaktadır. Güven seviyesi gittikçe büyütülürse, çıkartılan güven aralığı da gittikçe genişleyecektir. Yani, en düşük ve en yüksek değerler artacaktır.

Kesinlik Seviyesi ve Güvenilirlik Seviyesi terimleri piroteknik aygıtlar için kullanılan olmazsa olmaz parametrelerdir. Piroteknik sistemlerde kullanılan pirotekniğin iki görevi vardır: birincisi istenilen akım ve gerilim değerlerinde ateşlenmesi, ikincisi diğer istenilen akım ve gerilim değerlerinde ateşlenmemesi. Piroteknik sistemler için kullanılan güven aralığı ve güvenilirlik seviyesi ateşlenme ve ateşlenmeme olmak üzere iki parametre için verilmektedir. Piroteknik sistemlerin üretimi sırasında ve çevresel şartların sistem üzerindeki etkileri nedeniyle ateşlenme ve ateşlenmeme karakteristiği değişkenlik göstermektedir. Öyle ki, bir piroteknik aygıtın güvenilirliğini etkileyen temel parametreleri şu şekilde özetlenebilir:

- Aygıtta kullanılan malzemelerin özellikleri,
- Kullanılan piroteknik malzemenin özellikleri,
- Aygıt üretim sürecinde meydana gelebilecek hatalar,
- Çevresel şartlar.

Bu parametrelerden gelebilecek hatalar veya bilinmeyen etkenler dâhil edilerek piroteknik aygıtların ateşlenme ve ateşlenmeme karakteristiği hesaplamaları yapılmaktadır. Piroteknik sistemlerde kabul görmüş ve sıkça kullanılan kesinlik seviyesi %95’dir. Güvenilirlik seviyesi ise en az %99,0 olmak şartıyla %99,9999 seviyesine kadar çıkabilmektedir.

2.6. Bruceton Test Metodu

Bruceton Test Metodu, piroteknik malzemelerin lazer ile ateşlenme enerjilerini bulmak için iyi bir teknik olarak günümüzde kullanılmaktadır [23]. Bu yöntem sonucunda elde edilen verilerin kullanılabilmesi için istatistiksel çözümleme yapmak gerekmektedir.

Dixon ve Mood [24] , 1948 yılında yaptıkları çalışmada istatistiksel bir yöntem deneyerek patlayıcı özellikteki malzemelerin duyarlı ve duyarsız olduğu noktayı bulmaya çalışmışlardır. Bu yöntem ilk olarak “Yukarı ve Aşağı Test” (*ing. Up and Down Test*) şeklinde isimlendirmiş ve daha sonra “Bruceton Test” olarak ifade etmişlerdir. 1948 yılında ABD’de silahların ve mühimmatların testlerinde kullanılan bu yöntem MIL-STD-331B, MIL-STD-322B gibi standartlarda da dökümanite edilmiştir. Bugünlerde ise “Piroteknik Duyarlılık Analizi”nde kullanılmaktadır [25].

Bruceton Testi temel olarak iki soru üzerinde durmuştur. Birincisi, piroteknik malzemenin “duyarlılığı” nasıl tanımlanır, ikincisi ise aynı malzemenin “gerçek duyarlılığı” nasıl tanımlanır. Duyarlılık, piroteknik malzemenin herhangi bir parametresinin eşik değerini göstermektedir. Elektrostatik boşalma duyarlılığı, ateşlenme/ateşlenmeme duyarlılığı gibi parametreler piroteknik malzemelerin karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır. Bruceton Test Metodu kullanılarak bir piroteknik malzemenin hangi seviyelerde ateşlenebildiği ve hangi seviyelerde ateşlenmediği bulunabilmektedir.

Neyer [26], 1994 yılında Bruceton Test Metodunu geliştirerek bilgisayar programı haline getirmiştir. Neyer [26] geliştirdiği bu test metoduna Neyer D-Optimal Test Metodu ismini vermiştir. Temel olarak Bruceton Test Metodu prensibi ile çalışmakta ve sadece ilk seviye ve aralık boyutu gibi iki parametre ile çözümleme yapabilmektedir. D-Optimal Test Metodu, ortalama, standart sapma gibi parametrelerin tahmininde maksimum olasılık kullanan algoritma tabanına dayanmaktadır [27].

Testin geliştirilmesi sırasında Dixon ve Wood [24] bu testin deneysel ve sistemsel olarak aşağıda belirtilen bazı gereksinimleri olduğunu belirtmişlerdir:

- Değişkenin adım aralığı daha önceden belirlenmeli ve değişkenin fonksiyonuna bağlı olmalıdır.
- Her bir test yeni bir numuneye uygulanmalıdır. Aksi takdirde, yani uyarana karşı tepki göstermeyen numune tekrar kullanılırsa, numunede oluşan deformasyondan dolayı takip eden analizde numunenin daha önce tepki göstermediği bir uyarı miktarında numune tepki gösterir ve bu da analizde hataya sebep olur.
- İstatistiksel olarak önemli bir sayıda deney sayısına ihtiyaç duyulur.
- Deneyin gidişatına göre uyaran seviyesi değiştirilir.

Bruceton testi sonucunda ortalama uyaran değeri ve standart sapma değeri hesaplanır. Bruceton yönteminde 2 adet değişken bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi verilen ilk uyarının büyüklüğü diğeri ise adım aralığıdır, “d”. Adım aralığı uyarı seviyeleri arasındaki değişimdir. Teste başlamadan önce ilk uyarı miktarı belirlenir. Bu değer ortalama değere ($\bar{x}$) yakın olması gerekmektedir. İlk verilen uyarı miktarı en az uyarı miktarı olur bilgisi doğru değildir. Bruceton metodunda daha verimli bir sonuç elde etmek direkt olarak seçilen adım aralığına bağlıdır. İlk verilen uyarı miktarı popülasyon ortalama (*ing. population mean*) değerinde, adım aralığı ise popülasyon standart sapma (*ing. population standard deviation*) değerinde olmalıdır. Bruceton testi seçilen parametrik değerlere göre farklılıklar göstereceğinden parametreleri belirlerken çok dikkatli olunmalıdır. Belirlenen uyarı miktarı verilerek uyarılanın verdiği tepkiye bakılır. Eğer tepki verirse, bir sonraki uyaran miktarı düşürülür, eğer tepki vermezse uyaran miktarı adım aralığı kadar artırılır. Birbirini takip eden bu uyaran miktarını azaltma artırma işlemi, aynı eşzaman diziyi (uyaran miktarı ve verdiği tepki) elde edene kadar uygulanır. Yani testin uygulanması kâğıt üzerinde zig-zag şeklini elde edene kadar devam eder.

Kısaca Bruceton test metodu kullanılırken aşağıdaki prosedür izlenmektedir [27];

1. İlk numuneye uygulanacak parametre (akım, gerilim, güç vb.) “h” olarak belirlenir.
2. Parametre adım büyüklüğü “d” olarak belirlenir.

3. Eğer ilk numune verilen “h” parametresine göre ateşlenirse, ikinci numuneye verilecek parametre “h-d” olarak belirlenir. Eğer ilk numune ateşlenmezse, ikinci numuneye verilecek parametre “h+d” olarak belirlenir.
4. Eğer ikinci numune verilen parametre “h-d” veya “h+d” de ateşlenirse “d” kadar düşürülür, ateşlenmezse “d” kadar arttırılır.
5. Test numune miktarı kadar bu şekilde devam eder. Ateşlenme gerçekleşirse “x”, gerçekleşmezse “0” olarak işaretlenir.

Test sonucunda h-3d, h-2d, h-d, h, h+d, h+2d, h+3d şeklinde değerler elde edilebilmektedir. Parametreye göre bu değerler artabilir veya azabilir. İlk parametre değerinden sonra temel prensip ateşlenme gerçekleşirse “d” kadar parametre değeri azaltılırken ateşlenme gerçekleşmezse parametre değeri “d” kadar arttırılır.

Neyer-D Optimal bilgisayar programı, Bruceton analizini bilgisayar ortamında sunan bir programdır. Bu program kalem ve kağıt kullanmadan, sadece bilgisayar ortamında Bruceton analizi hesabı yapmaktadır.

2.7. Literatür Sonuçları

Literatür araştırması sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

1. Ağırlıkça %20-25 arasında bor ve ağırlıkça %70-75 arasında potasyum nitrat içeren BPN pirotekniğinin yanma hızı, alev sıcaklığı, tepe basıncı gibi parametrelerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir.
2. BPN üretimi sırasında bağlayıcı kullanımının BPN pelet üretimini kolaylaştırdığı ve raf ömrünü arttığı gözlenmiştir.
3. BPN piroteknik toz üretimi sırasında bor metal tozunun tanecik boyutunun 1 μm altında ve saflık oranının %92'den fazla olmasının gerektiği anlaşılmıştır. Bor içerisinde bulunan magnezyumun en fazla %8 oranında olmasının yaşlanma prosesi için çok önemli olduğu saptanmıştır.
4. BPN pirotekniği üretimi sırasında kullanılan potasyum nitrat oksitleyicisinin tanecik boyutunun 15 μm 'den daha büyük olduğu

durumlarda topaklanmaya sebebiyet vereceği ve bu durumun ateşlenme geçikmesine neden olacağı belirtilmiştir.

5. MIL-P-46994B standardına uygun üretilen BPN peletlerin balistik özelliklerinin en iyi olduğu görülmüştür.
6. BPN peletlerin üretim sonrasında uygun koşullarda saklanması gerektiği, %80 nem ve 25°C ortamda raf ömrünün 6 aydan daha kısa olacağı belirtilmiştir. BPN içerisinde bulunan magnezyumun oksitlenerek ateşlenmenin geçikmesine neden olacağı ve 6 aydan sonra ateşlenmenin hiç gerçekleşemeyeceği vurgulanmıştır.
7. BPN pelet ateşlenme karakteristiğinde yanma hızının en düşük 31,75 mm/s ve kalorifik değerin ömrü boyunca en az 1500 cal/g olması gerektiği anlaşılmıştır.
8. BPN pelet yoğunluğunun genel olarak 1,5-1,7 g/cm³ arasında tutularak çalışmalar yapıldığı görülmüştür.
9. BPN pelet alev sıcaklığının 2900°C ile 3300°C arasında değiştiği belirtilmiştir.
10. Lazer ateşlemede, lazer tipine bakılmaksızın BPN pirotekniği ateşlemek için en az 20 J/cm²'lik lazer enerji yoğunluğunun uygulanması gerektiği gözlenmiştir.
11. BPN pelet gözenekliliğinin %20-40 arasında olması gerektiği, %20'den az olduğu durumlarda yanma hızının düştüğü belirtilmiştir.
12. Deneysel verilerin piroteknik sistemlere uygulanabilmesi için kesinlik seviyesinin %95, güvenilirlik seviyesinin %99,0 ve %99,9 olarak kullanılmasının sonuçların doğruluğunu arttırdığı belirtilmiştir.
13. Bruceton Test Metodu piroteknik aygıt ve sistemlerin hassasiyet analizini yapmak için kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Bruceton metodu sayesinde az deney sayısı ile büyük bir üretim (kafile) hakkında istatistiki bilgiler edinmek mümkündür. Bruceton analizi, istenilen güvenilirlik ve kesinlik seviyesinde, ortalama ateşlenme akımı, en düşük ateşlenme akımı, en yüksek ateşlenmeme akımı ve tolerans değeri hakkında bilgi vermektedir. Neyer-D Optimal bilgisayar programı Bruceton analizini bilgisayar aracılığı ile yapma imkânı sunmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu kısımda Bor Potasyum Nitrat pirotekniğin nasıl üretildiği, pirotekniğin pelet formuna nasıl getirildiği ve son olarak peletlerin lazer ateşleme test sistemi ile ateşlenerek ateşlenme karakteristiğinin nasıl bulunduğu anlatılmıştır.

3.1. Bor Potasyum Nitrat Pirotekniğin Üretimi

BPN pirotekniğin üretimindeki asıl amaç MIL-P-46994B askeri standardına uygun pirotekniği üretmektir. BPN pirotekniğin içindeki bileşenlerin seçiminde standartta verilen özellikler dikkate alınmıştır.

3.1.1. BPN Pirotekniğin Bileşenlerinin Seçimi ve Temini

BPN pirotekniğinin üretimi için MIL-P-46994B standardında belirtilen ve Çizelge 2.4'te özetlenen bileşenlerden potasyum nitrat ve bor aynı özelliklerde seçilmiştir. Çizelge 3.1'de bu çalışmada kullanılan bileşenlerin genel özellikleri verilmiştir. Standartta belirtilen Laminac reçine ve %60 çözeltideki metil-etil-keton peroksit (MEKP) yerine bağlayıcı olarak Viton Floroelastomer bileşeni kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. BPN Pirotekniği Üretiminde Kullanılan Bor, Potasyum Nitrat ve Bağlayıcının Malzeme Özellikleri

Bileşen İsmi	Tanecik Boyutu	Safılık	Üretici Firma
Bor	< 1µm	%90-92	Pavezyum -Türkiye
Potasyum Nitrat	90 µm	%99,0	Merck – Almanya ve Sigma Aldrich-ABD
Viton	-	% 99	Dupont -ABD

Kullanılan bor metal tozun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bor Metal Tozun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ticari Adı	Bor Metal Tozu
CAS Numarası	7440-48-8
Ürün Numarası	PVZ-2-102 (Pavezyum, PVZ Boron 90)
Kimyasal Formülü	B
Molekül Ağırlığı	10,81 g/mol
Görünüm	İnce siyah/koyu kahverengi toz
Koku	Kokusuz
Erime Sıcaklığı	2076°C
Yoğunluk	2,34 g/cm ³
Nem Oranı	%0,50 en yüksek
Suda Çözünen Miktar	%0,50 en yüksek

Bor metal tozun seçiminde tanecik boyutu, içerdiği magnezyum ve saflık oranı önemli kriterler olmuştur. Bor metal tozun özellikleri MIL-P-46994B standardında belirtilen magnezyum oranının %8'den küçük ve bor oranı %90'dan büyük olma kriterini sağlamıştır. Bor metal tozu nemden etkilendiği için vakumlu kabin içerisine vakum altında saklanmıştır. Basınç 0,2 barın altına düştüğünde kabin içerisine yüksek saflıkta azot basınç değeri 0,9 bar olana kadar verilmiştir. Bu işlem 3 kez tekrar edilerek kabin içerisindeki nem ve oksijen miktarı en aza düşürülmüştür. 1 hafta boyunca nem değeri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. 1 hafta içerisinde kabinin sızdırmadığı ve nem değerinin %3-5 arasında değiştiği görülmüştür. Her kullanım sonrasında vakum-azot işlemi tekrar edilerek bor metal tozun en düşük nemlilikte depolanması sağlanmıştır.

Üretimde kullanılan potasyum nitratın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Potasyum Nitratın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ticari Adı	Potasyum Nitrat
CAS Numarası	7757-79-1
Ürün Numarası	12648 Potassium Nitrate (Sigma Aldrich)
Kimyasal Formülü	KNO ₃
Molekül Ağırlığı	101,1 g/mol
Görünüm	İnce beyaz toz
Koku	Kokusuz
Erime Sıcaklığı	334°C
Yoğunluk	2,11 g/cm ³
pH değeri (%5; su, 20°C)	5 - 8

1957 yılında havacılık endüstrisi için geliştirilen viton floroelastomer, hızlı bir şekilde diğer endüstrilerde de kullanılmaya başlanmıştır. DuPont Dow firması aynı tarihten itibaren viton floroelastome üzerinde çalışmaya başlamıştır. Viton, birçok elastomer ile karşılaştırıldığında yüksek sıcaklığa karşı dayanımı diğerlerinden çok daha iyi durumdadır. DuPont Dow firması geliştirdiği viton için 232°C'ye 3000 saat, 260°C'ye 1000 saat, 288°C'ye 240 saat ve 316°C'ye 48 saat dayanabilme özelliğine sahip olduğunu, ayrıca -54°C'ye kadar elastik özelliğini kaybetmediğini belirtmiştir.

Viton-A, düşük yanma karakteristiği, iyi elektriksel özellikleri, oksitlenmeye, havaya ve güneşe karşı dirençli olması sayesinde savunma sanayinde sıkça kullanılmaktadır. Üç çeşit Viton tipi vardır: Viton-A, Viton-B ve Viton-F. Viton-A

tipi VinilidinFlorid (VF2) ve hekzafloropropilen (HFP)'den oluşmaktadır. Viton-B ve Viton-F ise Viton-A'ya ek olarak tetrafloroetilen (TFE) içermektedir. Bu üç çeşit viton ailesi kullanıldıkları yere göre farklı özellik göstermektedir. Viton ailesinin en önemli özelliklerinden biri düşük molekül ağırlığına sahip olmalarıdır. Viton-A, Viton-B ve Viton-F içerisinde polimer Florin miktarı sırayla %66, %68 ve %70 olarak bulunmaktadır.

Bu çalışmadaki Viton'un görevi bor-potasyum nitrat toz karışımının bir arada tutulmasını sağlamaktır. Viton'un fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Viton Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ticari Adı	Viton Floroelastomer
Ürün Numarası	Dupont Viton
Görünüm	Bej/beyaz
Koku	Kokusuz
Bozunma Noktası	470°C
Yoğunluk	1,82 g/cm ³
Çözünürlük	Düşük molekül ağırlıklı esterlerde ve ketonlarda çözünür.

Viton malzeme özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Viton Malzeme Özellikleri

Mooney Viskozite (121 °C'de)	22 ± 3
En Yüksek Yük Noktasındaki % Uzama	200 ± 20
Sertlik (A)	76 ± 5

3.1.2. Üretim Yöntemi

Potasyum nitrat ilk olarak eleme işleminden geçirilmiş, eleme sırasında potasyum nitratın 100 µm elekten geçtiği ancak 90 µm elekten geçmediği görülmüştür. Malzeme boyutunu standartta belirtilen 10 µm boyutuna indirebilmek için Alpine Laboratuvar Mili Tip-160 Z cihazı ile öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme işleminden sonra potasyum nitrat 25 µm'lik elekten geçirilmiş ve piroteknik üretiminde kullanılmak üzere saklanmıştır.

Üretimde kullanılan bileşenlerin oranları MIL-P-46994B standardına uygun olarak seçilmiş ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. BPN Piroteknik Tozun Bileşen Oranları

Malzeme Adı	Ağırlıkça %
Bor Metal Tozu (Yanıcı)	23,60
Potasyum Nitrat (Oksitleyici)	70,90
Viton (Bağlayıcı)	5,60

Üretimde kullanılan vitonu çözmek için saflık oranı %99,5 olan aseton (CAS Numarası: 67-64-1) kullanılmıştır. Oldukça keskin bir kokuya sahip asetonun kaynama noktası 56°C'de olduğu için, laboratuvar şartlarında cam şişe içerisinde saklanmıştır.

BPN pirotekniği üretimi için her bir üretim miktarı (kafale) iş güvenliği bakımından 50 gramla sınırlandırılmıştır. Çizelge 3.7'de 50 gramlık üretim için gerekli bileşenlerin miktarları verilmiştir. Beherin içine tartılan 2,80 gram Viton ve yeterli miktarda aseton eklenerek asetonun tamamen çözünmesi için 18 saat beklenmiştir.

Çizelge 3.7. 50 gramlık kafile için gerekli bileşen miktarları

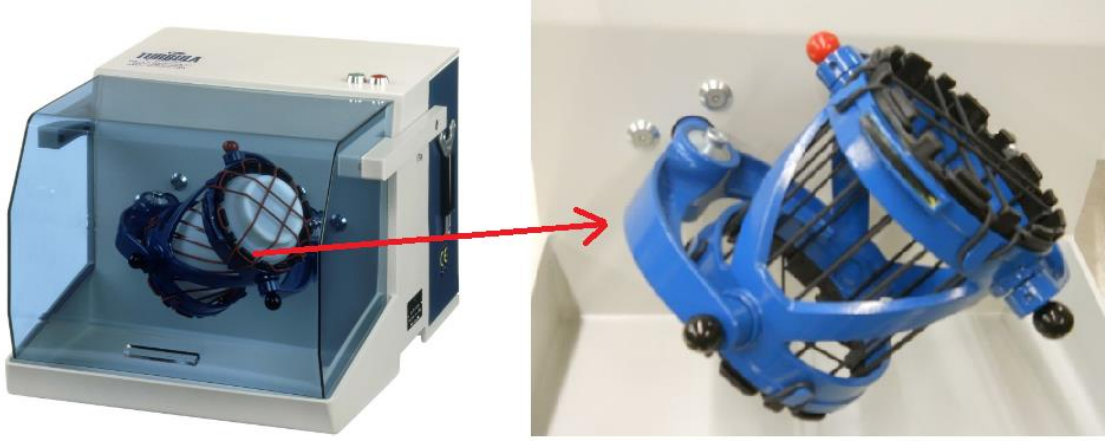
Malzeme Adı	Miktarı (gr)
Bor Metal Tozu (Yanıcı)	11,8
Potasyum Nitrat (Oksitleyici)	35,5
Viton (Bağlayıcı)	2,80

Bor ve potasyum nitrat Çizelge 3.7’de verilen miktarlara göre hassas terazide tartılmış ve tartım sonrası topaklanmanın giderilmesi için 500 µm’lik elekten geçirilmiştir. Eleme işleminden sonra 70°C’lik kurutma fırınına ayrı ayrı konularak 18 saat bekletilmiş ve nemin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Kurutma sonrası önce bor metal tozu tekrar 500 µm’lik elekten geçirilmiş daha sonra potasyum nitrat aynı elekten geçirilerek elek toplama haznesi içerisinde bor ile karışması sağlanmıştır. Elek toplama haznesinden alınan bor ve potasyum nitrat iletken özellikli karıştırma kabı içerisine aktarılmıştır. Bor, elektrostatığe karşı aşırı duyarlı olduğundan karıştırma kabı özellikle statik elektriğe karşı korumalı seçilmiştir. Şekil 3.1’de kullanılan iletken kutu görülmektedir.



Şekil 3.1. İletken Kutu

Kap daha sonra kuru karıştırıcı olarak kullanılan ve Şekil 3.2’de görseli verilen Turbula T2F içerisine yerleştirilmiştir. Turbula karıştırıcının özelliği 3 eksen (x,y ve z) istenilen devirde karıştırma yapabilmesidir.



Şekil 3.2. Turbula Karıştırıcı

İlk karıştırmanın ardından karıştırma kutusu turbuladan dikkatlice çıkarılmış ve elek toplama haznesine üst üste yerleştirilen eleklerden geçirilmiştir. Daha sonra karışım tekrar iletken kutu içerisine konmuştur.

Viton/Aseton çözeltisi ile Bor-Potasyum Nitrat kuru karışımı, manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş karışım sağlanmıştır. Beher içerisine daha sonra çöktürücü eklenerek BPN karışımı tamamen çöktürülmüştür. Beher içerisinde karışımın dibe çökmesi ve sıvı çözeltinin berrak hale gelmesi için bir süre beklenildikten sonra yüzeyde kalan sıvı çözelti başka bir kaba alınarak, piroteknik karışımdan uzaklaştırılmıştır. BPN pirotekniği sıvı çözeltiden tamamen uzaklaştırmak için vakumlu süzme yöntemi kullanılmıştır.

Islak halde bulunan BPN pirotekniği kurutma işlemi için 70°C'da kurutulmuş ve kurutma sonrasında piroteknik elekten geçirilmiş ve daha sonra piroteknik iletken kutu içerisine konularak hazır hale getirilmiştir.

3.1.3. Üretilenen BPN Pirotekniğin Kalite Kontrol Testleri

Üretimi tamamlanan BPN pirotekniğinin kalite kontrolleri için aşağıda verilen analizler yapılmıştır.

- Kalorifik Enerji Tayini
- Tutuşma Sıcaklığı Tayini
- Yoğunluk Tayini

Kalorifik enerji tayini, kalorimetre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ateşleme düzeneğinde 10 ± 1 cm (2,3 cal/cm) boyunda Parr #45C10 ateşleme teli kullanılmıştır. BPN pirotekniğinden 0,500 gram numune alınarak cihaza yerleştirilmiştir. Ölçüm sisteminin içinde yer alan hazneye, ceket sıcaklığından en az 3°C düşük sıcaklıkta 2000 gram tip 2 veya tip 3 düzeyinde su direnci en az 10 megaohm·cm olan saf su konulmuştur. Kalorifik enerji ölçümü toplam üç adet BPN pirotekniği numunesi için yapılmış ve üç ölçüm değerinin ortalaması alınmıştır.

BPN pirotekniğin tutuşma sıcaklığının belirlenmesi için TG/DTA cihazı kullanılmıştır. Testte, 1 mg'dan az numune kullanılarak oda sıcaklığından 700°C'ye kadar 10°C/dk hızla sıcaklık taraması yapılmıştır. Elde edilen termogramda görülen ilk ekzotermiden tutuşma sıcaklığı belirlenmiştir.

Yoğunluk tayini için helyum piknometre kullanılmıştır. Helyum gazı numunedeki boşlukların arasına nüfuz ederek doğruluk oranını arttırmıştır.

3.2. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretimi

BPN piroteknik peletin kullanılmasının amacı aşağıda özetlenmiştir;

- ✓ Kullanılacağı yere göre daha küçük hacimde daha fazla pirotekniğin kullanılabilmesi,
- ✓ Taşıma, yerleştirme işlemlerinin daha kolay olması,
- ✓ Toz yapıya göre yüzey alanın düşmesinden dolayı raf ömrünün toz yapıya göre daha uzun olması,
- ✓ Farklı yüklerle elde edilecek farklı yoğunluklara göre yanma hızının kontrol edilebilir olması,
- ✓ Ateşlenme zincirinin başlayabilmesi için en önemli adım olmasıdır.

3.2.1. Üretim Yöntemi

Bu kısımda, üretilenen BPN pirotekniğin farklı yükler altında preslenmesiyle farklı yoğunluklara sahip peletlerin elde edilmesi anlatılmıştır.

Preslemede kullanılan araç, gereç ve aygıtlar aşağıda açıklanmıştır:

1. Hassas Terazi: Piroteknik malzemelerin hassas bir şekilde tartılmasını sağlayan maksimum 200 gram kapasiteli, 0,1 mg ölçüm hassasiyetine sahip, statik elektriğin boşaltılmasını sağlayan topraklama sistemine sahip analitik terazi.
2. Pinömatik Pres-1: Piroteknik tozların basılma işleminin yapıldığı, basınçlı hava ile çalışan, 500 kg'a kadar yük uygulayabilen, topraklama sistemi sayesinde uygulama alanının tüm yüzeyi toprak hattına bağlanmış pres (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Pinömatik Pres-1

3. Pinömatik Pres-2: Piroteknik tozların basılma işleminin yapıldığı, basınçlı hava ile çalışan, 1000 kg'a kadar yük uygulayabilen, topraklama sistemi sayesinde uygulama alanının tüm yüzeyi toprak hattına bağlanmış pres.
4. Tartım Kaşıkları: Üzerinde piroteknik malzemelerin tartılacağı, 1,2 mm kalınlıkta paslanmaz çelik levhadan bükülerek imal edilmiş, nikel kaplama yapılarak malzemenin yapışmadan kolayca ayrılabilmesini sağlayan kaşık.

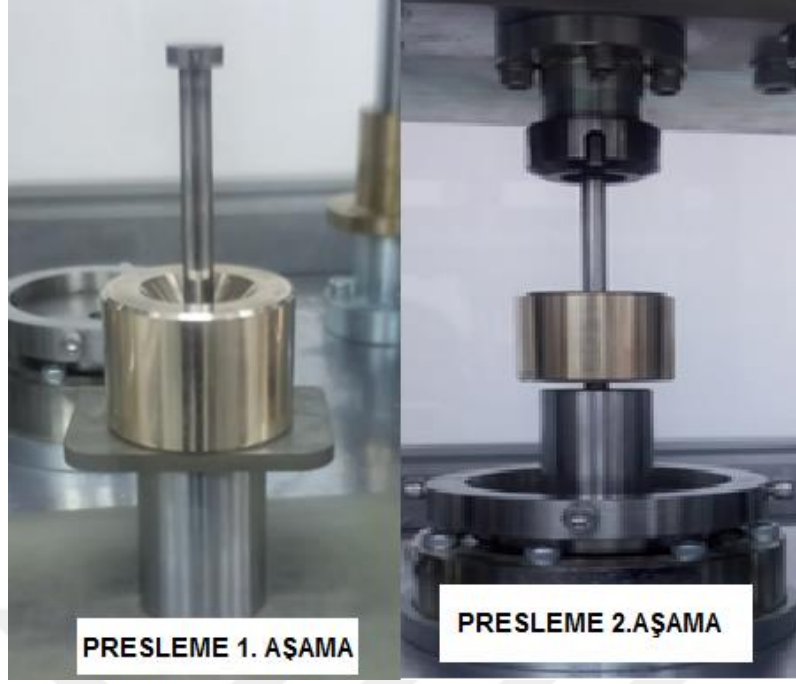
5. Spatül: Piroteknik tozların iletken kutudan alınarak tartım kaşıklarına konulmasını sağlayan, statik elektrik biriktirmeyen, 5 ml kapasiteli kaşık.
6. Pim: Farklı çaplara sahip karbür malzemeden imal edilerek farklı yükler altında esneme veya kırılma hareketi yapmayan basma pimi (Şekil 3.4)



Şekil 3.4. Presleme İşlemi Sırasında Kullanılan Aparatlar

7. Döküm Haznesi: Sürtünme ile kıvılcım çıkartmayan bronz malzemeden imal edilmiş farklı delik çaplarına sahip silindirik hazne.
8. Pelet Basma-Çıkartma Aparatı: Pirotekniğin preslenmesi işlemi sırasında kullanılan, pirotekniğin basıldığı ve basma işlemi sonrasında peletin çıkarılmasını sağlayan paslanmaz çelikten imal edilmiş silindirik aparat.

İlk olarak BPN pirotekniği tozu, kullanılacak miktar kadar iletken kutu veya iletken tartım kabı içerisinde kurutma fırınında 70°C'de en az 3 saat kurutulmuştur. Şekil 3.5'te gösterildiği üzere presleme işlemi iki aşamada gerçekleştirilerek üretim tamamlanmıştır.



Şekil 3.5. BPN Piroteknîği Tozun Presleme Aşamaları

3.2.2. BPN Piroteknik Peletin Kontrolü

Elde edilen peletler görsel olarak incelenerek yüzeyinde herhangi bir yabancı madde olup olmadığı, kırık veya çatlak oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir.

3.3. Lazer İle BPN Pelet Ateşlenmesi

Bu kısımda BPN piroteknik peletin lazer ateşleme sistemi ile ateşlenerek yanma hızının nasıl tayin edildiği açıklanmıştır.

3.3.1. Lazer Ateşleme Sistemi

Tez çalışması kapsamında, piroteknik peletin lazer ile ateşlenmesine yönelik lazer ateşleme sisteminin tasarımı ve kurulumu gerçekleştirilmiştir. Lazer ateşleme sistemi tasarımında aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır;

- Sistemin parametrik çalışmalara (lazer gücü ve uygulama süresi gibi) uygun olması,
- Sistemin yurtiçi imkânlarla üretilebilir olması

Bu amaçla, çeşitli amaçlara yönelik lazer ekipmanları tasarlayan, üreten ve kurulumunu gerçekleştiren FiberLAST Fiber Lazer Sistemleri ve Teknolojileri

- ✓ 10 W lazer diyot AÇMA-KAPAMA Düğmesi
- ✓ 1W ve 10 W lazer ışınlar için aktif LED gösterge
- ✓ Sistem Hata Sinyali, LED gösterge
- ✓ 1 adet Sistem AÇMA-KAPAMA Düğmesi
- ✓ 1 adet Acil Durdurma Düğmesi

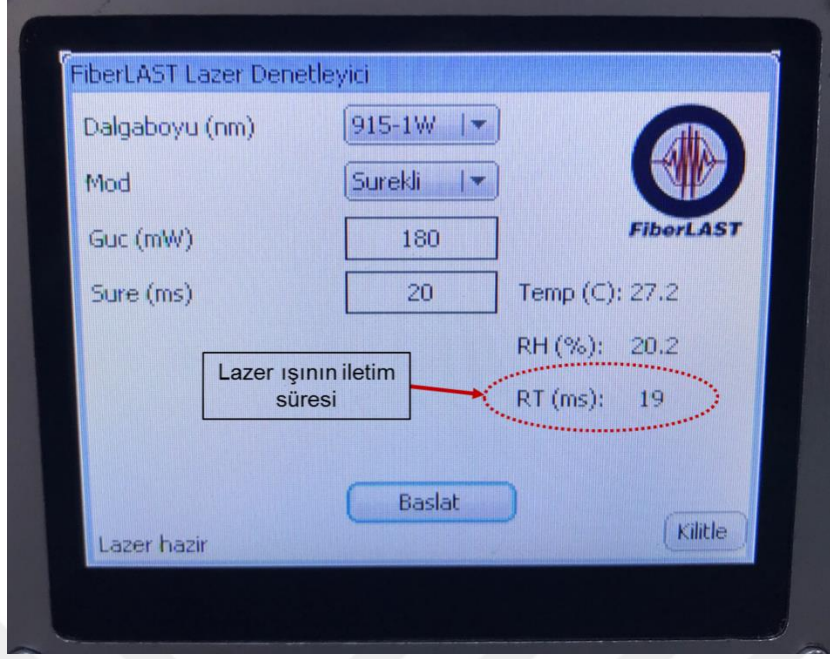
Lazer Güç Ünitesi Tetik Sinyali Çıkışı

Lazer Güç Ünitesinde, testlerde kullanılacak hızlı kamerayı (*ing. Fast Speed Camera*) dokunmatik ekrandan tetikleyebilmek için “Tetik Sinyal Çıkışı” bulunmaktadır. Dokunmatik ekrandan lazer gönderme komutu “Başlat”a basılarak testlerde kullanılacak hızlı kamera $3,3\pm0,3$ Volt'luk sinyal ile tetiklenmekte ve lazer ışını gönderilmektedir.

Lazer Güç Ünitesi Dokunmatik Ekranı

Güç ünitesindeki dokunmatik ekrandan, güç ünitesinde yer alan 1 W'lık ve 10 W'lık iki lazer diyottan aktif olması istenilen diyot seçilebilmektedir. Lazer ışını sürekli mod veya darbeli modda üretilebilmekte ve ışın süresi seçilen moda göre belirlenebilmektedir. Sürekli modda lazer ışını ekrana girilen süre ve güçte tek puls ışın üretirken, darbeli modda ise lazer ışını ekrana girilen süre ve güçte, birden fazla ışın atımı yapabilmektedir.

Şekil 3.7'te güç kaynağı ünitesi üzerinde bulunan dokunmatik ekranın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7. Lazer Güç Ünitesi Dokunmatik Ekranı

Ekranda yer alan lazer ışın gücü ve lazer uygulama süresi kullanıcı tarafından belirlenmektedir.

Güç ünitesinde, 1 W güçte ışın üreten lazer diyotun seçilmesi durumunda 50 mW ile 1000 mW arasında güç değeri 20 mW aralıklarla ekrana girilebilmektedir. 10 W güçte ışın üreten lazer diyotun seçilmesi durumunda ise 100 mW ile 10000 mW arasında 50 mW aralıklarla ekrana girilebilmektedir. Lazer ışın süresi (*ing.pulsewidth*) 1 ms adım aralıklarında 1 ms ile 5 dakika aralığında değiştirilebilmektedir.

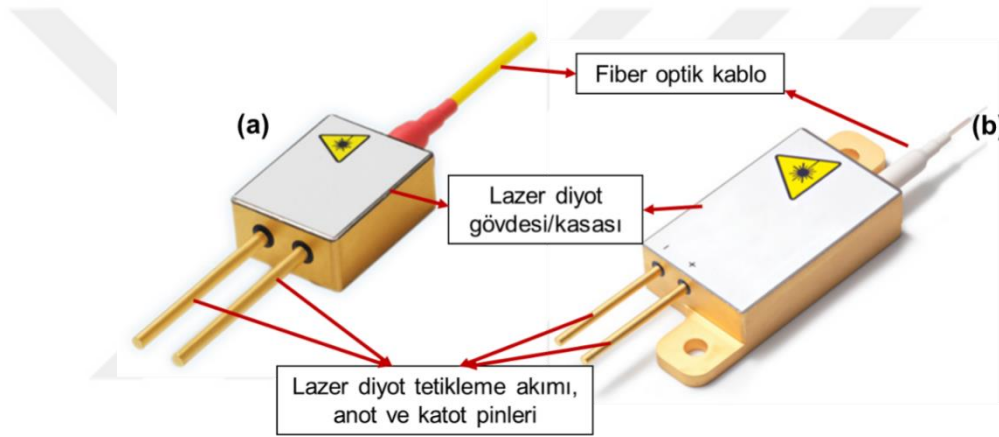
Ekranda yer alan "başla" komutu ile ayarlanan güç ve sürede lazer ışını güç ünitesinde bulunan lazer diyot tarafından üretilmekte ve ışın güç ünitesi çıkışından fiber optik kablo ile mercek sistemine taşınmaktadır.

Lazer Diyotlar

Lazer güç ünitesinde, 915 nm dalga boyuna sahip 1 W'lık ve 10 W'lık lazer gücünde lazer ışını üreten iki adet lazer diyot bulunmaktadır. Her iki lazer diyotun iletimi aynı fiber optik kablo ile sağlanmaktadır.

Fiber optik kablo ile eşleştirilmiş lazer diyotlar, II-VI Laser Enterprise (İsviçre) firmasından tedarik edilmiş olup, 1 W ve 10 W gücündeki diyotların model

numaraları sırasıyla BMU9/10A-915-01/02-R ve BMU30-915-01-R/R02'dir. Model numaralarından da anlaşılacağı üzere 1 W'lık diyotun maksimum gücü 9 W ve 10 W'lık diyot maksimum gücü 30 W olarak belirtilmiş ve lazer güç ünitesine takılmıştır. Yazılım ile belirtilen güçler istenilen 1 W ve 10 W'lık değerlere sınırlandırılmıştır. İstenildiği takdirde bu değerler maksimum güce çıkarılabilmektedir. Her iki güçteki lazer diyotlar 5 Volt gerilimde çalışmaktadır. Lazer diyotların çalışma sıcaklığı 15°C ile 60°C arasında iken depolama sıcaklığı -45°C ile 85°C arasındadır. Seçilen lazer diyotların görüntüsü ve boyutsal özellikleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Lazer Diyotların Görselleri

(a) 1 W'lık lazer diyot (BMU9/10A-915-01/02-R)

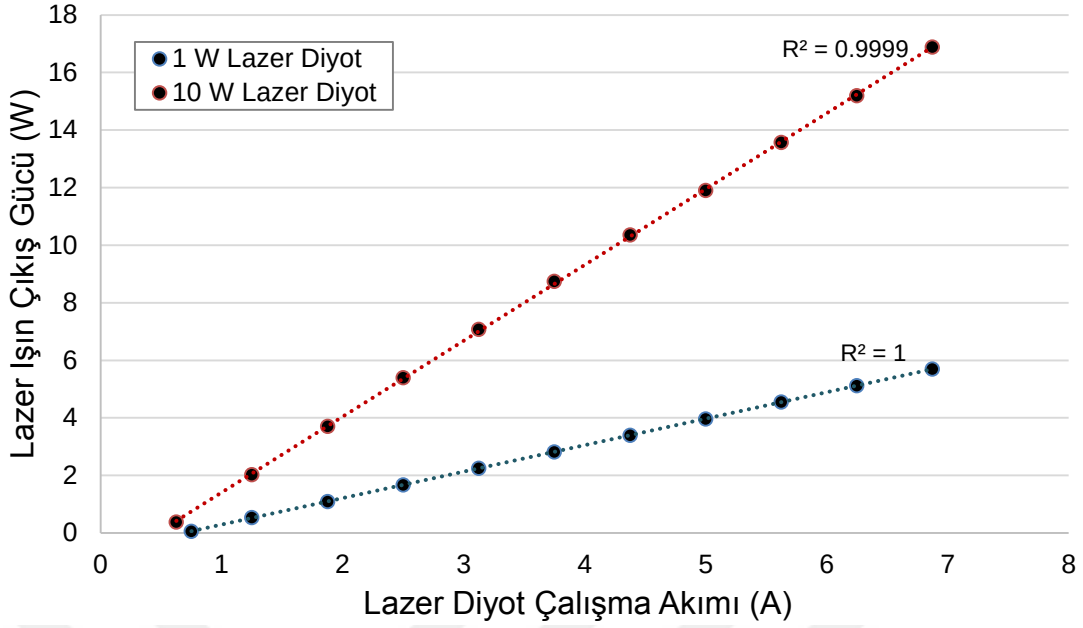
(b) 10 W'lık lazer diyot (BMU30-915-01-R/R02)

Lazer diyotlarda ışın üretimi, lazer diyotun 5 volt'luk gerilim alması ile aktive olmaktadır. Diyotun anot ve katot pinleri arasından geçen gerilim ve akım miktarı ve süresi, üretilen lazer ışın süresini ve gücünü belirlemektedir. Çizelge 3.8'de 1 W ve 10 W güçte ışın üretme kapasitesine sahip lazer diyotlara verilen akıma karşılık lazer diyotların ürettiği ışın güçlerine ilişkin veriler gösterilmiştir. Sistemde kullanılan 9 W'lık ve 30 W'lık diyotların yazılım ile kapasiteleri 1 W'a ve 10 W'a sabitlenmiştir. İstenildiği takdirde gerçek değerlerine ulaşabilmektedir.

Çizelge 3.8. Lazer Diyot Çalışma Akımına Karşılık Elde Edilen Lazer Işın Gücü Verileri

Lazer Diyot (1 W)		Lazer Diyot (10 W)	
Diyot Çalışma Akımı (A)	Diyot Lazer Işın Çıkış Gücü (W)	Diyot Çalışma Akımı (A)	Diyot Lazer Işın Çıkış Gücü (W)
0,750	0,055	0,625	0,375
1,250	0,540	1,250	2,025
1,875	1,095	1,875	3,700
2,500	1,675	2,500	5,390
3,125	2,250	3,125	7,070
3,750	2,815	3,750	8,740
4,375	3,395	4,375	10,350
5,000	3,965	5,000	11,900
5,625	4,550	5,625	13,570
6,250	5,120	6,250	15,190
6,875	5,700	6,875	16,880

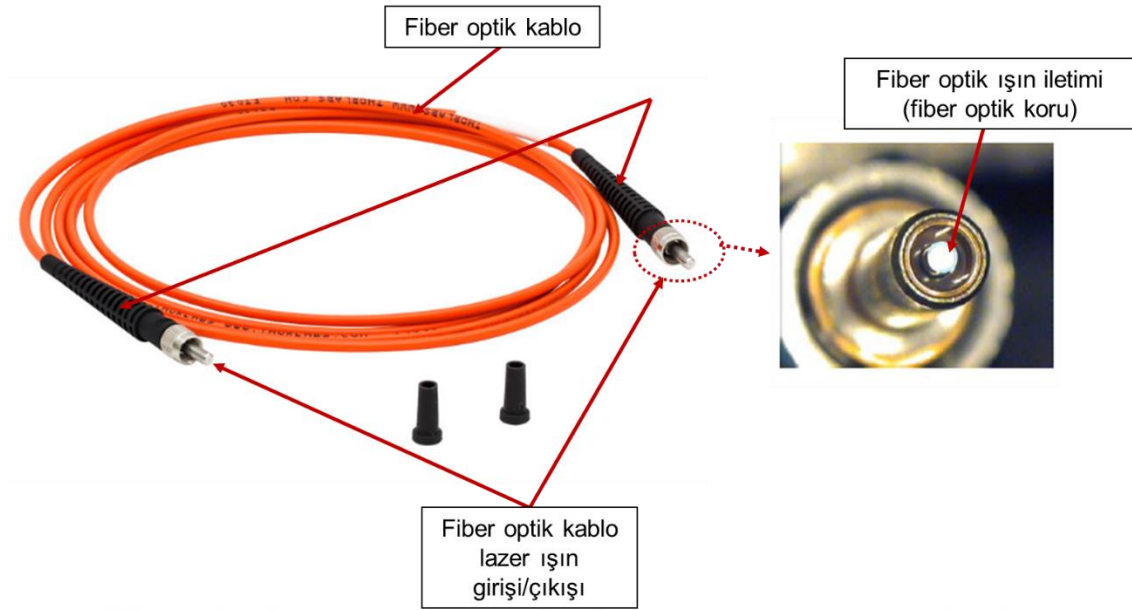
Şekil 3.9’da lazer ışın gücünün diyotlara verilen akım ile doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. Lazer diyota verilen akım süresi lazer ışın süresiyle aynı olduğu anlaşılmaktadır. Lazer güç ünitesi ekranına kullanıcı tarafından girilen ışın gücü ve süresi, diyot sürücülerine gönderilen akım miktarı ve akım süresinin elektronik kontrol ünitesi ile ayarlanması sonucu elde edilmektedir. Lazer diyota 1,875 amper akım uygulandığında yaklaşık olarak 1,095 W’lık lazer ışın elde edildiği çizelgeden anlaşılmaktadır.



Şekil 3.9. Lazer Diyot Çalışma Akımına Karşılık Elde Edilen Lazer Işın Çıkış Gücü Grafiği

Güç ünitesinde diyotlarda üretilen lazer ışın, diyot fiber optik kablosu ile güç ünitesinin çıkışına iletilmektedir. Fiber optik kabloların kor çapı yani lazer ışının yol aldığı çap $105\ \mu\text{m}$ 'dir. Optik kablonun kor içerisine gelen ışın dağılmalarını tanımlamak için kullanılan sayısal değer (*ing.numerical aperture*) ise 0,15'dir.

Güç ünitesinin lazer ışın çıkışında SMA tipi konektör kullanılmıştır. Sistemde kullanılan SMA konektör, üretilen lazer ışınını fiber optik kablonun koruna iletmek için kullanılan ve içerisinde lazer ışını odaklayan mercek bulunan optik konektördür. Fiber optik kablo (ürün kodu: M14L05, Thorlabs Inc., ABD) ve SMA konektör görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. SMA Tipi Optik Konektör ve Fiber Optik Kablosu

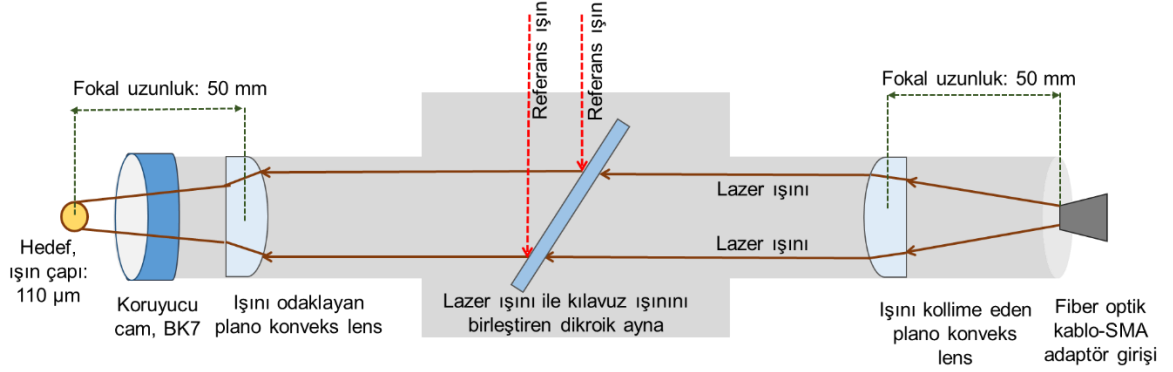
Fiber optik kablo 400–2400 nm dalgaboyu aralıklarındaki ışını iletebilecek özellikte olup, optik kablonun her iki ucunda SMA optik konektör bulunmaktadır. Bu sayede güç ünitesinin lazer çıkış portu ile mercek sistemi lazer giriş potu aynı özelliktedir.

3.3.3. Lazer Mercek Sistemi

Lazer mercek sistemi dikroik ayna (ürün kodu: DMSP750B, Thorlabs Inc., ABD), iki adet N-BK7 tipinde plano konveks lens (ürün kodu: LA1131-B, Thorlabs Inc., ABD) ve N-BK7 tipinde koruyucu cam (ürün kodu: WG11050-A, Thorlabs Inc., ABD) bulunmaktadır. Daha sonradan mercek sistemine referans lazer diyot eklenmiştir.

Optik kablonun ucunda bulunan ve mercek sistemine bağlanan SMA konektör çıkışında lazer ışını dağılmakta ve dağılan ışın plano konveks lensler kullanılarak toplanabilmekte (kollime) ve doğrusal olarak iletilebilmektedir. Şekil 3.11’de SMA konektörün ve plano konveks lensin yerleşimi gösterilmiştir. Plano konveks lensin malzemesi N-BK7 borosilikat camdır. N-BK7 tipli lens, 915 nm dalgaboyundaki ışının %93’ünü geçirirken %7’sini ise yansıtmaktadır.

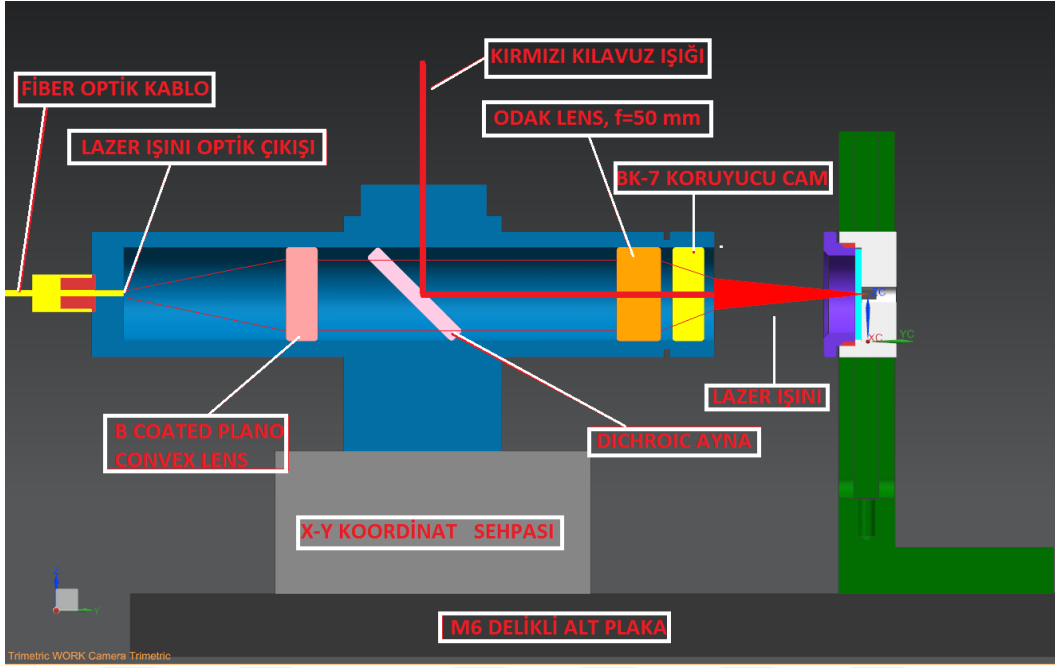
Yansıma miktarını %0,5'e indirebilmek için N-BK7 lens kaplamalı olarak tedarik edilmiştir. Şekil 3.11'de Lazer Mercek Sistemi'nin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.11. Lazer Mercek Sisteminin Şematik Gösterimi

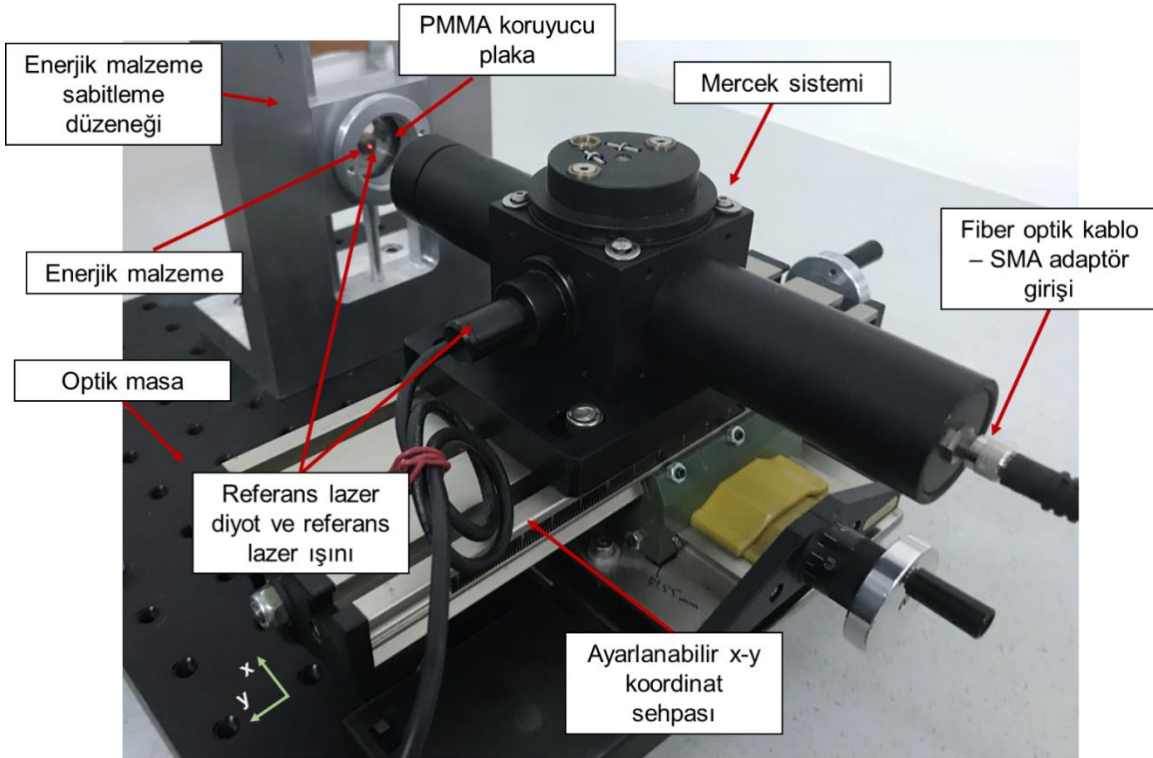
915 nm dalga boyuna sahip lazer ışınları, elektromanyetik spektrumun görünmeyen bölgesinde yer aldığı bilinmektedir. Üretilen lazer ışının çalışmalarda kullanılacak ürünlerin üzerine tam olarak odaklayabilmek için mercek sistemine 630 nm dalga boyuna sahip kılavuz lazer diyot yerleştirilmiştir. Kırmızı renkte görünen bu kılavuz ışının lazer gücü 5 mW olduğundan ürünlere herhangi bir zarar vermemektedir. Şekil 3.11'de üretilen lazer ışın ile kılavuz ışının dikroik ayna ile aynı seviyede eşleştirildiği görülmektedir. Dikroik aynalar, 630 nm'deki lazer ışını yansıtırken 915 nm'deki lazer ışını kırmadan doğrusal olarak iletebilme özelliğine sahiptir.

Kırmızı renkteki kılavuz ışının enerjik malzeme üzerine hizalanması ile 915 nm dalgaboyundaki ışının temas ettiği bölge belirlenebilmektedir. Şekil 3.12'de lazer mercek sistemi ve lazer ateşlenme test aparatı katı modeli verilmiştir.



Şekil 3.12. Lazer Mercek Sistemi ve Ateşlenme Test Aparatı Katı Modeli

Şekil 3.13'te ise Lazer Ateşleme Test Düzeneği'nde bulunan Lazer Mercek Sistemi ve sistemle birlikte kullanılan aparatlar görüntülenmiştir. Lazer Mercek Sistemi'nden çıkan lazer ışının odak mesafesi 50 mm olup odaktaki ışın çapı $110 \pm 5 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.13. Lazer Mercek Sistemi

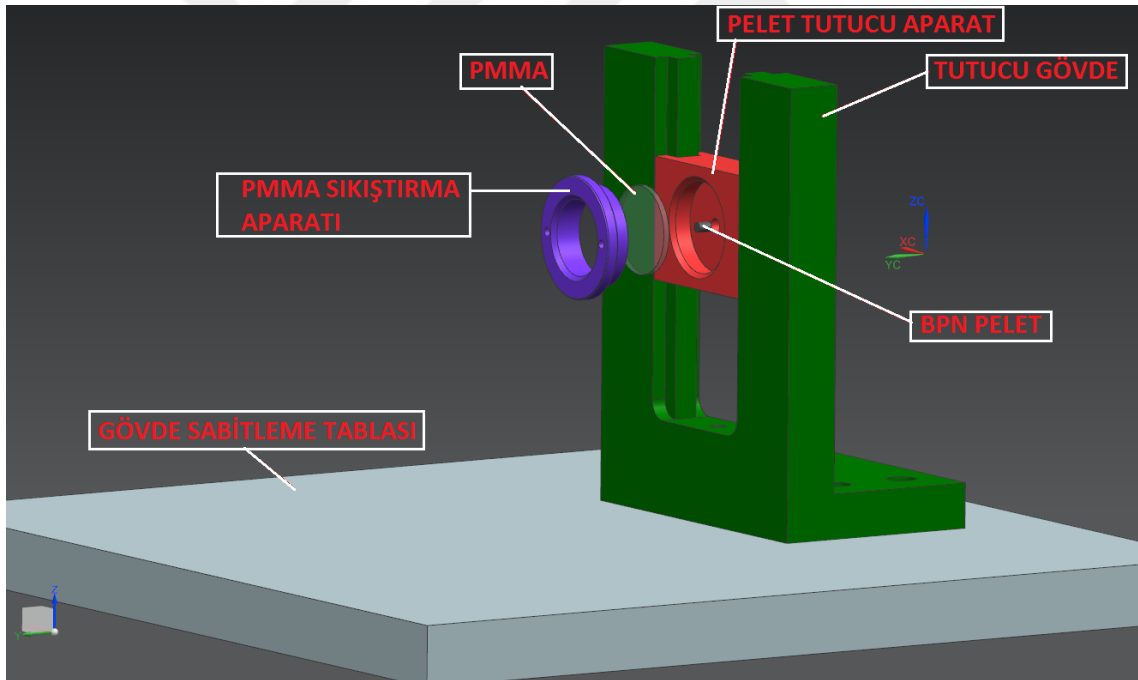
3.3.4. Lazer Ateşleme Test Aparatları

X-Y Koordinat Sehpaı

Lazer Mercek Sistemi'nin konumlandırılması için Proxxon marka hassas x-y koordinat sehpaı (bkz. Şekil 3.13) kullanılmıştır. Koordinat sehpaısının 1 tam turu 1 mm olup 0,050 mm kademe ve 0,005 mm (5 µm) hassasiyete sahiptir. Bu sayede odadaki ışın çapı sapması %5'i geçmemiştir.

Piroteknik Pelet Tutucu Aparat

Piroteknik malzemelerin konumlandırılması ve mercek sistemi ile aynı hizada tutulabilmesi için Piroteknik Pelet Tutucu Aparat tasarlanmış ve ürettirilmiiştir. Piroteknik Pelet Tutucu Aparat 4 parçadan oluşmaktadır: Tutucu Ana Gövde, Piroteknik Pelet Tutucu Gövde ve PMMA Tutucusu. Şekil 3.14'te Piroteknik Pelet Tutucu Aparatı görülmektedir (ayrıca bkz. Şekil 3.13).



Şekil 3.14. Piroteknik Pelet Tutucu Aparat

PMMA

Lazer Ateşleme Test Sisteminde PMMA kullanılmasına karar verilirken aşağıdaki parametreler dikkate alınmıştır;

- ✓ Işık geçirgenliğinin, ASTM D1003 veya DIN 5036 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen testlerde %92 olması,
- ✓ Darbelere karşı dayanıklılığının camdan daha iyi olması,
- ✓ Yurt içi imkânlarla üretilebilmesi,
- ✓ Lazer kesim ile istenilen çapta ve kalınlıkta kolayca üretilebilmesi,
- ✓ Maliyetinin oldukça düşük olmasıdır.

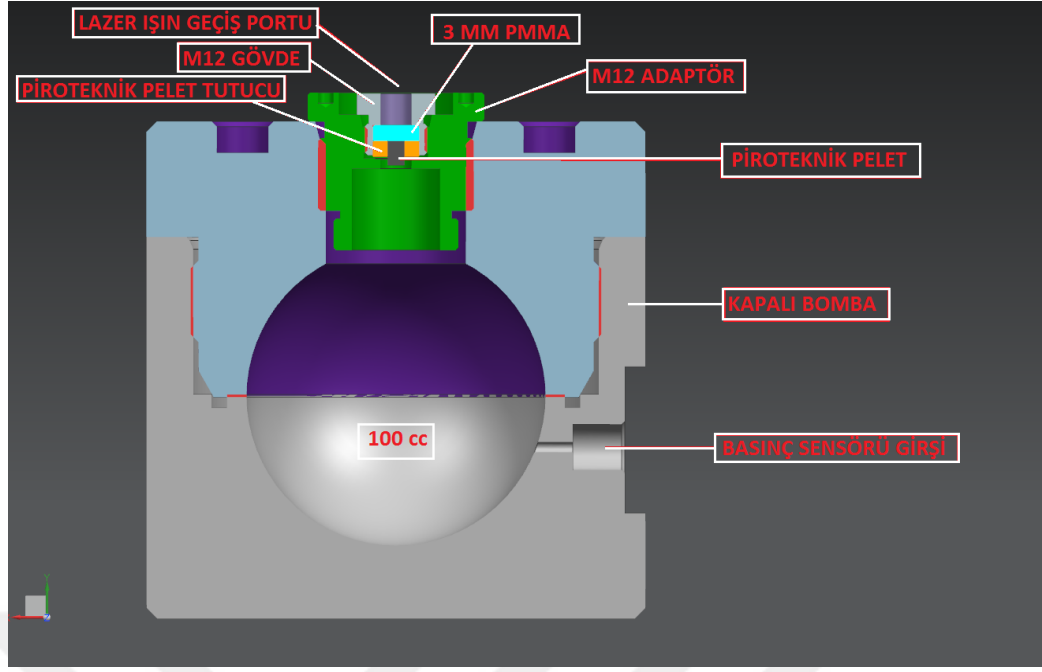
Lazer Test Sisteminde kullanılan PMMA'ların tek bir dezavantajı en yüksek 200°C'a dayanıyor olmalarıdır. Bu nedenle test sisteminde 2 mm, 3 mm ve 5 mm kalınlıklarda ve 29 mm çapta PMMA'lar kullanılmıştır.

3.3.5. Kapalı Bomba Test Düzeneği

BPN piroteknik peletlerin kapalı bomba test düzeneğinde ateşlenmesi ile basınç-zaman eğrilerinin elde edilmesi ve bu sayede boyutları belirli peletlerin basınca bağlı yanma hızının bulunması amaçlanmıştır. Bu bağlamda 100 cm³ hacme sahip AISI 304 paslanmaz çelik gövde, 0-350 bar arası basınç ölçebilen basınç sensörü ile BPN peletlerin bulunduğu ve kapalı bombaya bağlantıyı sağlayan Metrik 12 (M12) gövde kullanılmıştır. Şekil 3.15'te Kapalı Bomba Test Düzeneği gösterilmiştir.

Kapalı bombanın içerisindeki basınca dayanabilmesi için 3 mm kalınlıkta ve 9 mm çapta PMMA kullanılmıştır. PMMA, M12 gövde içerisine yerleştirilmiş ve sızdırmazlığın sağlanabilmesi için sızdırmaz epoksi conta kullanılmıştır.

BPN peletler, M12 gövde içerisine tutucu aparat ile sabitlenmiştir. Bu sayede peletlerin PMMA üzerine tam temas etmesi sağlanmıştır.

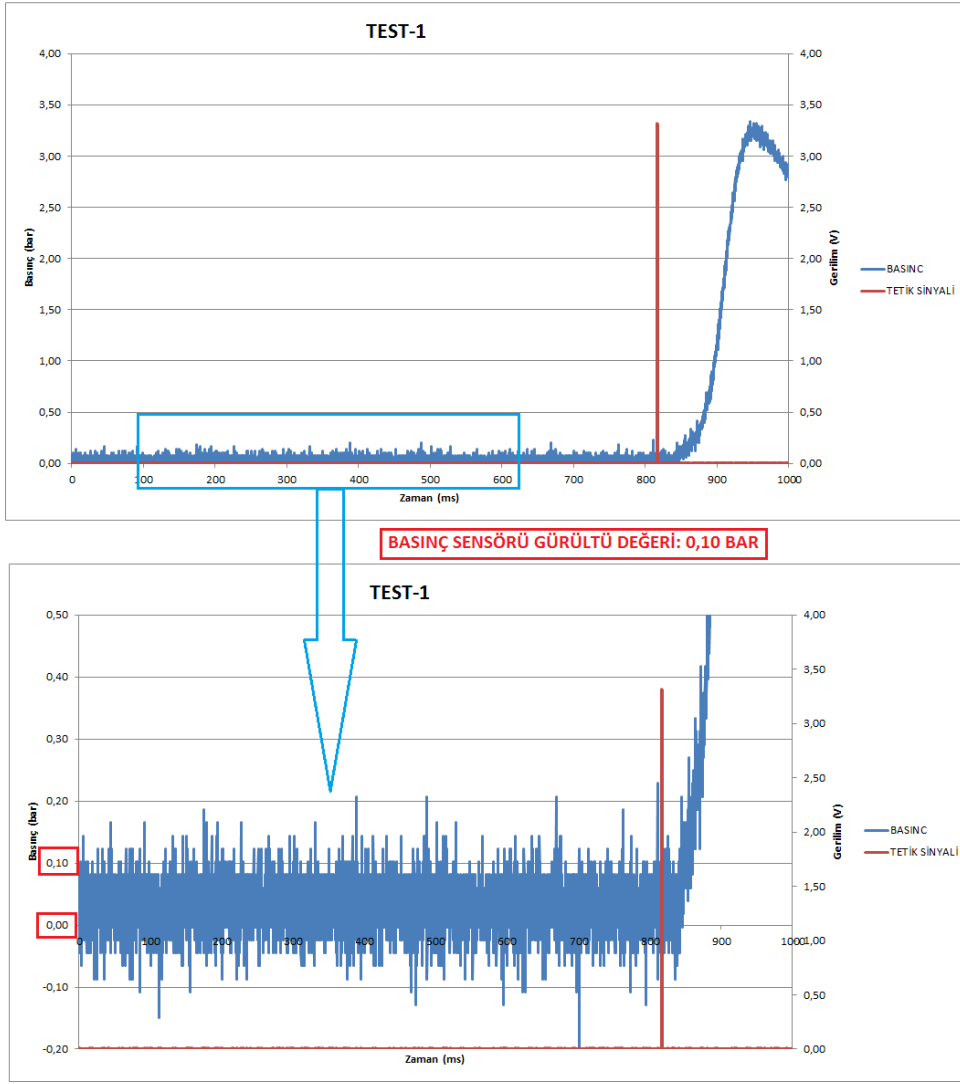


Şekil 3.15. 100 cc Kapalı Bomba Test Düzeneği

Her ateşleme sonunda kapalı bomba gövdesinin, basınç sensörü deliğinin ve basınç sensörünün ön yüzü temizlenerek kirlilik giderilmiş ve bu sayede oluşacak basınçların doğruluk oranı arttırılmıştır. Lazer Güç Ünitesi'nden gelen tetik sinyal verisini toplamak için üniteden çıkan BNC arayüz kablosu ile veri toplama sistemine bağlantı yapılmıştır.

3.3.6. Kapalı Bomba Test Sistemi

Kapalı Bomba Test Sistemi'nde kapalı bomba test düzeneği, lazer ateşleme test sistemi ve veri toplama sistemi bulunmaktadır. Bu test için veri toplama sistemiyle her 1 ms'de 10 veri toplanmıştır. Veri toplama sisteminde bir adet DC güç kaynağı, bir adet veri toplama cihazı ve 1 adet basınç sensörü kullanılmıştır. Veri toplama sisteminde kullanılan basınç sensörünün gürültü değerinin bulunabilmesi ve test sonrasında elde edilecek grafiklerin yorumlanabilmesi için yapılan kapalı bomba testlerinden bir tanesine ait basınç-zaman grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir. Grafikten basınç sensörünün gürültü değerinin 0,10 bar olduğu görülmektedir.



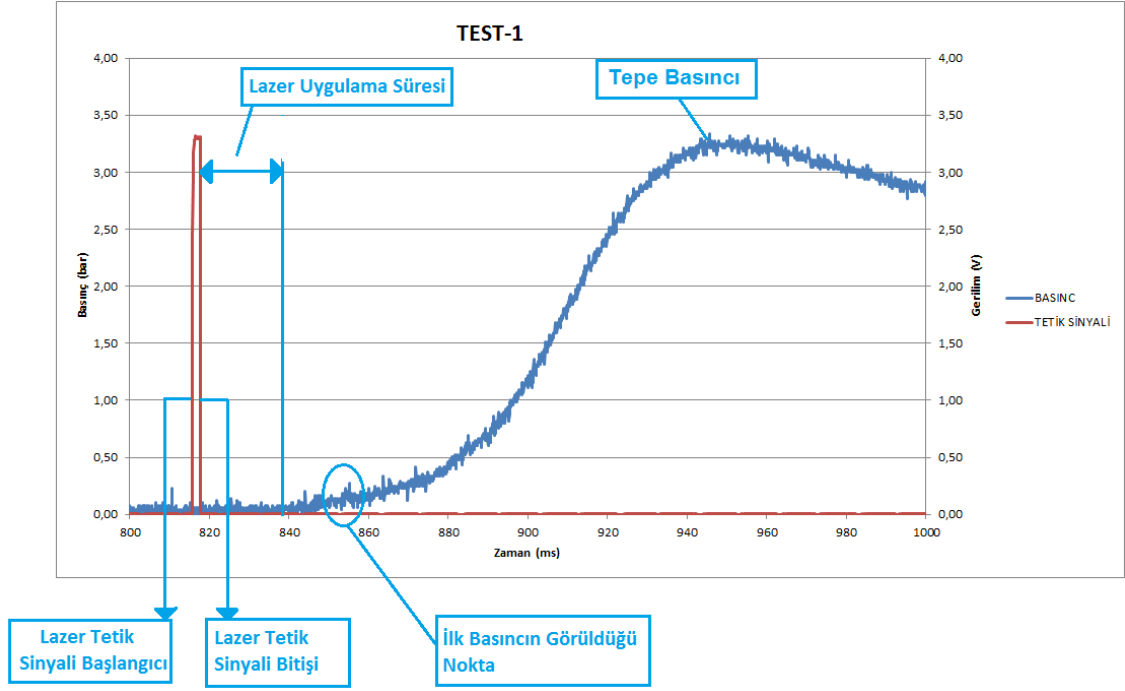
Şekil 3.16. Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç-Zaman Grafiğinden Basınç Sensörünün Gürültü Değerinin Bulunması

Basınç-zaman grafikleri değerlendirilirken kullanılan terimler ve tanımlamaları aşağıda verilmiştir;

- Tetik Sinyali Başlangıcı: Lazer Güç Ünitesi dokunmatik ekrandan "Başlat" komutu verildiğinde güç ünitesinin veri toplama sistemine gönderdiği ilk sinyaldir.
- Tetik Sinyali Bitişi: Lazer Güç Ünitesi ortalama 2 ms tetik sinyali göndermektedir.
- Lazer Uygulama Süresi: Dokunmatik ekrandan girilen lazer atım süresidir.

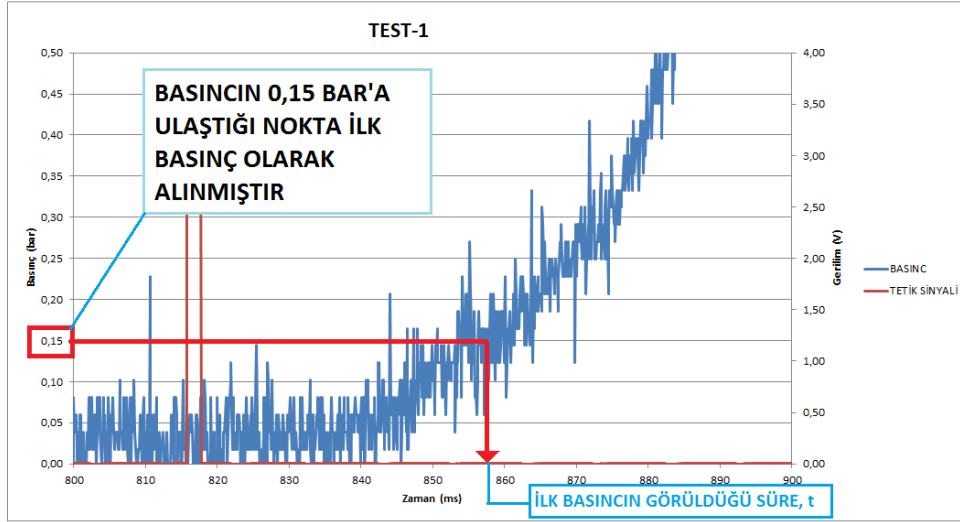
- İlk Basınç: BPN peletin ilk tutuşma anından itibaren grafikte görülen ilk basınç yükselmesidir.
- Tepe Basıncı: Kapalı Bomba içerisindeki basıncın en yüksek seviyeye ulaştığı basınçtır.

Şekil 3.17’deki grafik üzerinde yukarıda tanımlanan terimler gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç- Zaman Grafiğinde Kullanılan Terimlerin Gösterilmesi

Şekil 3.17’de ilk basıncın görüldüğü nokta ayrıntılı olarak Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Şekilden ilk basıncın görüldüğü süre olarak basıncın 0,15 bar’ı geçtiği an alınmıştır.



Şekil 3.18. Kapalı Bomba Testinde Elde Edilen Basınç- Zaman Grafiğinde 0,15 Bar'lık İlk Basınç Değerine Karşı Gelen Sürenin Tespit Edilmesi

3.3.7. Lazer Işın Karakterizasyonu

Lazer Ateşleme Test Sistemi tasarımı sırasında amaçlanan, Lazer Güç Ünitesi üzerinde bulunan dokunmatik ekrana girilen lazer güç ile Lazer Mercek Sistemi çıkışında ölçülen gücün aynı olmasıdır. Ancak, lazer ateşleme sisteminde kullanılacak piroteknik malzemenin yüksek sıcaklıkla beraber basınç çıktısının mercek sistemine zarar verebileceği düşünülerek mercek sistemi ile piroteknik malzeme arasına PMMA konulmasına karar verilmiştir. Dolayısıyla kullanılan PMMA'nın kalınlığına bağlı olarak ışık geçirgenliği ve yansıması değiştiği için tasarlanan 50 mm odak uzaklığı ve odaktaki lazer ışın çapı da değişmiştir. Bu değişim, sistemde kullanılan ürünlerden kaynaklı kayıplar olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda farklı noktalarda lazer güç ölçer (powermetre) kullanılarak lazer ışının gücü belirlenmiştir.

Lazer Işın Gücü Ölçüm Sonuçları

Lazer ışın gücü ölçümlerinde fotodiyot sensör (ürün kodu:S146C, ThorlabsInc., ABD) ve optik güç ölçer (ürün kodu: PM100D, ThorlabsInc., ABD) kullanılmıştır. Fotodiyot sensör, 900-1650 nm dalgaboyu aralığındaki lazer ışınların gücünü ölçebilmektedir. Sensör, en az 10 μ W ve en yüksek 20 W lazer gücü ölçebilmektedir. Lazer ateşleme test sisteminde kullanılan 1 W'lık ve 10 W'lık lazer diyotların güçleri hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Sensörün ölçüm



The photograph shows two pieces of equipment. On the left is a black, rectangular photodiode sensor with a circular measurement area on its front face. On the right is a red and white optical power meter with a digital display showing '14.48 mW' and various control buttons. Red arrows point from the text labels to the corresponding parts of the equipment.

Fotodiyot sensör

Optik güç ölçer

Işının gönderildiği ölçüm alanı (çap:12 mm)

Fotodiyot sensörün tepkisi gönderilen ışının dalgaboyuna bağlı olduğu için ölçüm öncesinde kullanılan lazer ışının dalga boyu sensörden seçilebilmektedir. Sensöre iletilen lazer ışını ile doğru orantılı olarak sensörden gerilim çıkışı alınmakta ve optik güç ölçer ile ışın gücüne çevrilmektedir.

- Mercek Sistemi çıkışı
- 2 mm kalınlıktaki PMMA çıkışı
- 3 mm kalınlıktaki PMMA çıkışı
- 5 mm kalınlıktaki PMMA çıkışı

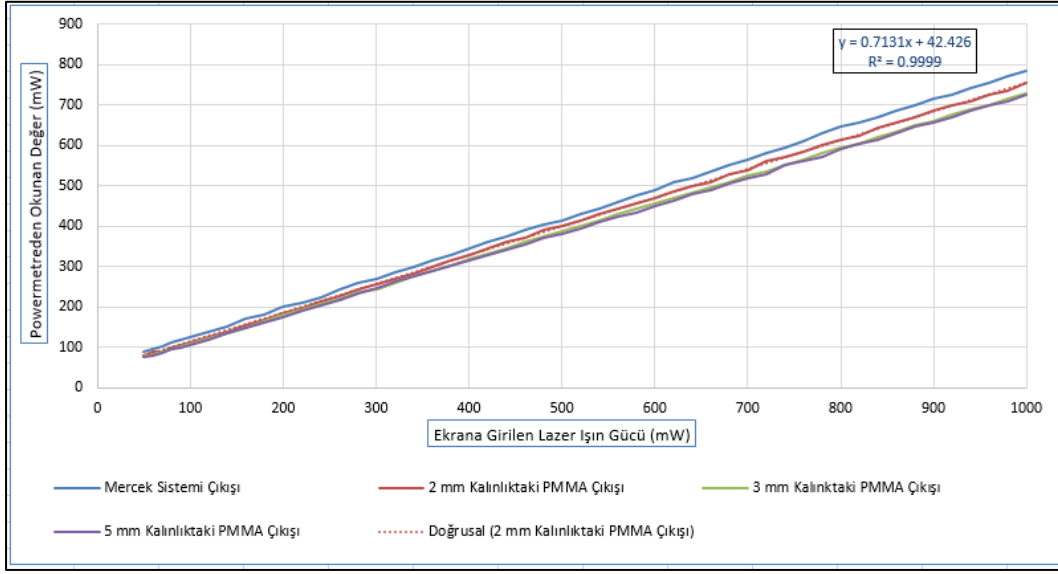
59

Çizelge 3.9. Farklı PMMA Kalınlıkları Çıkışında Lazer Güç Ölçüm Sonuçları

LAZER KAYNAĞI	1W-915 nm	PMMA ÇIKIŞI GÜÇ ÖLÇERDE OKUNAN DEĞER (mW)		
		2 mm KALINLIK	3 mm KALINLIK	5 mm KALINLIK
90	120	105	103	100
100	125	112	110	106
120	140	127	123	120
140	153	140	135	134
160	170	155	150	150
180	180	167	165	161
200	200	185	180	175
220	210	197	193	190
240	225	213	209	205
260	242	226	220	217
280	260	242	237	233
300	270	257	245	246
320	287	270	260	263
340	300	283	275	275
360	317	300	290	290
380	330	315	303	302
400	345	330	320	315
420	360	345	332	330
440	375	360	346	343
460	390	370	360	355
480	403	390	373	370
500	415	400	388	382

520	430	415	402	395
540	445	430	415	410
560	460	445	429	424
580	475	455	442	435
600	490	470	455	450
620	510	485	470	463
640	520	500	483	480
660	535	510	495	490
680	550	530	510	505
700	565	540	525	520
720	580	560	535	530
740	595	570	550	550
760	610	585	565	560
780	630	600	580	570
800	645	613	595	590
820	655	625	605	603
840	670	642	620	613
860	685	655	635	630
880	700	670	650	645
900	715	685	660	655
920	725	700	675	670
940	740	710	690	685
960	755	725	700	700
980	770	735	715	710
1000	785	755	730	725

Ölçümler 20 mW aralıklarla yapılmıştır. Çizelge 3.9'daki veriler kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 3.20'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde test sisteminde kullanılan 2 mm kalınlığında PMMA çıkışındaki lazer gücünün, mercek sisteminden çıkan lazer güce oranla ortalama %17,7, 100 mW ile 300 mW arasında ise ortalama %5,7 azaldığı görülmektedir. Lazer gücü arttıkça kaybın da arttığı ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. PMMA kalınlığı arttıkça kaybın da arttığı ayrıca anlaşılmaktadır. Ancak, her PMMA kalınlığı için değişimin doğrusal olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.20. Ekrana Girilen Lazer Işın Gücünün Farklı Kalınlıklardaki PMMA Çıkışlarında Elde Edilen Lazer Güç Değerlerinin Karşılaştırılması

Lazer ile ateşleme sisteminde kullanılan test yöntemleri nedeniyle piroteknik pelet üzerine düşen lazer güç esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

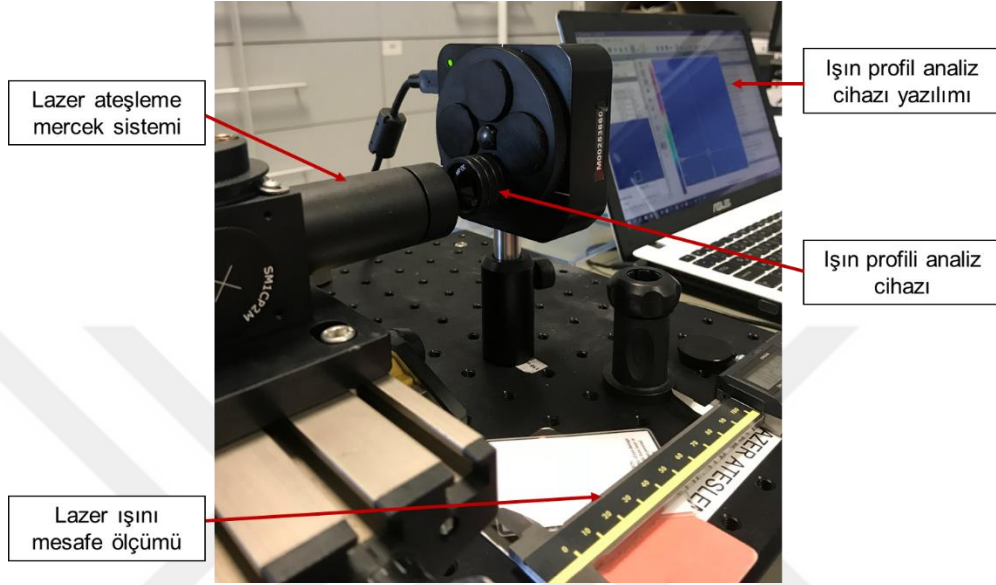
PMMA kalınlığının lazer ışın gücünü değiştirmesine bağlı olarak, lazer odak noktasının da değişeceği düşünülerek odak noktasını belirleme çalışmaları yapılmıştır.

Lazer Işın Çapının Ölçümü

Lazer ışın çapının ölçümü ve ışın dağılımının incelenmesi için optik ışın profil analiz cihazı (*ing.optical beam profiler*) kullanılmıştır. Lazer mercek sisteminden çıkan lazer ışını ışın profil analiz cihazına (ürün kodu: BP209-VIS, Thorlabs Inc.,

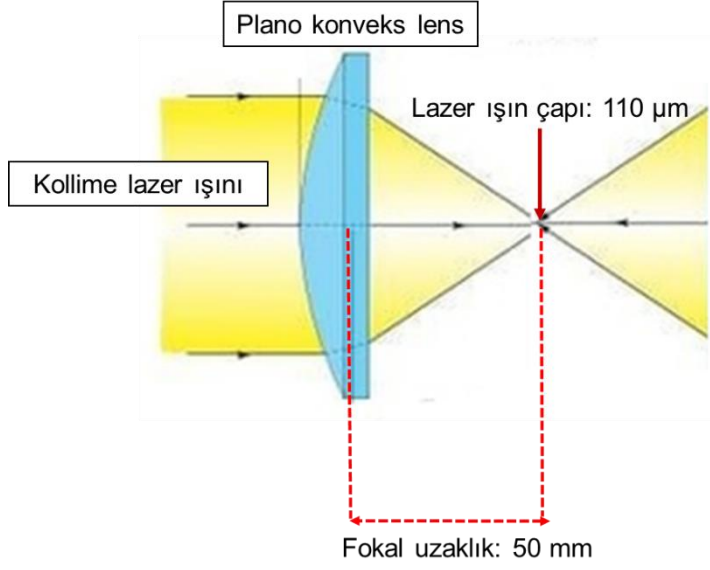
ABD) iletilmekte olup, lazer ışın x ve y eksenler doğrultusunda taranmakta ve ışın dağılım kalitesi ile ışın çapı iki boyutlu olarak ölçülmektedir.

Şekil 3.21’de Lazer Ateşleme Sisteminin ışın çapının ve odak uzaklığının bulunması için kullanılan cihazın ve ölçme yönteminin fotoğrafı verilmiştir.



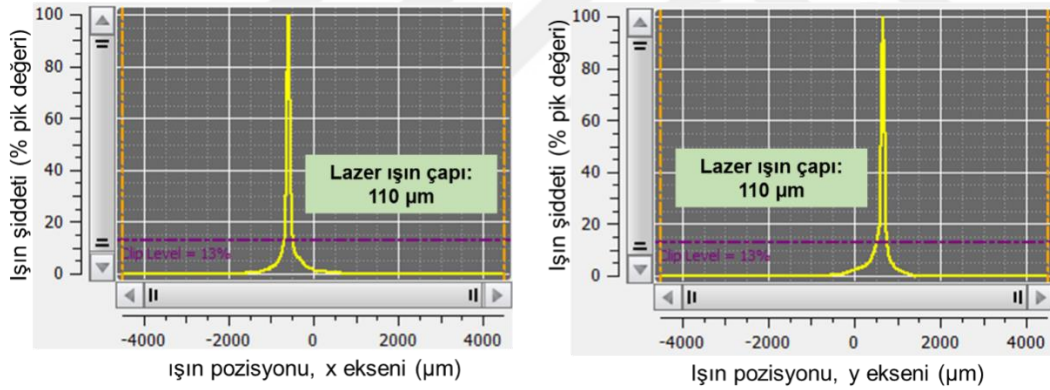
Şekil 3.21. Lazer Ateşleme Sistemi Optik Işın Analizi

Lazer ateşleme test sisteminde kullanılan lazer mercek sistemindeki plano konveks lensin odak uzaklığı 50 mm olup odaktaki lazer ışın çapı $110 \pm 5 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Kollime ışının odaklanması ve ışın dağılımının şematik gösterimi Şekil 3.22’de verilmiştir. Şekilden anlaşılabacağı üzere odak öncesinde ve odak sonrasında ışın çapının arttığı görülmektedir. Bu nedenle, çalışmalarda odak uzaklığı önemli bir parametre olmuştur.

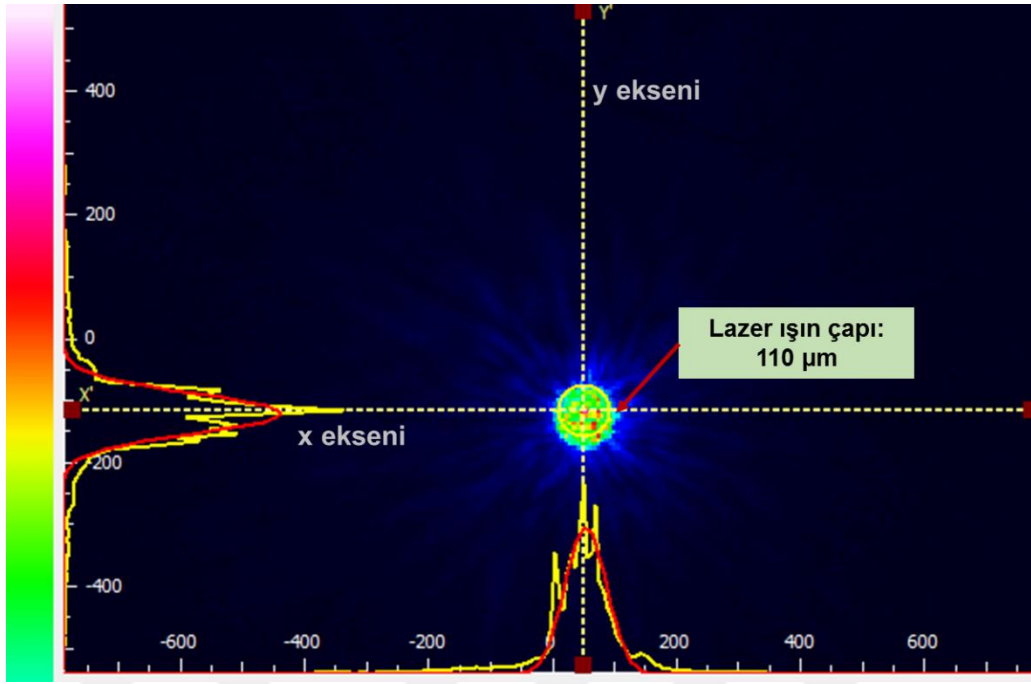


Şekil 3.22. Lazer Işın Dağılımının Şematik Gösterimi

Lazer ışın profil analiz cihazı ile fokal mesafede lazer ışının dikey (y eksen) ve yatay (x eksen) yöndeki çap ölçüm sonuçları ve ışın dağılımı Şekil 3.23'te ve Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Fokal Mesafede Lazer Işın Çapı Ölçüm Sonuçları

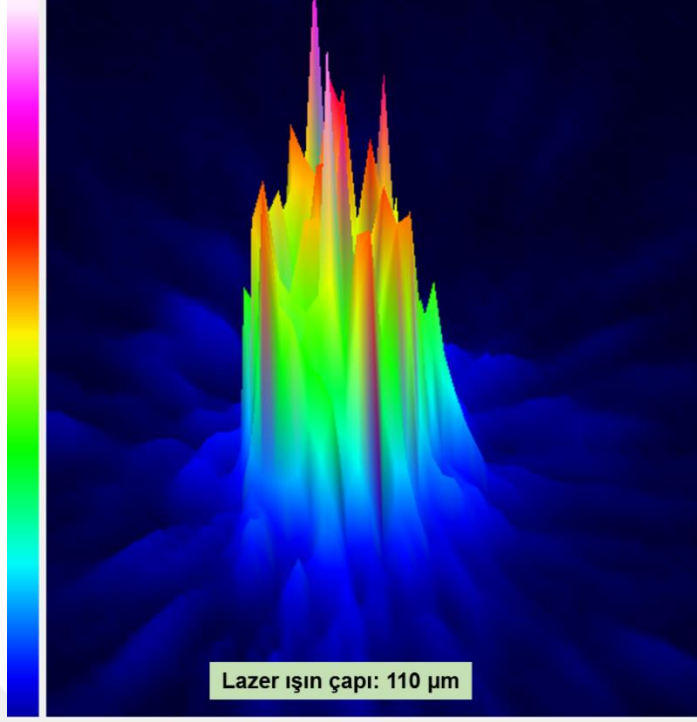


Şekil 3.24. Fokal Mesafede Lazer Işın Dağılımı

Yapılan ölçümler sonucunda mercek sistemi çıkışındaki odak noktasında ışın çapının $110 \pm 5 \mu\text{m}$ olduğu doğrulanmıştır.

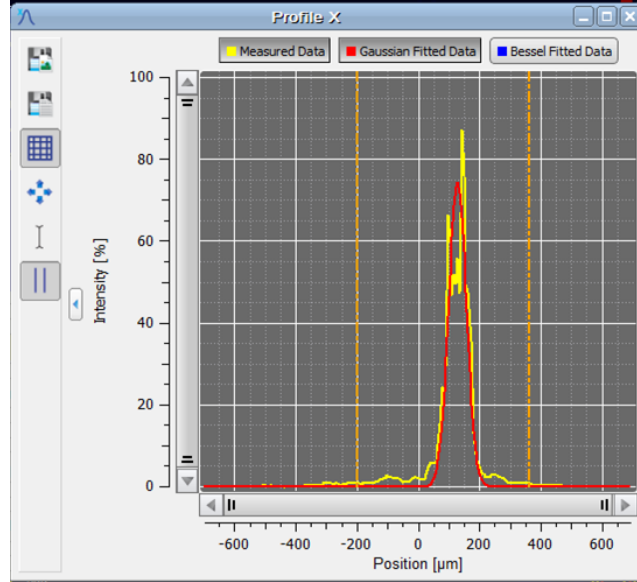
Lazer Test Sisteminde kullanılan 2 mm, 3 mm ve 5 mm kalınlıktaki PMMA levhalar mercek sistemi önüne konumlandırılarak ışın çapının $110 \pm 5 \mu\text{m}$ olduğu odak uzaklığı bulunmuştur. 2 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığı durumda odak uzaklığı 51,55 mm, 3 mm kalınlıkta kullanıldığı durumda 52,25 mm ve 5 mm kalınlıkta kullanıldığı durumda ise 52,65 mm olarak değiştiği görülmüştür.

Ölçümler sırasında lazer ışın demetinin modeli de çıkartılmış olup, 2 mm kalınlıkta PMMA plakanın kullanıldığı durumda, 51,55 mm optik mesafedeki lazer ışın dağılımı Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Odak Noktasındaki Lazer Işının Dağılımı

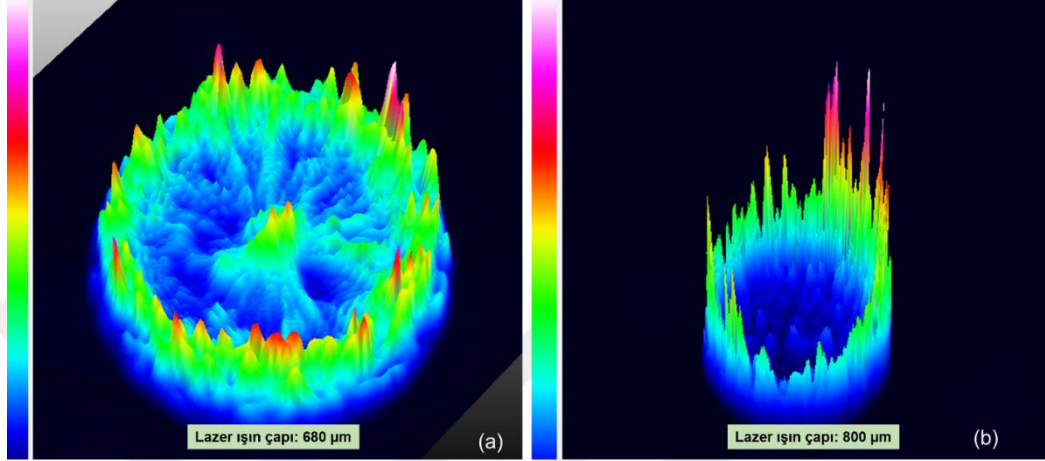
Odak noktasındaki lazer ışının Gaussian modeli ile uyumluluğu da Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Şekilden odak noktasındaki lazer ışının Gaussian model ile uyuştuğu görülmektedir.



Şekil 3.26. Lazer Işının Gaussian Model İle Uyumluluğu

2 mm kalınlıktaki PMMA kullanılarak fokal uzaklıktan daha kısa mesafelerde de ayrıca ölçümler alınmıştır. Mercekten 44 mm uzaklıkta lazer ışın çapı 800 μm

iken 47 mm uzaklıkta 680 μm olduğu ölçümler sonucunda anlaşılmıştır. Şekil 3.27’de belirtilen uzaklıkta elde edilen lazer ışınlarının 3 boyutlu dağılımları görülmektedir. Şekil 3.27’den ışın demetlerinde homojen dağılımların olmadığı, farklı çaplarda lazer ışın elde edilmek istenirse mercek sisteminin değiştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.



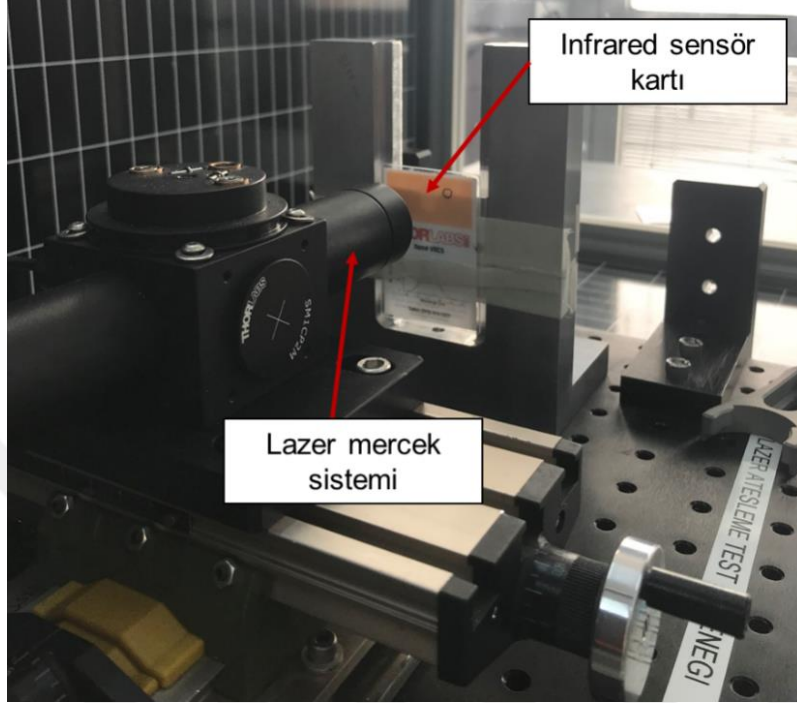
Şekil 3.27. 2 mm Kalınlıktaki PMMA Kullanıldığında Lazer Işın Çapının ve Işın Dağılımının Gösterimi, (a) optik mesafe: 47 mm, (b) optik mesafe: 44 mm

Lazer Ateşleme Sistemi Tetikleme Sinyali

Lazer Ateşleme Test Düzeneği içerisinde bulunan Lazer Güç Ünitesi’nde 1 adet tetik sinyal çıkışı bulunmaktadır. Tetik sinyal çıkışı hızlı kamera veya veri toplama sistemine bağlanabilmektedir. Dokunmatik ekrandan başlat komutu ile tetik sinyali 3,3 Volt’luk bir gerilim üreterek öncelikle hızlı kamerayı tetiklemekte ve daha sonra lazer ışın üretilmektedir. Sistemdeki gecikmeleri bulabilmek için lazer ışın süresi doğrulanmıştır.

Lazer ateşleme sistemi güç ünitesi dokunmatik ekranına girilen ışın süresinin doğrulanması amacıyla yapılan bu çalışmada hızlı kamera ve infrared sensör kartı (ürün kodu: VRC5, ThorlabsInc., ABD) kullanılmıştır. Infrared sensör kartı, 915 nm dalga boyunda lazer ışınının görsel olarak incelenebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kart yüzeyine, infrared bölgedeki lazer ışını gönderildiği zaman, kart üzerindeki 915 nm dalga boyundaki ışığa duyarlı yüzey, lazer ışını görünür olmaktadır. Dokunmatik ekrana girilen 2 ms ile 100 ms arasındaki farklı

lazer ışın süreleri için, sensör kartta lazer ışınının görüldüğü süre hızlı kamera ile incelenmiştir. Şekil 3.28'de lazer ışın süresi doğrulama test yöntemi fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.28. Lazer Işın Süresi Doğrulama Yöntemi

Sensör kartı 50 mm uzaklıkta bulunan Pelet Tutucu Aparat üzerine yerleştirilmiştir. Dokunmatik ekrana 50 mW lazer gücü girilerek sabitlenmiştir. Tetik sinyal kablosu hızlı kameraya bağlanmış ve hızlı kamera ile 50.000 fps (*ing.framepersecond*) yani 0,02 ms'de bir görüntü alınması sağlanmıştır. Güç ünitesi ekranına girilen lazer ışın süresi ile infrared sensör kartı üzerinde hızlı kamera ile ölçülen lazer ışın süreleri kıyaslanmıştır. Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de hızlı kamera görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.29. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 2 ms



Şekil 3.30. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 5 ms



Şekil 3.31. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi: 7 ms



Şekil 3.32. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:10 ms



Şekil 3.33. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:15 ms



Şekil 3.34. Dokunmatik Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi:20 ms



Şekil 3.35. Dokunmatik Ekranı Girilen Lazer Uygulama Süresi:25 ms

Şekillerde verilen soldaki görüntü lazer ışınının sensör kart üzerinde ilk görüldüğü anı, sağdaki görüntü ise lazer ışının sonlanıldığı anı göstermektedir.

Lazer ışın süresi doğrulama yöntemi ile 2 ms ile 25 ms arasındaki farklı lazer ışın süreleri için lazer ışın süreleri ölçülmüş ve lazer ateşleme sistemi ışın sürelerindeki sapmalar belirlenmiştir. Çizelge 3.10'da görüntülerden elde edilen sonuçlar toplu olarak karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.10. Lazer Işın Süresi Doğrulama Sonuçları

Ekrana Girilen Lazer Uygulama Süresi (ms)	İlk Görüntünün Alınma Süresi (ms)	Son Görüntünün Alınma Süresi (ms)	Gerçekte Lazer Uygulama Süresi (ms)
2	2,02	2,34	0,32
5	2,02	5,34	3,32
7	2,02	7,34	5,32
10	2,02	10,34	8,32
15	2,02	15,34	13,32
20	0,00	20,32	20,32
25	0,00	25,34	25,34

Çizelge 3.10'dan anlaşılacağı üzere Lazer Ateşleme Güç Ünitesi 20. milisaniyeye kadar 2,02 ms gecikmeli lazer ışını üretmektedir. 20. milisaniye dâhil olmak üzere 20 ms'den büyük uygulama sürelerinde ise herhangi bir gecikme olmadığı görülmüştür. Güç ünitesinin dokunmatik ekrana girilen her değer için 0,32 ms fazladan lazer ışını üretmekte olduğu anlaşılmıştır.

Lazer Uygulama Süresi doğrulama çalışması sonucunda aşağıdaki kabullerin yapılmasına karar verilmiştir.

- 0,32 ms fazla üretilen lazer ışını ihmal edilmiştir.
- Sistemin lazer ışını gecikme süresi 2,0 ms olarak alınmıştır.
- Lazer uygulama süresi 1 ms isteniyorsa ekrana 3 ms girilmiştir. 20. milisaniyeye kadar istenilen her lazer uygulama süresi üzerine 2 ms eklenerek ekrana girilmiştir. 20. milisaniyeden büyük uygulama sürelerinde lazer gecikme süresi eklemesi yapılmamıştır.

Lazer Işının Yansıması ve Absorplanması

Görünür bölgede ışın yayan herhangi bir kaynak ile optik kablodaki olası çatlaklar, ışın sızıntısının gözle muayeni ile tespit edilebilmektedir. Işın gücünün ölçümü için, çalışılan dalga boyunda ve güç aralığında ölçüm yapmaya uygun, güç metresi (power meter) veya fotodiyot olarak adlandırılan optik sensörün kullanımı uygundur. Bu sensör ile lazer kaynak gücü ve lazer kaynak ile eşleştirilen fiber optik çıkışındaki ışın gücü ölçümü ile eşleşme kayıpları belirlenebilmektedir. Ayrıca, fiber kor çıkışındaki ışın gücü ve piroteknik pelet arka yüzeyindeki ışın gücü ölçümü ile piroteknik pelet absorpsiyonu, ışın kırılma ve geçirgenlik yüzdeleri belirlenebilmekte ve bununla birlikte piroteknik malzeme içerisine karıştırılan “karbon black” veya optik boyalar gibi optik absorplama özelliği bulunan katkı maddelerinin ve piroteknik pelet presleme gücünün, pelet absorplama miktarına etkisi incelenebilmektedir.

Literatür araştırmalarında lazer ışının pelet yüzeyinden yansımasıyla ilgili olarak farklı değerler verildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda en düşük %3 ve en yüksek %50 [16] oranında lazer ışınının yansıdığından bahsedilmektedir. Ancak, %50 gibi yüksek yansıma oranlarında kullanılan lazer cinsinin ve dalga boyunun etkilerinin oluşmasının yanı sıra kullanılan pirotekniğin yüzey

pürüzlüğünün de etkisi olduğu aşikârdır. Absorplanma katsayısının lazer ateşleme parametrelerine etkisinin olduğu bilinmektedir. Hem yansıma hem de absorplanmanın etkilerinin dâhil edilmesiyle bulunan değerlerin daha düşük olacağı bilinmektedir. BPN peletin görünüş itibarıyla siyaha yakın renkte olması nedeniyle yansımanın çok düşük olduğu düşünülerek tez çalışmasında yansıma ihmal edilmiştir.

3.4. Bruceton Testi

Tez çalışması kapsamında elde edilen lazer ateşleme süreleri ve lazer güç verileri, Neyer-D optimal bilgisayar programı kullanılarak Bruceton analizinde gerçekleştirilmiştir.



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

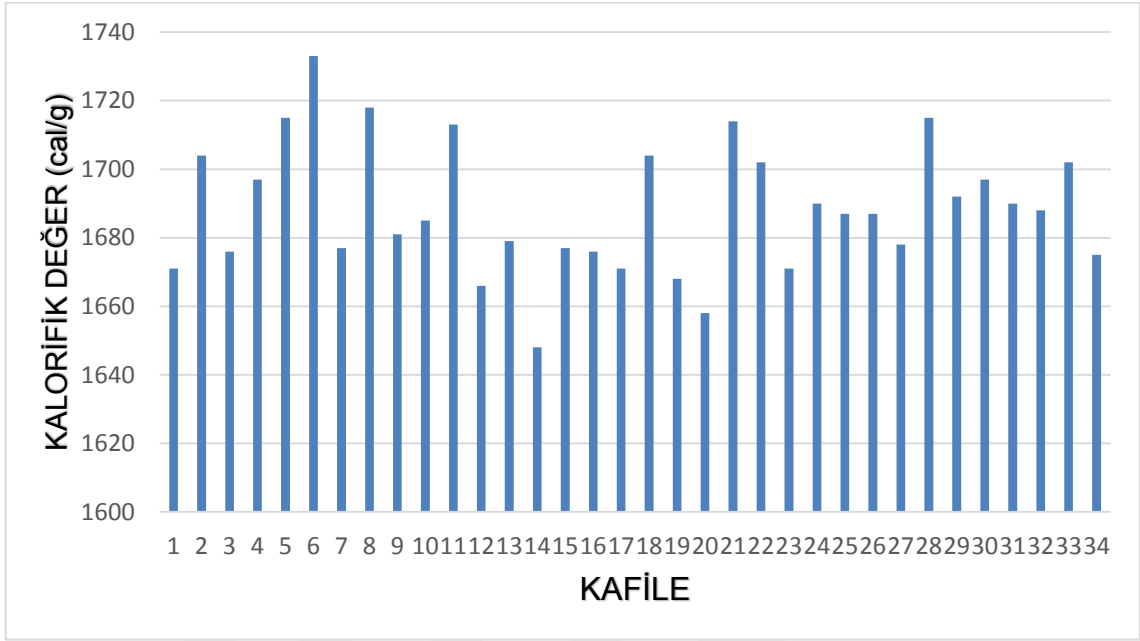
Tez çalışmasının ilk kısmında katı yakıtlı roket motorların ateşlenmesinde kullanılan ateşleyicilerden BPN piroteknik tozunun üretim yöntemi geliştirilmiş ve gereksinimler belirlenmiştir. İkinci olarak, üretilen BPN piroteknik tozdan pelet üretimi yapılmıştır. Daha sonra savunma sanayiinde ihtiyaç duyulan ve ateşleme zincirinde kullanılacak olan BPN peletlerin isterlere göre boyutları belirlenmiş ve bu boyutlarda üretilen peletler için yoğunluk çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son kısmında BPN peletlerin lazer ile ateşlenme karakteristiği belirlenerek yanma hızları ölçülmüştür. Elde edilen tüm veriler MIL-P-46994B standardında belirtilen gereksinimler ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Bor Potasyum Nitrat Pirotekniği Tozun Üretim Sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında MIL-P-46694B standardına uygun olarak BPN pirotekniği tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, standartta belirtilen özelliklerde bor ve potasyum nitrat kullanılırken, polyester bağlayıcı olarak Viton kullanılmıştır. İlk olarak, vitonun çözünmesi için kullanılacak aseton miktarı belirlenmiştir. Belirtilen miktardan az aseton kullanılması vitonun tam olarak çözünmemesine neden olmuştur. Ayrıca asetonun az olması durumunda vitonun bor-potasyum nitrat toz karışımına tam olarak karışmadığı da presleme sırasında anlaşılmıştır. Bu durumda presleme sonrasında oluşturulan peletin mekanik dayanımının azaldığı ve kırılgan hale geldiği görülmüştür. Asetonun fazla kullanılması çöktürme için daha fazla ürün kullanılmasını gerektirmiş, bu da malzeme sarfiyatının ve dolayısıyla atık malzeme miktarının artmasına neden olmuştur. Çalışmalar sonucunda gerekli çöktürücü miktarı belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında 44 kfile (yaklaşık toplam 2100 gram) BPN pirotekniği üretilmiş ve üretim sonrasında tüm kafilenin kalorifik enerji tayini yapılarak, kalorifik değerin istenilen değer aralığında olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.1'de üretimi gerçekleştirilen BPN pirotekniklerin kalorifik değer sonuçları verilmiştir. 44 kfile içerisinde ilk 34 kafilenin sonuçları incelendiğinde kalorifik değerin en düşük 1630 cal/g ve en yüksek 1730 cal/g olduğu saptanmış ve ortalama kalorifik değer 1688 cal/g olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre BPN pirotekniği kalorifik değeri 1675 ± 75 cal/g olarak

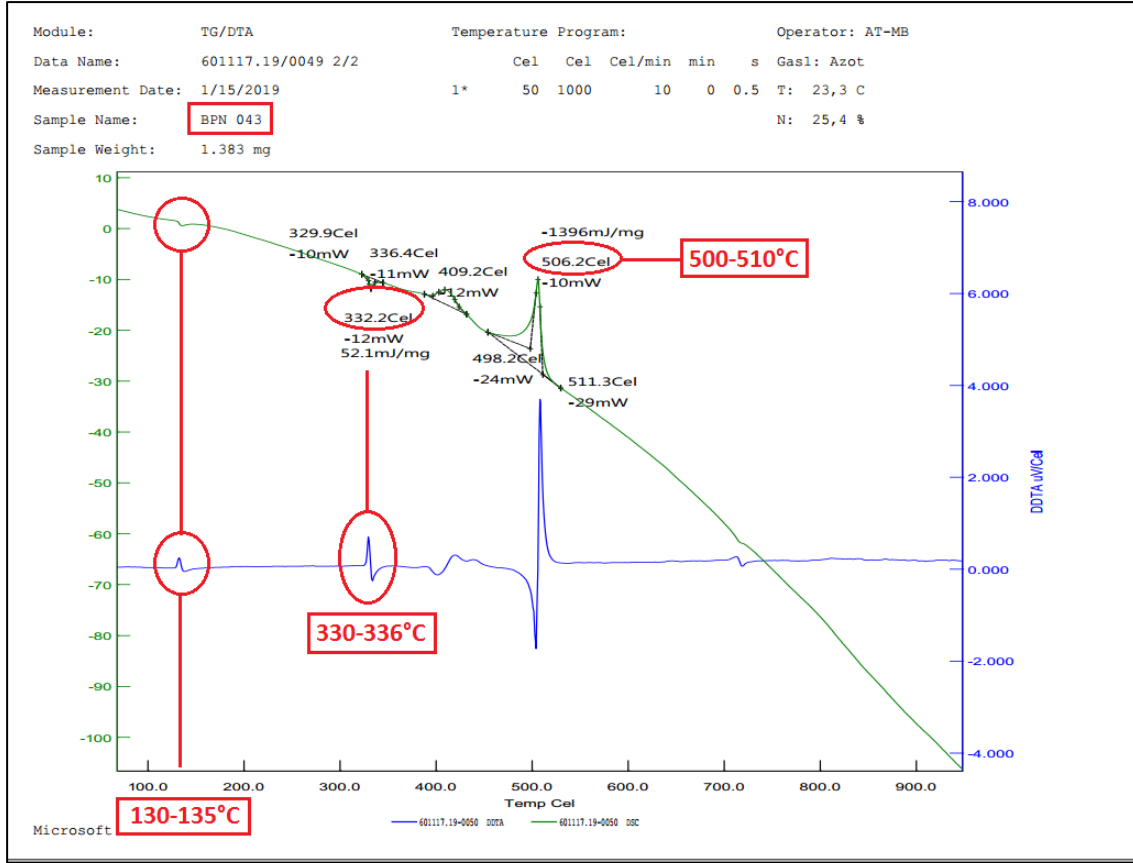
gereksinimlere eklenmiştir. EK-1'de son 3 kafiye ait kalorifik değer sonuç çıktıları verilmiştir.



Şekil 4.1. Tez Çalışması Kapsamında Üretilen 34 Kafile BPN Pirotekniği Tozun Kalorifik Değer Sonuçlarının Karşılaştırılması

BPN pirotekniği tozunun yoğunluk analizi çalışmaları sonucunda 42. Kafilenin yoğunluğu $2,17 \text{ g/cm}^3$, 43. kafilenin yoğunluğu $2,16 \text{ g/cm}^3$ ve 43. kafilenin yoğunluğu $2,15 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bu değerler piroteknik toz için en yüksek teorik yoğunluk (*ing. maximum teoritical density*) olarak ifade edilmiştir. BPN piroteknik tozunun ortalama yoğunluk değeri $2,16 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ olarak gereksinimlere eklenmiştir. EK-2, EK-3 ve EK-4'te BPN pirotekniği tozlarının yoğunluk tayini çıktıları verilmiştir.

Üretimi gerçekleştirilen BPN piroteknik tozunun DSC analizi sonucu Şekil 4.2'de sunulmuştur. Şekilden ilk endotermik çıktının $130-135^\circ\text{C}$ arasında, ikinci endotermik çıktının $330-336^\circ\text{C}$ arasında ve ilk ekzotermik reaksiyonun ise $500-510^\circ\text{C}$ arasında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu analiz sonuçları literatür değerleri ile uyumaktadır. Her üretim sonrasında BPN Piroteknik tozların DSC analizlerinin yapılarak kalite kontrolünün sağlanması gereksinimlere eklenmiştir.



Şekil 4.2. BPN Piroteknik Tozun DSC Analizi

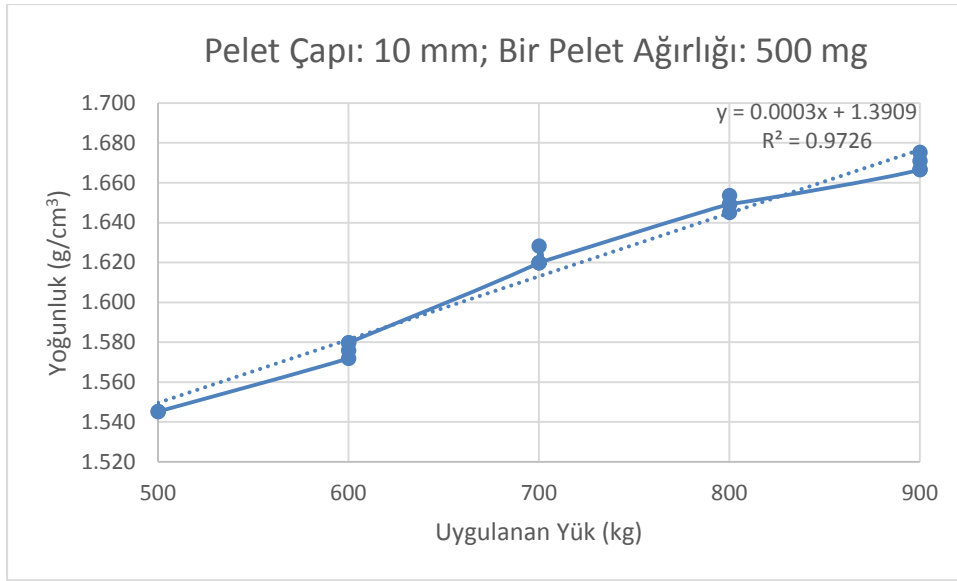
4.2. Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Pelet Üretimi Sonuçları

Farklı amaçlar için farklı çaplarda üretilecek peletlere ihtiyaç olduğundan, tez çalışmasının bu kısmında 10 mm, 9 mm, 8 mm ve 3,22 mm çapındaki peletlerin yük altında üretilebilirliği ve uygulanan yükün pelet yoğunluğuna etkisi araştırılmıştır.

BPN piroteknik pelet üretiminde 1000 kg'lık ve 450 kg'lık presleme yükü uygulayabilen iki adet pinömatik pres kullanılmıştır. Üretimlerde kullanılan hasas terazinin çalışmadan 2 saat önce açılarak ortam sıcaklığında 2 saat bekletilmesi sağlanmıştır. Terazinin topraklama hatları kontrol edilerek statik elektriğin oluşması engellenmiştir. Tartımlarda kullanılan tartım kaşıkları üzerinde herhangi bir yabancı madde olmaması için üretim öncesi ve sonrasında teknik aseton kullanılarak temizlenmiştir. Tartım kaşıkları üretim öncesi oda sıcaklığında en az 2 saat bekletilmiştir. Şekil 3.4'te gösterilen peletleme işlemi sırasında kullanılan aparatlar 70°C'daki fırında 1 saat bekletildikten sonra oda

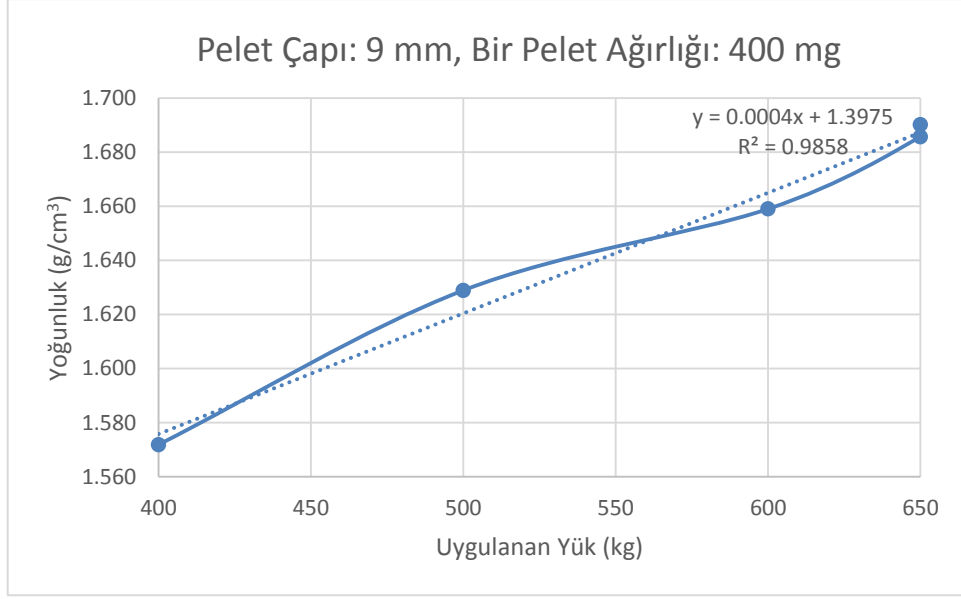
sıcaklığında 2 saat daha bekletilmiştir. Bu sayede üzerinde herhangi bir nem bırakılmamasına dikkat edilmiştir. Peletlerin her üretiminde kullanılan döküm haznesi ve basma pimi kuru bez ile silinerek üzerinde kalan piroteknik malzeme uzaklaştırılmıştır. Peletler tekrar tartılarak üretim sırasında kütle kaybının yaşanıp yaşanmadığı kontrol edilmiştir. Tartımlar sonunda yaklaşık 0,5 mg ağırlık kaybının gerçekleştiği ve bunun çalışmaları etkilemeyecek küçüklükte olduğu anlaşıldığından ihmal edilmiştir. Hassas ölçümler sonucunda ağırlık ve yüzey pürüzlülüğü açısından hata payının ihmal edilebilecek seviyede olduğu anlaşılmıştır.

Çalışmalara ilk olarak 10 mm'lik çapa sahip peletlerin üretimiyle başlanmıştır. Pelet üretimi için 500 mg BPN pirotekniği tartılmış ve başlangıç olarak 500 kg'lık yük uygulanmıştır. Yükler 100'er kg artırılarak 900 kg'a kadar çıkartılmıştır. Uygulanan yüklere karşılık boy ölçümleri yapılarak yoğunluk hesapları yapılmıştır. Şekil 4.3'te uygulanan yüke karşı gelen yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Şekilden uygulanan yükle yoğunluğun doğrusal olarak arttığı görülmektedir. 10 mm çapındaki peletler için uygulanan en düşük 500 kg presleme basıncı 63,7 MPa ve en yüksek 900 kg presleme basıncı 114,6 MPa olarak hesaplanmıştır. Diğer çaplardaki peletlerin üretimlerinde de presleme basıncının hesaplanan bu aralıkta olmasına dikkat edilmiştir. Ancak, 114,6 MPa'dan daha yüksek basınçların uygulanma sonrasında peletlerin aparatlardan çıkarma zorluğu yaşanması ve iş güvenliği açısından tehlikeli nedeniyle daha yüksek uygulama basınçlarında çalışılmamıştır. Şekilden uygulama basıncının 63,7 MPa'dan 114,6 MPa'a artırılmasıyla pelet yoğunluğunun 1,545 g/cm³'den en yüksek 1,670 g/cm³ değerine çıktığı anlaşılmaktadır. Bu yoğunluk aralığının MIL-P-46694B standardında verilen yoğunluk aralığının içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. 10 mm Çapındaki Peletlerin Üretiminde Uygulanan Yükün Pelet Yoğunluğuna Etkisi

Üretime 9 mm'lik çaplı peletlerle devam edilmiştir. Bu çaptaki pelet üretimi için 400 mg BPN pirotekniği tartılmış ve başlangıç olarak 400 kg'lık yük uygulanmış ve en yüksek 650 kg'a kadar çıkılmıştır. Uygulanan yüklere karşılık boy ölçümleri yapılarak yoğunluk hesaplarına geçilmiştir. Şekil 4.4'te uygulanan yüke karşı gelen yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Şekilden uygulanan yükle yoğunluğun doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. 9 mm çapındaki peletler için uygulanan en düşük 400 kg yükteki presleme basıncı 62,9 MPa ve en yüksek 650 kg yükteki presleme basıncı 102,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan presleme basınç değerlerinin çalışabilecek basınç aralığı içerisinde olduğu görülmektedir. Uygulama basıncının 62,9 MPa'dan 114,6 MPa'a çıkartılmasıyla pelet yoğunluğunun 1,572 g/cm³'den 1,690 g/cm³'e arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.4. 9 mm Çapındaki Peletlerin Üretiminde Uygulanan Yükün Pelet Yoğunluğuna Etkisi

Çalışmanın bu aşamasında 8 mm çaplı peletlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her bir pelet için 300 mg BPN pirotekniği kullanılmıştır. Bu peletlerin üretiminde presleme yükü 500 kg tek değer olarak seçilmiştir. Bu yüke karşı gelen presleme basıncı 99,5 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu peletlerin ortalama yoğunluğu 1,64 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. EK-5'te yoğunluk sonuçları çizelge olarak verilmiştir.

Çalışmaların son kısmında MIL-P-46994B standardında belirtilen 3,17 mm çaplı BPN pelet yerine 3,27 mm çapındaki peletlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her bir pelet için 65 mg BPN pirotekniği kullanılmıştır. Peletleme için her bir pelete 135 kg'lık presleme yükü (155 MPa) uygulanmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek peletlerin ortalama yoğunluğu 1,69 g/cm³ olarak hesaplanmış ve MIL-P-46994B standardında belirtilen yoğunluk ile örtüştüğü görülmüştür.

Farklı çaplarda ve farklı yükler uygulanarak üretilen BPN peletlerin ortalama yoğunluğunun 1,65 ± 0,07 g/cm³ olması gerektiği gereksinimlere eklenmiştir.

Eşitlik 4.1'de tanımlanan pelet gözenekliliği (ε) ateşlenme karakteristiği için önemli bir parametredir.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{pelet}}{\rho_{toz}} \quad (4.1)$$

Burada ρ_{pelet} peletin ortalama yoğunluğu (g/cm^3) ve ρ_{toz} BPN Piroteknik tozun en yüksek teorik yoğunluğunu (g/cm^3) göstermektedir.

BPN Piroteknik tozun en yüksek teorik yoğunluğu $2,16 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, BPN peletin ortalama yoğunluğu $1,65 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ olup, BPN peletin gözeneklilik oranı $\%24 \pm 4$ olarak bulunmuştur. Literatürde de benzer porosite oranına rastlanmıştır [16].

4.3. Lazer ile BPN Peletin Ateşlenmesi Sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında lazer ateşleme test sistemi ile 3,27 mm çapında üretilen peletlerin ateşlenme karakteristiği incelenmiştir. Bu çaptaki peletlerin seçilme nedeni en düşük ağırlığa sahip olmalarından dolayı iş güvenliği açısından düşük risk oluşturmalarıdır.

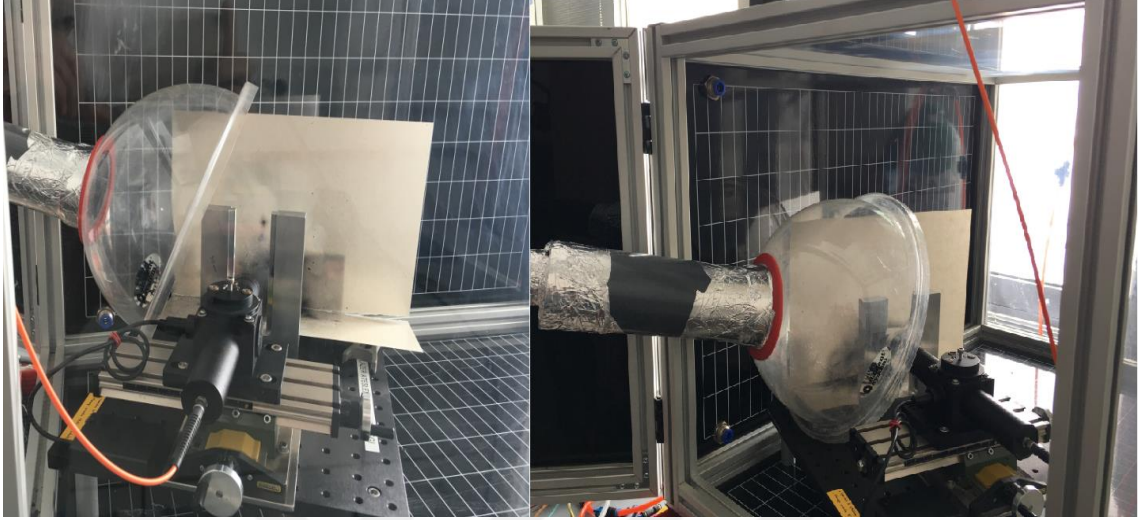
Lazer ile ateşlenme öncesinde 200 adet BPN pelet üretimi gerçekleştirilmiş ve pelet özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Lazer Ateşlemede Kullanılan 3,27 mm Çapındaki BPN Peletlerin Özellikleri

Pelet Çapı (mm)	3,27±0,02
Piroteknik Ağırlığı (mg)	66±1
Pelet Yoğunluğu (g/cm^3)	1,69±0,03
Pelet Presleme Basıncı (Mpa)	155

BPN peletler test öncesi %10’dan daha az nem içeren desikatörde muhafaza edilmiştir. Ateşleme testinde piroteknik malzeme ile çalışıldığı için öncelikle iş güvenliği önlemleri alınmıştır. Lazer ateşleme test düzeneği, etrafı 10 mm kalınlığındaki PMMA ile kapatılmış, çerçevesi 45x45 mm alüminyum sigma profilden yapılmış ateşleme kabini içerisine yerleştirilmiştir. Bu sayede ateşleme sonrasında oluşacak sıcak gaz ve sıcak partiküller etrafa yayılmamıştır. Ayrıca, açığa çıkan gazların ortama yayılmasını önlemek için 4 mm kalınlığında cam-elyaf filtre, HEPA 13 mikron filtre ve aktif karbon emdirilmiş cam-elyaf filtreden

oluşan filtreleme sistemi de kullanılmıştır. Testler sırasında hiçbir gaza maruz kalınmamıştır. Şekil 4.5'te testlerde kullanılan lazer ateşleme test düzeneğinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.5. Lazer Ateşleme Test Düzeneği

Daha önce Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterildiği üzere ateşleme testinde kullanılacak peletler statik elektrik korumalı cımbızlar ile pelet tutucuya yerleştirilerek peletin PMMA'ya tam olarak temas ettiğinden emin olunmuştur.

Bruceton testi öncesinde hangi lazer gücünde BPN peletlerin ateşleneceğini bulabilmek için BPN peletlerden 10 adedi ile lazer ateşleme testleri gerçekleştirilmiştir. Test ortam sıcaklığı 22°C ve nem %26 olarak kaydedilmiştir. Nem değerinin %30'un altında olması ortam şartlarında ateşlenme testlerinin yapılması için uygun bulunmuştur.

Bölüm 3.4'te anlatılan test düzeneğinde 2 mm kalınlığında ve 29 mm çapında PMMA kullanılmıştır. Testler sırasında kullanılan PMMA'nın ateşlenmelere dayandığı görülmüştür. Çizelge 4.2'de elde edilen test sonuçları verilmiştir. Girilen lazer güç değerlerinde ateşlenmeyen peletler, lazerin değdiği nokta konumu değiştirilerek tekrar kullanılmıştır. Bu sayede daha az pelet ile başlangıç güç değeri bulunmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.2. Bruceton Testi Öncesi BPN Pelet Ateşlenme Denemeleri

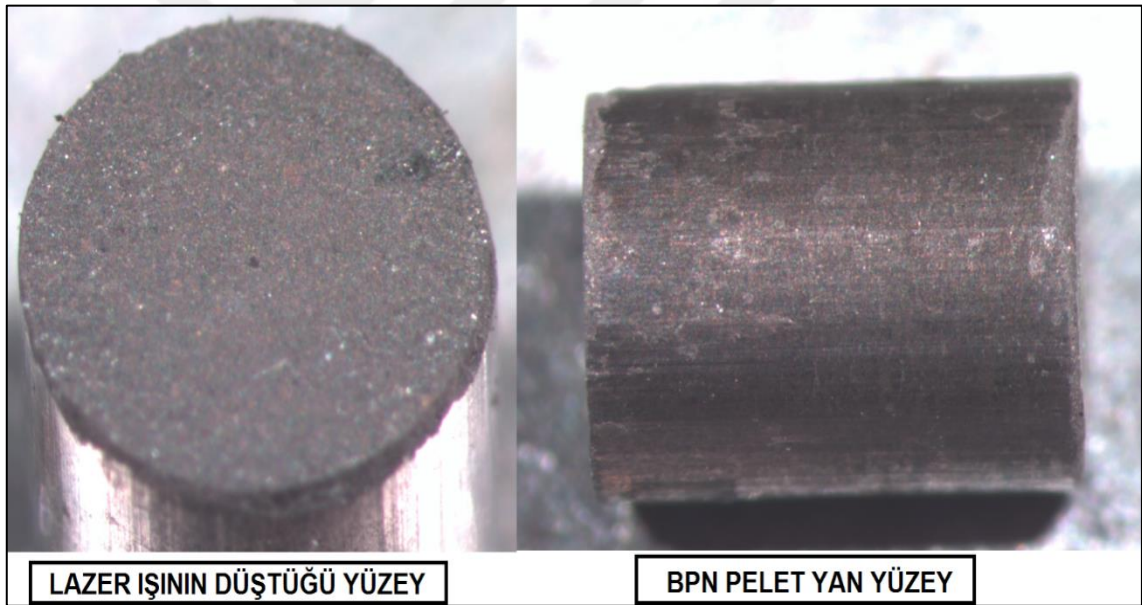
Pelet #	Ekrana Girilen Lazer Güç Değeri (mW)	Gerçekleşen Lazer Güç Değeri (mW)	Atım Süresi (ms)	Ateşlendi / Ateşlenmedi
1	240	213	20	ateşlendi
2	300	257	20	ateşlendi
3	280	242	20	ateşlendi
4	260	226	20	ateşlenmedi
	280	242	20	ateşlendi
5	260	226	20	ateşlendi
6	240	213	20	ateşlendi
7	240	213	20	ateşlendi
8	260	226	20	ateşlenmedi
	240	213	20	ateşlendi
9	220	197	20	ateşlenmedi
	240	213	20	ateşlenmedi
	260	226	20	ateşlenmedi
	280	242	20	ateşlenmedi
	300	257	20	ateşlendi
10	280	242	20	ateşlenmedi
	300	257	20	ateşlenmedi
	340	283	20	ateşlendi

Test sonuçları incelendiğinde, BPN peletlerin 213 mW ile 283 mW arasındaki lazer güç değerleri ile ateşlenebildiği görülmüştür. Bruceton testi için başlangıç lazer güç değeri 213 mW ve lazer atım süresi 20 ms olarak seçilmiştir. Artış seviyesi olarak ekrana girilebilen en düşük değer olan 20 mW olarak seçilmiştir.

Ateşlenmenin gerçekleşip gerçekleşmeme durumlarına göre ekrana girilen değer 20 mW arttırılmış ya da azaltılmıştır.

BPN pelet üretimi sonrasında her bir pelet tartılarak ağırlık kaybı incelenmiştir. Peletlerin hepsinin ağırlıklarının tolerans değerleri içerisinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca, peletlerin boy ve çapları ölçülerek istenilen boyutlarda olup olmadığına da bakılmıştır. Peletlerin yoğunlukları en az 1,68 g/cm³ ve en yüksek 1,71 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda peletlerin yoğunluklarının tolerans değerleri içerisinde kaldığı gözlenmiştir.

Lazer ateşlenme testlerinde kullanılan BPN peletler, 63X büyütmeli mikroskop altında incelenmiş ve fotoğrafı çekilmiştir. İnceleme sırasında BPN pelet yüzeyinde herhangi bir yabancı madde, kırık veya çatlak olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.6'da fotoğrafı çekilen bir peletin yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.6. Lazer Ateşlemede Kullanılan BPN Peletin Yüzey Fotoğrafı

BPN pelet yan yüzeylerinin ön ve arka yüzeylerden daha parlak çıkmasının nedeni, peletleme işlemi sırasında yan yüzeylerin döküm haznesine yapışması ve peleti hazneden çıkartırken uygulanan yük nedeniyle yüzeyin ezilmesidir. Ateşlenme çalışmaları peletin ön veya arka yüzeyinden yapıldığı için yan yüzeydeki farklılık dikkate alınmamıştır. Ön veya arka yüzeylerin yan çeperlerden daha pürüzsüz olduğu mikroskop incelemelerinde anlaşılmıştır.

Ancak bu durumun lazer ateşlenmede ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmüştür. Ateşleme sırasında lazer ışınının pelet yüzeyinin tam merkezine gelmesine dikkat edilmiştir.

4.3.1. Bruceton Testi Sonuçları

40 adet BPN peletle Bruceton testine göre lazer atışı yapılmıştır. Çizelge 4.3'te, lazer güç değerine göre ateşlenme/ateşlenmeme sonuçları verilmiştir. Ateşlenen BPN peletlere "x" işareti, ateşlenmeyen BPN peletlere ise "0" işareti verilmiştir. Her bir ateşleme yaklaşık olarak 2 dakika, toplam test süresi 3 saat sürmüştür. Bu süre zarfında BPN peletlerin maruz kaldığı nem ihmal edilmiştir.

Test sonucunda BPN peletlerin lazer ile ateşlenme gücünün 197 mW ile 270 mW arasında değiştiği görülmüştür. Test sırasında 197, 213, 226, 242, 257 ve 270 mW güçlerinde lazer uygulanmıştır. 197 mW ile 270 mW arasındaki ortalama artış seviyesi 15 mW olarak belirlenmiştir.

NEYER Software, SenTest Version 1.0 programı kullanılarak elde edilen değerler programa yüklenmiş, girilen güç değerleri, pelet üzerine düşen lazer güç değerleri olarak alınmıştır. Adım seviyesi olarak 15 mW girildiğinde en düşük güç seviyesi 197 mW yerine 198 mW, en yüksek güç seviyesi 270 mW yerine 273 mW olmuştur. 1 mW ve 3 mW'lık değişimlerin test sonuçlarını etkilemeyeceği düşünülerek ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.3. Bruceton Test Matrisi (Sabit Atım Süresi: $t=20$ ms)

EK RANDAN GİRİLEN DEĞER	$t=20$ ms	BPN PELET SAYISI									
	GÜÇ (mW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
320	270									X	
300	257						X		0		0
280	242					0		0			
260	226				0						
240	213	X		0							
220	197		0								

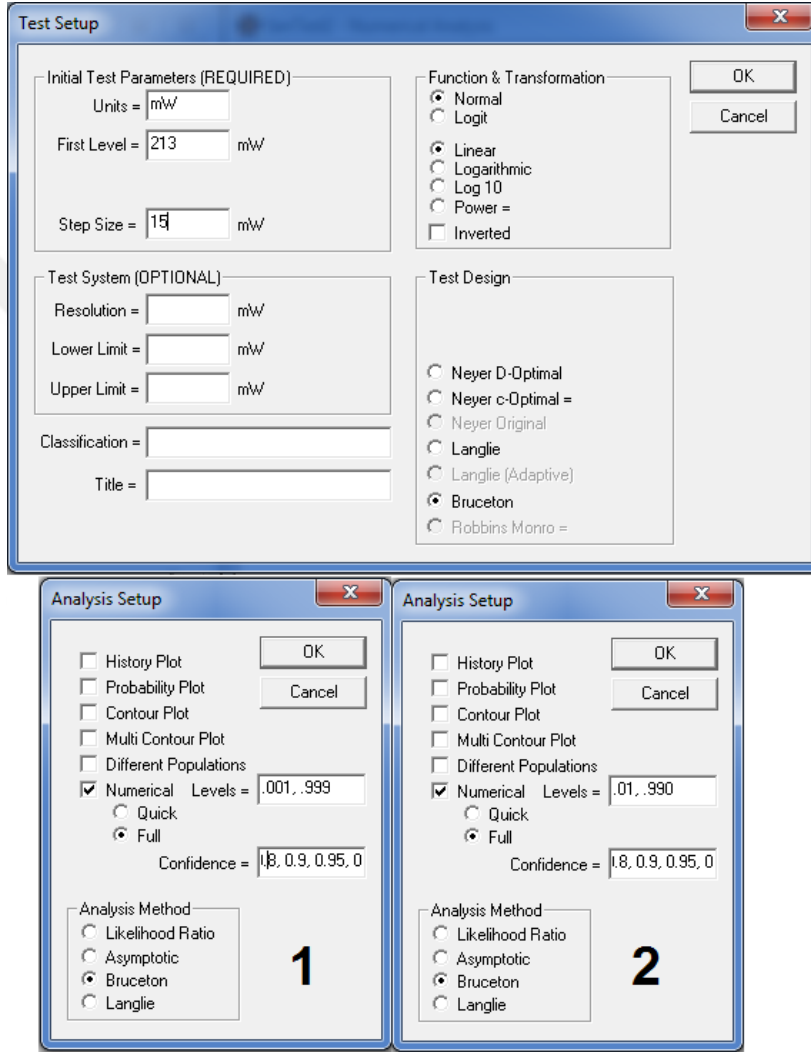
EK RANDAN GİRİLEN DEĞER	$t=20$ ms	BPN PELET SAYISI									
	GÜÇ (mW)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
320	270	X									
300	257		X								
280	242			X		X					
260	226				0		X		X		
240	213							0		X	
220	197										0

EK RANDAN GİRİLEN DEĞER	$t=20$ ms	BPN PELET SAYISI									
	GÜÇ (mW)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
320	270					X		X			
300	257				0		0		X		X
280	242			0						0	
260	226		0								
240	213	0									
220	197										

EK RANDAN GİRİLEN DEĞER	$t=20$ ms	BPN PELET SAYISI									
	GÜÇ (mW)	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
320	270										
300	257										
280	242	X									
260	226		X								
240	213			X		X		X		X	
220	197				0		0		0		0

SenTest Program Ayarları

Şekil 4.7’de gösterildiği üzere SenTest programı test ayarlarında (*ing. Test Setup*) ilk seviye (*ing. First Level*) 213 mW, adım seviyesi (*ing. Step Size*) 15 mW girilmiştir. Analiz ayarlarında (*ing. Analysis Setup*) ise kesinlik seviyesi %95, ateşlenme güvenilirliği seviyesi %99,0 ve %99,9 olarak iki değer ayrı ayrı girilmiştir.



Şekil 4.7. SenTest Programı Test ve Analiz Ayarları

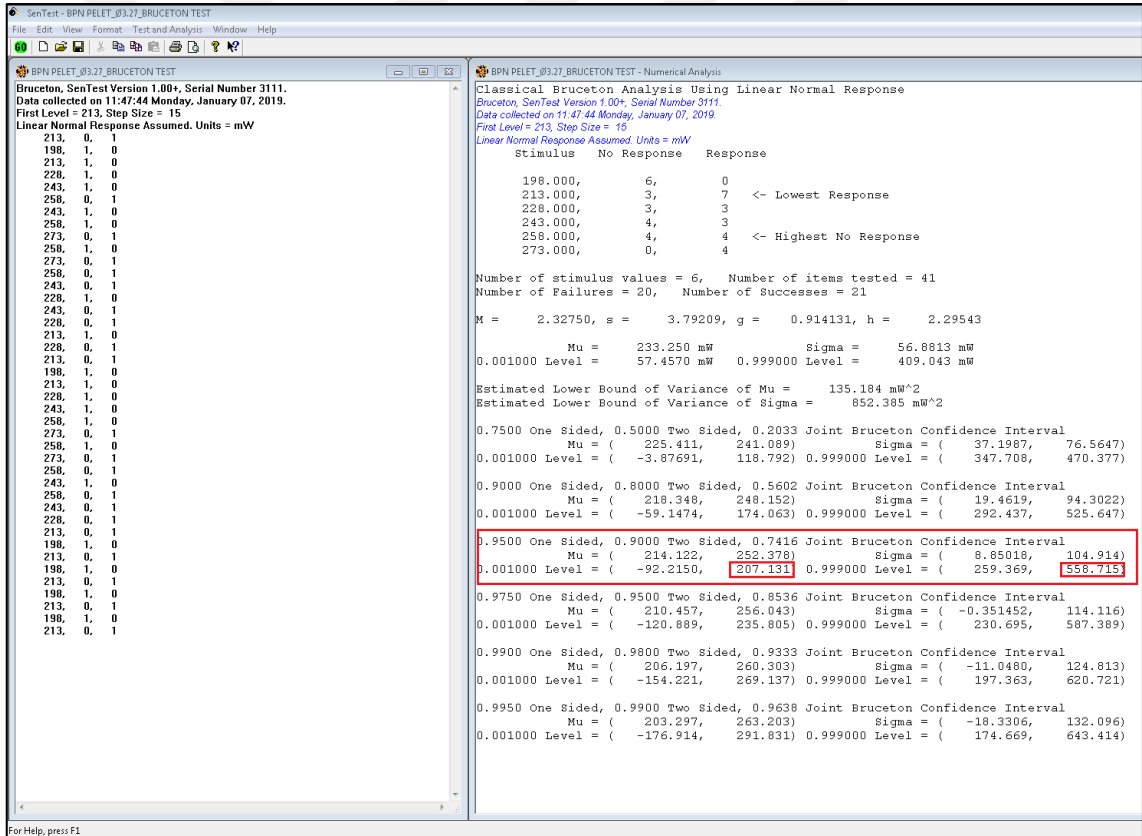
Test sonrası elde edilen veriler SenTest programına aktarılırken ateşlenen BPN peletler için “1”, ateşlenmeyen BPN peletler için ise “0” değeri girilmiştir.

Program çalıştırıldıktan sonra elde edilen veriler incelendiğinde virgülden sonraki değerlerin ateşlenme karakteristiğini etkilemeyeceği düşünüldüğünden virgülden sonraki veriler dikkate alınmamıştır.

Test Sonuç Matrisinin Oluşturulması

%95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde program çalıştırıldığında elde edilen sonuç çıktısı Şekil 4.8'de, %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde program çalıştırıldığında elde edilen sonuç çıktısı ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

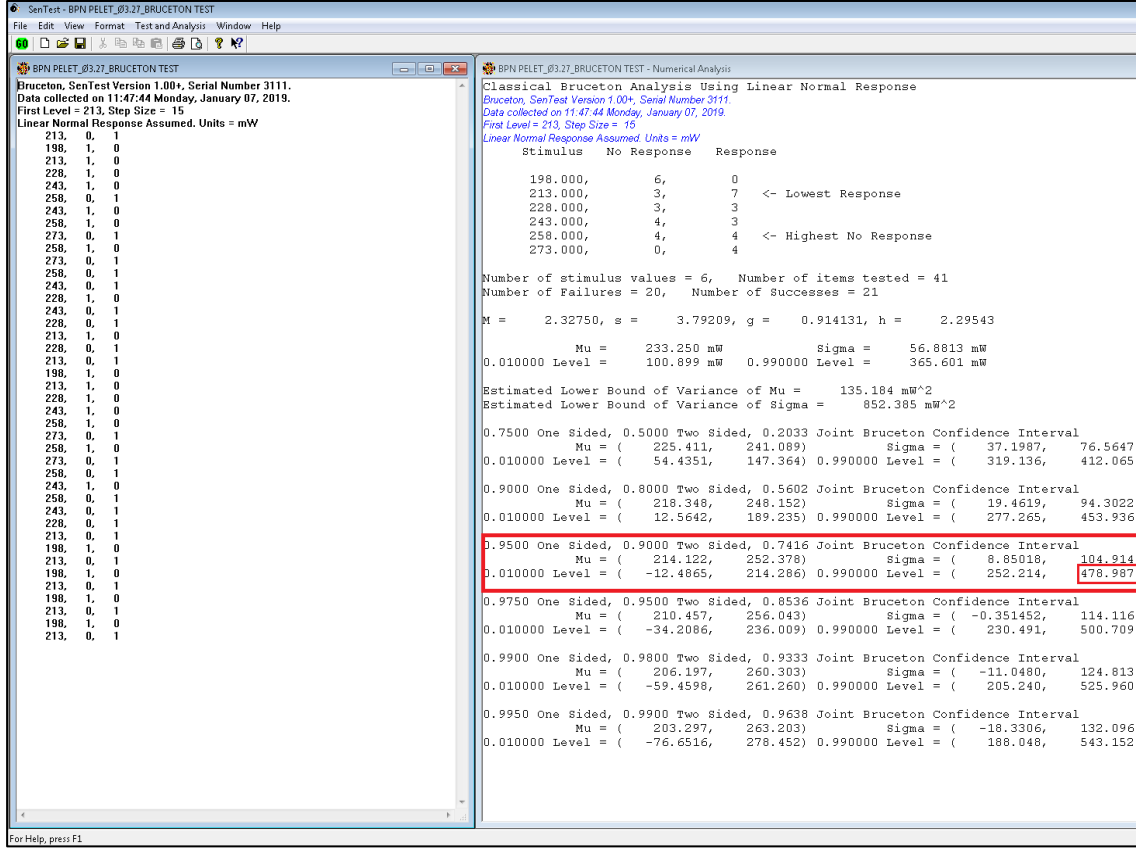
Şekil 4.8'den %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme lazer gücü 558,715 mW olarak belirlenirken, ateşlenmeme lazer gücü 207,131 mW olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 550±10 mW lazer güç seviyesinin üstündeki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 200±10 mW lazer güç seviyesinin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.



Şekil 4.8. Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

Şekil 4.9'dan %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme lazer gücü 478,987 mW olarak belirlenirken, ateşlenmeme lazer gücü 214,286 mW olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde 470±10 mW

lazer güç seviyesinin üstündeki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde 210 ± 10 mW lazer güç seviyesinin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.



Şekil 4.9. Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

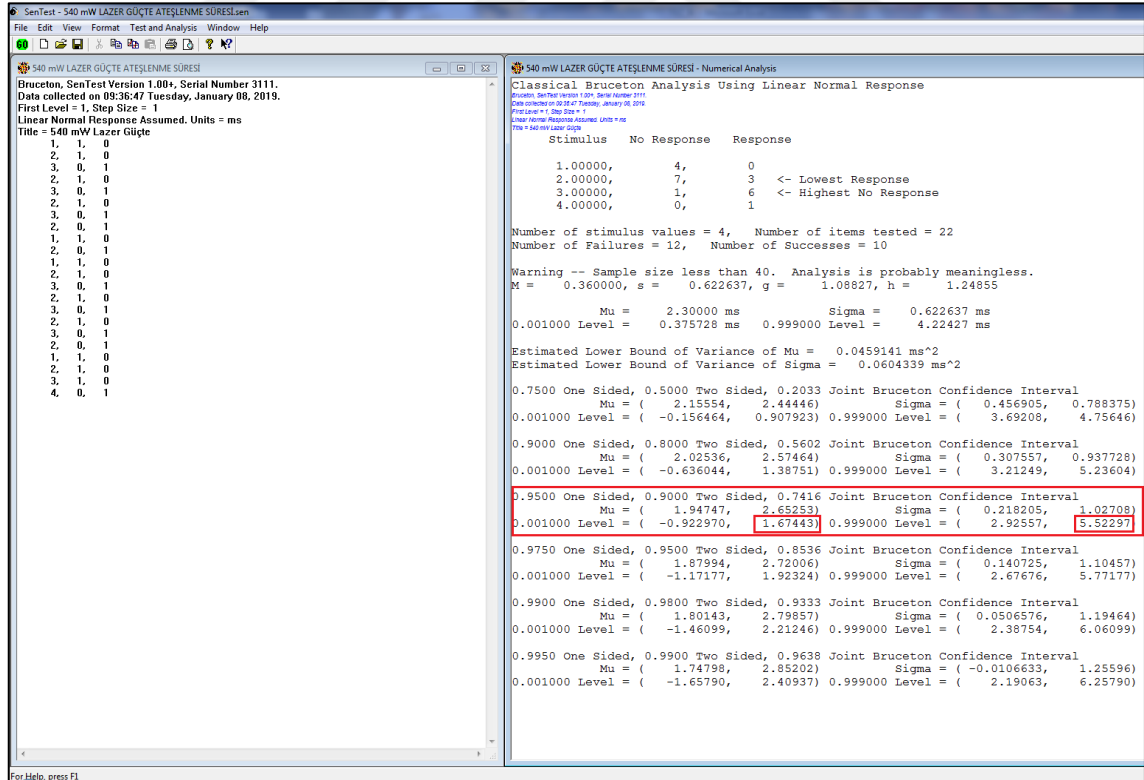
%95 kesinlik ve %99,9 ile %99,0 güvenilirlik seviyelerinde elde edilen 550 ± 10 mW ve 470 ± 10 mW değerlerindeki iki farklı lazer ateşlenme gücü lazer atım süresinin 20 ms'de sabit tutulması ile bulunmuştur. Çalışmanın sonraki aşamasında bulunan bu iki lazer güç değerinde BPN peletlerin ateşlenme süreleri tespit edilmiştir. Bu çalışma için 21 adet BPN pelet kullanılmıştır.

İlk olarak lazer güç değeri 540 mW'a ayarlanmıştır. Lazer uygulama süresi (atım süresi) başlangıç değeri 2 ms ve adım seviyesi (*ing. step size*) 1 ms olarak seçilmiştir. Çizelge 4.4'te 540 mW lazer güç uygulaması sonucunda elde edilen Bruceton test matrisi verilmiştir. Çizelgeden BPN peletlerin 1 ms'de ateşlenmezken 4 ms'de ateşlendiği gözlenmektedir.

Çizelge 4.4. 540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Elde Edilen Bruceton Test Matrisi

LAZER GÜÇ, P= 540 mW		BPN PELET SAYISI										
EKRANDAN GİRİLEN DEĞER ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	GERÇEKLEŞEN ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
6	4											
5	3		X		X		X					
4	2	0		0		0		X		X		
3	1								0		0	
EKRANDAN GİRİLEN DEĞER ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	GERÇEKLEŞEN ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
6	4											X
5	3		X		X		X				0	
4	2	0		0		0		X		0		
3	1								0			

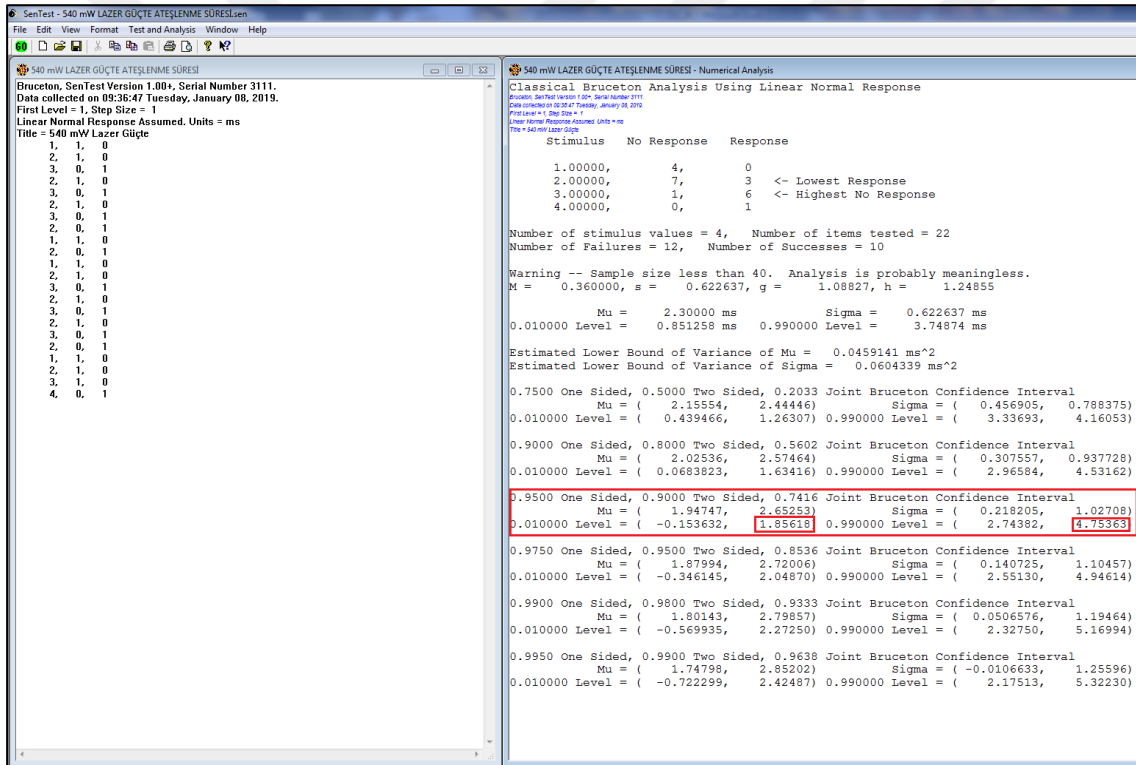
Çizelge 4.4'teki veriler programa girilerek 540 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde bulunan ateşlenme ve ateşlenmeme süreleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. 540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

Şekil 4.10'dan 540 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme süresi 5,52 ms olarak belirlenirken, ateşlenmeme süresi 1,67 ms olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 5,52 ms'nin üstündeki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 1,67 ms'nin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.

Çizelge 4.4'teki veriler programa girilerek 540 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde bulunan ateşlenme ve ateşlenmeme süreleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. 540 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

Şekil 4.11'den 540 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme süresi 4,75 ms olarak belirlenirken, ateşlenmeme süresi 1,85 ms olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde 4,75 ms'nin üstündeki herhangi bir değerde BPN

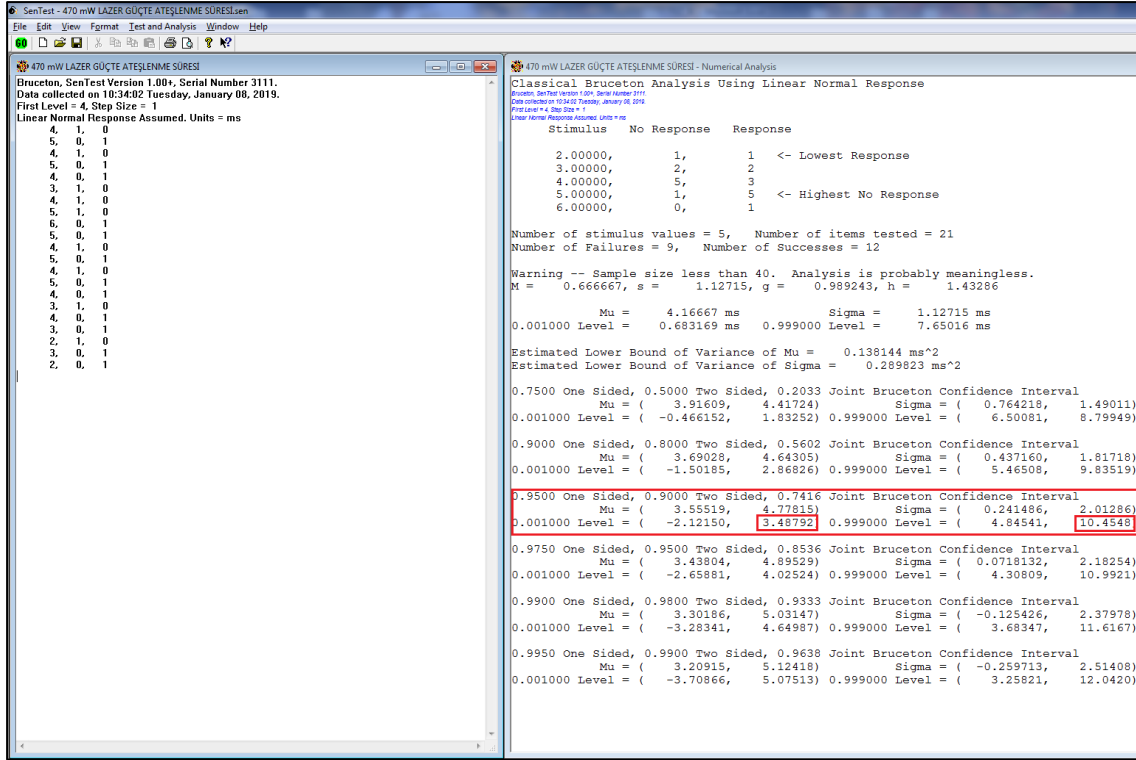
peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde 1,85 ms'nin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.

İkinci olarak lazer güç değeri 470 mW'a ayarlanmıştır. Lazer uygulama süresi (atım süresi) başlangıç değeri 2 ms ve adım seviyesi (*ing. step size*) 1 ms olarak seçilmiştir. Çizelge 4.5'te 470 mW lazer güç uygulaması sonucunda elde edilen Bruceton test matrisi verilmiştir. Çizelgeden BPN peletlerin 2 ms'de ateşlenmezken 6 ms'de ateşlendiği gözlenmektedir.

Çizelge 4.5. 470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Elde Edilen Bruceton Test Matrisi

LAZER GÜÇ, P= 470 mW		BPN PELET SAYISI										
EKRANDAN GİRİLEN DEĞER ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
8	6									X		
7	5		X		X				0		X	
6	4	0		0		X		0				
5	3						0					
4	2											
EKRANDAN GİRİLEN DEĞER ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	ATIM GENİŞLİĞİ (ms)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
8	6											
7	5		X		X							
6	4	0		0		X		X				
5	3						0		X		X	
4	2									0		X

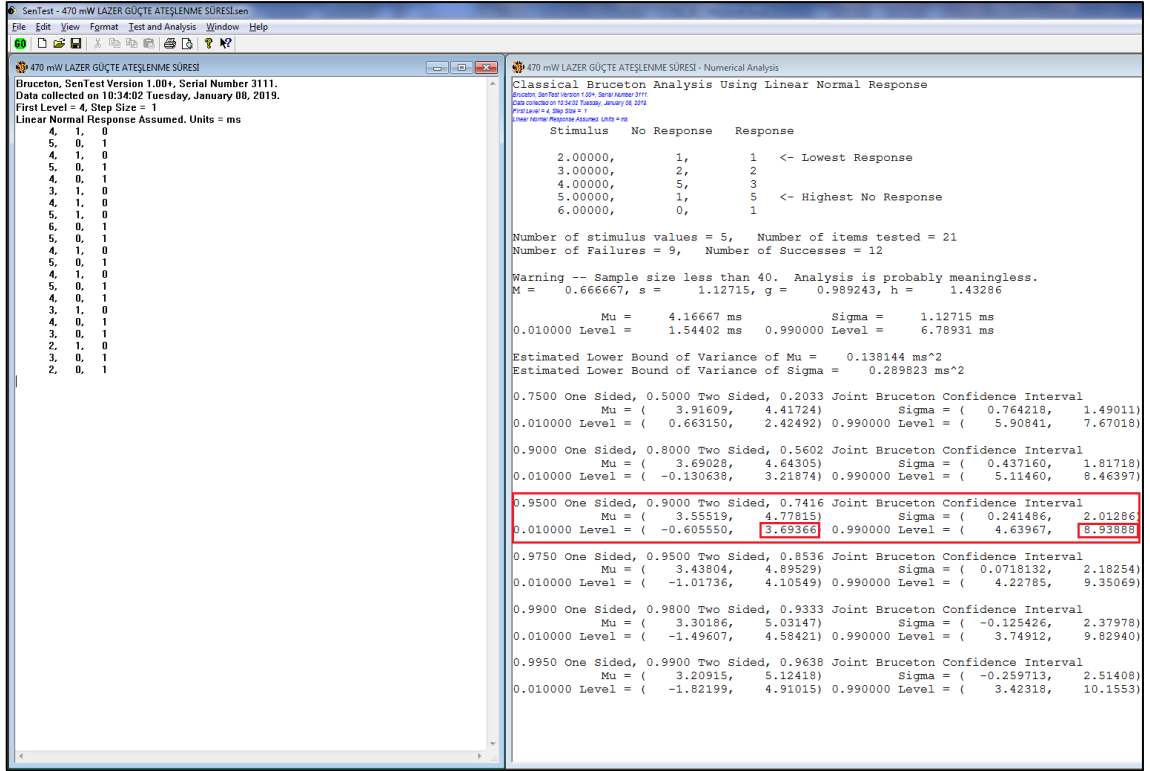
Çizelge 4.5'teki veriler programa girilerek 470 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde bulunan ateşlenme ve ateşlenmeme süreleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. 470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,9 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

Şekil 4.12'den 470 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme süresi 10,45 ms olarak belirlenirken, ateşlenmeme süresi 3,48 ms olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 10,45 ms'nin üstündeki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 3,48 ms'nin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.

Çizelge 4.5'teki veriler programa girilerek 470 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,0 güvenilirlik seviyesinde bulunan ateşlenme ve ateşlenmeme süreleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. 470 mW Lazer Güç Uygulaması Sonucunda Kesinlik Seviyesi %95 ve Güvenilirlik Seviyesi %99,0 Olduğu Durumdaki SenTest Program Çıktısı

Şekil 4.13'te 470 mW lazer güç uygulaması sonucunda %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde ateşlenme süresi 8,94 ms olarak belirlenirken, ateşlenmeme süresi 3,69 ms olarak bulunmuştur. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 8,94 ms'nin üstündeki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşleneceği gereksinimlere eklenmiştir. %95 kesinlik ve %99,9 güvenilirlik seviyesinde 3,69 ms'nin altındaki herhangi bir değerde BPN peletlerin ateşlenmeyeceği gereksinimlere eklenmiştir.

Sonuçlardan güvenilirlik seviyesi düşürüldüğünde BPN peletlerin ateşlenmesi için gerekli lazer gücün ve ateşlenme süresinin azalacağı görülmüştür. Kesinlik ve güvenilirlik seviyeleri sabit tutulduğunda, uygulanan lazer gücün %14 azaltıldığı durumda ateşlenme süresindeki artışın %190 olması uygulanan lazer gücün lazer ateşlenme süresinden daha etkin olduğu göstermektedir.

4.3.2. BPN Pelet Lazer Ateşlenme Karakteristiği

Bu çalışma 915 nm dalga boyuna sahip diyot lazer ile gerçekleştirilmiştir. Farklı dalga boylarına sahip farklı lazer tipleri ile çalışıldığında ise elde edilecek lazer güçleri ve ateşlenme süreleri farklılık gösterecektir. Bruceton test sonuçlarından elde edilen lazer güç ve BPN pelet ateşlenme süresi verileri lazer güç yoğunluğu ve lazer enerji yoğunluğu cinsinden ifade edilirse farklı tip lazerlerle çalışıldığında gerekli olan lazer güç ve ateşlenme süreleri bulunabilir.

Bruceton testinden elde edilen lazer uygulama güç değerleri, BPN pelet ateşlenme süreleri ile bu değerlerden Eşitlikler 2.3, 2.4 ve 2.5'ten hesaplanan lazer güç yoğunluğu ve lazer enerji yoğunluğu değerleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6 Hesaplanan Lazer Güç ve Enerji Yoğunlukları

Lazer Güç (mW)	Ateşlenme Süresi (ms)	Güç Yoğunluğu, Ψ (W/cm ²)	Enerji Yoğunluğu, ε (J/cm ²)
540	5,50	5682	31,3
540	4,75	5682	27,0
470	10,45	4946	51,7
470	8,94	4946	44,2

Elde edilen enerji yoğunluklarının literatürde verilen enerji yoğunlukları ile uyduğu görülmüştür.

4.3.3. Kapalı Bomba Testi

Çalışmanın bu kısmında Madde 3.3.5'te anlatılan kapalı bomba test düzeneği kullanılarak peletlerin yanma hızları tayin edilmiştir. Testte kullanılan peletlerin özellikleri Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

BPN piroteknik peletleri kapalı bomba içerisinde lazer ile ateşleyebilmek için Metrik 12 (M12) Gövde bütünü kullanılmıştır. M12 Gövde Bütünü M12 adaptör, PMMA, pelet tutucu ve BPN peletten oluşmaktadır. Test öncesinde kullanılacak 3 mm kalınlığındaki PMMA'lar tek tek ölçülerek kalınlık kontrolü yapılmış, yüzeylerinde herhangi bir yabancı madde, çiziklik veya kırıklık olmamasına dikkat edilmiş, uygun olan PMMA'lar M12 adaptöre yerleştirilmiştir. Pelet tutucu M12 adaptöre yerleştirildikten sonra BPN peletler tutucuya sabitlenmiştir. Peletlerin PMMA yüzeyine tam temas etmesi sağlanarak arada boşluk kalmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 4.14'te test öncesi ve test sonrasına ait M12 gövde bütünü fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.14. Kapalı Bomba Testinde Kullanılan M12 Gövde Bütünü

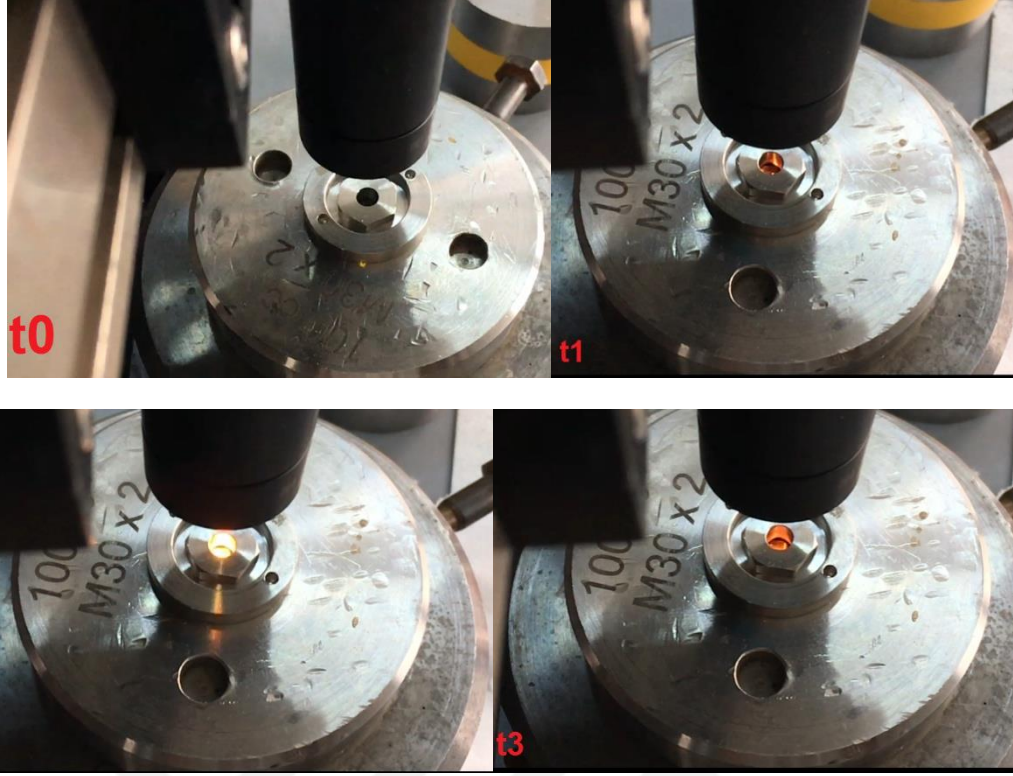
Kapalı bomba testi çalışma koşulları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kapalı Bomba Testi Çalışma Koşulları

Parametre	Değer
Lazer Güç (mW)	540
Lazer Uygulama Süresi (ms)	20
Kapalı Bomba Hacmi (cc)	100
BPN Pelet Boyu (mm)	4,60
BPN Pelet Tutuşma Süresi (ms)	5,50

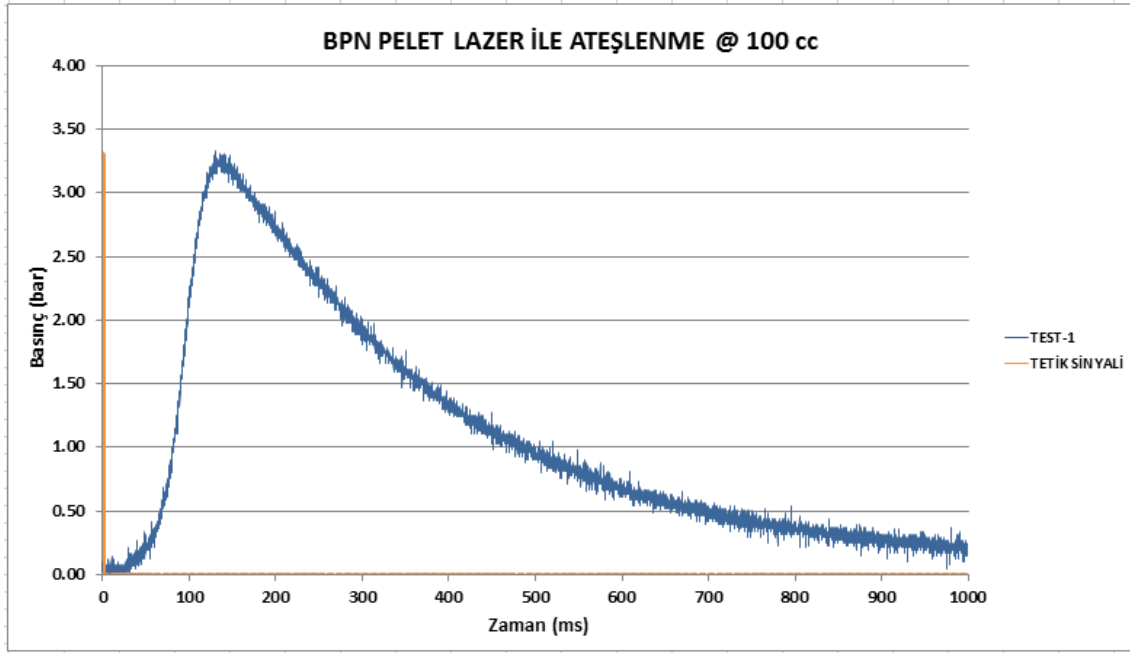
Tutuşma süresi ateşlenme anından itibaren BPN pelet üzerinde ilk kıvılcımın görüldüğü an olarak alınmıştır. Testte kullanılan peletlerin boyları test öncesinde tek tek ölçülerek Çizelge 4.7’de ortalama pelet boyu verilmiştir.

Kapalı bomba testinde 11 adet BPN piroteknik pelet ateşlenerek basınç ölçümleri yapılmıştır. Test sonrasında M12 gövde bütünleri incelendiğinde yapısal bütünlüğün korunduğu, PMMA’da herhangi bir kırılmaya rastlanmadığı, pelet tutucuların sabitlendiği konumda kaldığı gözlenmiştir. BPN peletlerin ateşlenme anına ait fotoğraflar Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Kapalı Bomba Testinde Kullanılan BPN Peletlerin Ateşlenme Görüntüleri

Kapalı bomba testinde 11 adet BPN pelet ateşlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ateşlemelerden Test-1'e ait basınç-zaman grafiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekilden tetik sinyalinden sonra peletin ilk basınca ulaştığı süre 40 ms, tepe basıncına ulaştığı süre ise 127,2 ms olarak tayin edilmiştir. Tetik sinyalinden 5,50 ms sonra peletin tutuştuğu (ilk kıvılcımın görüldüğü) hesaplara dahil edilerek, 4,60 mm boyundaki pelet için ilk kıvılcımın görüldüğü an ile tepe basıncına ulaşıldığı an arasında geçen süre 121,7 ms kullanılarak birinci yanma hızı V_1 37,80 mm/s; ilk basıncın oluştuğu andan tepe basıncına ulaşıldığı ana kadar geçen süre 83,8 ms kullanılarak ikinci yanma hızı V_2 ise 52,87 mm/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.16. Kapalı Bomba Test-1'e Ait Basınç-Zaman Grafiği

Çizelge 4.8'de ise elde edilen tüm test sonuçları ortalama değerlerle verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kapalı Bomba Test Sonuçları

Test No	Tetik Sinyali Süresi	İlk Basıncın Görüldüğü Süre	Tepe Basıncının Görüldüğü Süre	İlk Basınç ile Tepe Basıncı Arasında Geçen Süre	İlk Tutuşma ile Tepe Basıncı Arasında Geçen Süre	Yanma Hızı, V1 (mm/s)	Yanma Hızı, V2 (mm/s)
1	1.8	40	127.2	87	121.7	37.80	52.87
2	2.7	42	137.3	95	131.8	34.90	48.42
3	2.0	31	95.0	64	89.5	51.40	71.88
4	2.0	46	115.5	70	110.0	41.82	65.71
5	2.2	46	136.0	90	130.5	35.25	51.11
6	2.0	44	127.0	83	121.5	37.86	55.42
7	1.9	36	122.3	86	116.8	39.38	53.49
8	2.0	30	133.0	103	127.5	36.08	44.66
9	2.0	40	125.0	85	119.5	38.49	54.12
10	2.0	42	114.0	72	108.5	42.40	63.89
11	2.0	36	123.0	87	117.5	39.15	52.87
ORTALAMA	2.1	39.4	123.2	83.8	117.7	39.5	55.9
BPN PELET TUTUŞMA SÜRESİ (ms)			5.5				
BPN PELET BOYU (mm)			4.6				

Çizelgeden tetik sinyalinden sonra peletlerin ilk kıvılcımın görüldüğü an ile tepe basıncına ulaşıldığı an arasında geçen ortalama süre 117,7 ms olarak bulunmuş ve ortalama birinci yanma hızı V_1 39,50 mm/s olarak hesaplanmıştır. İlk basıncın oluştuğu andan tepe basıncına ulaşıldığı ana kadar geçen ortalama

süre 83,8 ms olarak bulunmuş ve ortalama ikinci yanma hızı V_2 55,9 mm/s olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen ortalama yanma hızı değerlerinin MIL-P-46994B standardında verilen yanma hızı en az 31,75 mm/s isterini karşıladığı görülmüştür.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, katı yakıtlı roket motorların ateşlenmesinde kullanılan ateşleyicilerden bor potasyum nitrat (BPN) piroteknik tozun üretimi gerçekleştirilmiş, piroteknik toz pelet haline getirilerek, peletlerin lazer ateşleme test sistemi ile ateşlenme karakteristiği belirlenmiştir. Son olarak kapalı bomba test sistemi kullanılarak BPN peletlerin yanma hızı tayin edilmiştir. Çalışmalarda MIL-P-46994B standardı referans olarak alınmış, üretim ve test sonuçları ilgili standarda göre değerlendirilmiş, sonuçlar ayrıca literatürde verilen analiz ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında BPN piroteknik tozun üretim yöntemi ve kalite kontrol basamakları belirlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen BPN piroteknik tozun DSC analizi tutuşma sıcaklığının 500-510 °C arasında olduğunu ve bunun literatürle uyumlu olduğunu göstermiştir. Çalışma boyunca 44 kfile (yaklaşık 2000 gram) BPN piroteknik tozun üretimi gerçekleştirilmiş, her üretim sonunda kalorifik değer ölçümü yapılarak, ortalama değer 1675 cal/g olduğu belirlenmiştir. Bu değer referans standartta verilen en az 1500 cal/g isterini karşıladığı görülmüştür.

Silindirik pelet yapı en düşük hacimde en çok miktarda piroteknik tozun kullanılacağı geometri olup, bu peletlerin ateşleyicilerde kullanılması, ateşleyicilerde yüksek enerji ve kolay ateşlenme sağlayacaktır. Bu durumda ateşleyicilerin boyut olarak küçültülmesi sağlanarak katı yakıtlı motora sığdırılması kolaylaşacaktır. Ayrıca, BPN piroteknik tozun pelet halinde saklanması ürünün raf ömrünü uzatacaktır. Çalışmanın bu aşamasında, BPN piroteknik toz yük altında preslenerek 10 mm, 9 mm, 8 mm ve 3,27 mm çapına sahip pelet formlarına dönüştürülerek üretilebilirliği sağlanmış ve farklı çaptaki peletlerin yoğunluklarının 1,64-1,69 g/cm³ arasında değiştiği saptanmıştır. Bu yoğunluk aralığının MIL-P-46994B standardında belirtilen isterleri karşıladığı gözlenmiştir. Bu yoğunluk değerleri ve piroteknik tozun en yüksek teorik yoğunluğu olan 2,16 g/cm³ değeri kullanılarak peletin gözenekliliği %24 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmasının bu kısmında üretilen peletler tasarlanan yeni bir lazer ateşleme test sisteminde ateşleme yapılarak, lazer gücü, lazer ateşlenme süresi, lazer güç yoğunluğu ve lazer enerji yoğunluğu değerleri bulunarak peletlerin lazer ile ateşlenme karakteristiği tayin edilmiştir. Bu amaçla 3,27 mm çapında ve 1,69 g/cm³ yoğunluğundaki peletler Bruceton Test Metodu'na göre lazer ile ateşlenmiş, Neyer SenTest program yazılımı kullanılarak, % 95 kesinlik seviyesinde %99,9 güvenilirlikte BPN peletlerin ateşlenmesi için gereken lazer gücünün 550 mW ve lazer ateşlenme süresinin 5,50 ms olduğu saptanmıştır. Güvenilirlik seviyesi %99,0 olduğu durumda ise lazer gücü 470 mW ve lazer ateşlenme süresi 10,45 ms olarak bulunmuştur. Ateşlenme sürelerine bakılarak lazer gücün lazer uygulama süresinden daha etkin olduğu görülmüştür. Testler sonucunda 540 mW lazer gücü ve 5,50 ms ateşlenme süresi değerleri kullanılarak BPN peletlerin ateşlenmesi için uygulanması gereken lazer güç yoğunluğu 5682 W/cm² ve enerji yoğunluğu 31,3 J/cm² olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde 470 mW lazer gücü ve 10,45 ms ateşlenme süresi değerleri kullanılarak lazer güç yoğunluğu 4946 W/cm² ve enerji yoğunluğu 51,7 J/cm² olarak bulunmuştur.

Peletlerin MIL-P-46994B standardında verilen en az 31,75 mm/s yanma hızı gereksinimini sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için 3,27 mm çapındaki ve 4,60 mm boyundaki BPN peletlerle kapalı bomba test sisteminde lazer ile ateşleme yapılarak yanma hızı 39,5 mm/s olarak tayin edilmiştir. Bulunan bu hız değerinin askeri standartta verilen yanma hızın isterini karşıladığı görülmektedir.

Sonuç olarak, MIL-P-46994B standardına uygun BPN piroteknik tozun ve peletin başarı ile üretilebildiği ve standartta belirtilen gereksinimleri karşıladığı kanıtlanmıştır.

Tez çalışması sayesinde TÜBİTAK SAGE bünyesine bir lazer ateşleme test düzeneği kazandırılmıştır. Elde edilen bilgi ve donanım ile geliştirilecek farklı tiplerdeki piroteknik malzemelerin lazer ile ateşlenme karakteristiklerinin belirlenmesi de sağlanabilecektir. Ayrıca, piroteknik malzemelerin yaşlanmaları sonucunda ateşlenme karakteristiklerinde değişiklik olup olmayacağı bu test düzeneğiyle tespit edilecek, bu da malzemenin raf ömrü çalışmalarına büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] S.G. Hosseini and A. Eslami, Investigation on the Reaction of Powdered Tin as a Metallic Fuel with Some Pyrotechnic Oxidizers: Propellants Explosives, Pyrotechnics, 36 (2011),175 – 181.
- [2] B. Berger, Parameters Influencing the Pyrotechnic Reaction: Propellants, Explosives, Pyrotechnics 30 (2005), 1.
- [3] A. Eslami, S.G. Hosseini, S.M. Pourmortazavi, Thermoanalytical investigation on some boron–fuelled binary pyrotechnic systems: Fuel 87 (2008) 3339–3343.
- [4] K. R. Rani Krishnan, R. Anandavally Ammal, B. Hariharanath, A.G. Rajendran, and C.B. Kartha, Addition of RDX/HMX on the Ignition Behaviour of Boron-Potassium Nitrate Pyrotechnic Charge: Defence Science Journal, Vol. 56, No. 3, July 2006, 329-338.
- [5] V. Bhingarkar and H. Singh, Influence of Cellulosic Binders on Sensitivity and Combustion Behaviour of B-KNO₃ Ignition System : Defence Science Journal, Vol. 56, No. 3, July 2006, 345-351.
- [6] V. S. Bhingarkar, P. P. Sane and R. G. Sarawadekar, Role of Silicon in Boron-Potassium Nitrate System: Defence Science Journal, Vol. 47, No 3, July 1997, 365-371.
- [7] B. Roduit, C. Borgeat, B. Berger, P. Folly, B. Alonso, J. N. Aebischer and F. Stoessel, Advanced Kinetic Tools For The Evaluation Of Decomposition Reactions: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 80 (2005) 229–236.
- [8] C. E. Carr II and M. J. Thomas, Factors Influencing BKNO₃ Igniter Performance: AIAA/ASME/SAE/ASEE 23rd Joint Propulsion Conference, San Diego, June 30-July 2 1987, California, 1985, AIAA-87.
- [9] K. S. Lai, Boron Potassium Nitrate (BKNO₃) Aging Study: AIAA/ASME/SAE/ASEE 34th Joint Propulsion Conference, 13-15 July 1998, Cleveland.

- [10] K. Miyata, Combustion of Boron-Pyrotechnics: AIAA/ASME/SAE/ASEE 37th Joint Propulsion Conference, 8-11 July 2001, Salt Lake City, 2001, AIAA 3583.
- [11] S. R. Ahmad and M. Cartwright, Laser Ignition of Energetic Materials, John Wiley Sons, USA, 2015.
- [12] S. R. Ahmad and D. A. Russell, Laser Ignition of Pyrotechnics – Effects of Wavelength, Composition and Confinement: Propellants, Explosives, Pyrotechnics 30 (2005), 2.
- [13] A. Lee, M. Stringer and K. Smit, Laser Match Head for Pyrotechnic Ignition: DSTO Systems Sciences Laboratory (2003).
- [14] L. Yong, T. Nguyen, J. Waschl, Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A Review, DSTO-TR-0068 Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Avustralya, 1995.
- [15] S. R. Ahmad and D. A. Russell, Studies into Laser Ignition of Confined Pyrotechnics: Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 33 (2008) 396 – 402.
- [16] P. Gillard and F. Opdebeck, Laser Diode Ignition of The BKNO_3 Pyrotechnic Mixture: An Experimental Study, Combustion Science and Technology, 179 (2007) 1667–1699.
- [17] J. Sivan and Y. Haas, Spectroscopic Characterization of B/ KNO_3 Diode-Laser Induced Combustion: J. Phys. Chem. 117 (2013) 11808–11814.
- [18] E. R. Lake, S. J. Thompson, and V. W. Drexelius, A Study of The Role of Pyrotechnic Systems On The Space Shuttle Program, NASA (1973).
- [19] M. A. Danacı, B. Birgören ve S. Ersöz, Weibull Parametreleri Ve Yüzdelikleri İçin Güven Aralığı Tahmin Algoritmaları, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 24-1(2009) 119-128.
- [20] C. E. Ebeling, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, McGrawHill International Editions, Singapore (1997).
- [21] R. E. Easterling, On the Use of Confidence Intervals as Probability Intervals, USNRC, NR-ASG-001 (1974).
- [22] https://tr.wikipedia.org/wiki/Güven_aralığı (Erişim tarihi: 09.03.2019).

- [23] J. Sivan and Y. Haas, Laser Ignition of Various Pyrotechnic Mixtures – an Experimental Study: Propellants, Explosives, Pyrotechnics (2015) 40, 755 – 758.
- [24] J. W. Dixon and A. M. Mood (1948), A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data,"Journal of the American Statistical Association, 43, 109-126.
- [25] C. D. Fuh, J. S. Lee and C. M. Liaw, The Design Aspect of the Bruceton Test for Pyrotechnics Sensitivity Analysis, Journal of Data Science 1(2003), 83-101.
- [26] B. T. NEY, A D-Optimality-Based Sensitivity Test, Technometrics, 36-1 (1994) 61-70.
- [27] D. N. Preston, G. W. Brown, C. B. Skidmore, B. L. Reardon, and D. A. Parkinson, Small-scale Explosives Sensitivity Safety Testing: A Departure from Bruceton, Los Alamos National Laboratory (2011).
- [28] F.M. Speed, A Guide For The Application of Bruceton Method to Electro-Explosive Devices, NASA (1965).

Standartlar

MIL-P-46994B	Military Specification of Pellets/Granules Boron/Potassium Nitrate (1982)
MIL-B-51092	Military Specification of Boron, Amorphous, Powder
MIL-P-156	Military Specification of Potassium Nitrate (1956)
MIL-P-81351	Military Specification of Peroxide, Methyl Ethyl Ketone
MIL-R-7575	Military Specification of Resin, Polyester Low Pressure Laminating

EKLER

EK-1. BPN Piroteknik Tozu 042. , 043. ve 044. Kafilelere Ait Kalorifik Değer Sonuçları

BPN 042 KALORİFİK DEĞER SONUÇLARI

	6200 Calorimeter Report
Sample ID: 601117.19.0053.1	Mode: Determination
Type: Preliminary	Date/Time: 01/14/19 15:59:18
Sample Weight: 0.5094	Method: Dynamic
Spike Weight: 0.0000	Bomb ID: 1
Fuse: 15.0000	EE Value: 2367.9939
Acid: 10.0000	Sulfur: 0.0000
Jacket Temperature: 30.0113	Initial Temp.: 23.8649
Temperature Rise: 0.3832	
Gross Heat:	1732.2430 cal/g

BPN 043 KALORİFİK DEĞER SONUÇLARI

	6200 Calorimeter Report
Sample ID: 601117.19.0054.1	Mode: Determination
Type: Preliminary	Date/Time: 01/15/19 11:05:02
Sample Weight: 0.5014	Method: Dynamic
Spike Weight: 0.0000	Bomb ID: 1
Fuse: 15.0000	EE Value: 2367.9939
Acid: 10.0000	Sulfur: 0.0000
Jacket Temperature: 29.9056	Initial Temp.: 23.8924
Temperature Rise: 0.3736	
Gross Heat:	1714.5980 cal/g

BPN 044 KALORİFİK DEĞER SONUÇLARI

	6200 Calorimeter Report
Sample ID: 601117.19.0055.1	Mode: Determination
Type: Preliminary	Date/Time: 01/15/19 15:09:20
Sample Weight: 0.5074	Method: Dynamic
Spike Weight: 0.0000	Bomb ID: 1
Fuse: 11.5000	EE Value: 2367.9939
Acid: 10.0000	Sulfur: 0.0000
Jacket Temperature: 30.0821	Initial Temp.: 23.4920
Temperature Rise: 0.3763	
Gross Heat:	1713.8632 cal/g

EK-2. BPN Piroteknik Tozu 042. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu



AccuPyc II 1340 V1.09

Unit 1

Serial #: 2862

Page 2

Sample: **BPN 042**

MB

Submitter: 601117.19/0058

Bar Code:

File: G:\385.SMP

Analysis Gas: Helium

Reported: 11.01.2019 15:15:32

Sample Mass: 2.0934 g

Temperature: 23.24 °C

Number of Purges: 20

Chamber Insert: 10 cm³

Analysis Start: 11.01.2019 14:39:24

Analysis End: 11.01.2019 15:02:20

Equilib. Rate: 0.005 psig/min

Expansion Volume: 74.0969 cm³

Cell Volume: 15.4176 cm³

Density and Volume Table

Cycle#	Volume (cm ³)	Volume Deviation (cm ³)	Density (g/cm ³)	Density Deviation (g/cm ³)	Elapsed Time (mm:ss)	Temperature (°C)
1	0.9658	0.0012	2.1675	-0.0028	8:17	23.19
2	0.9655	0.0010	2.1681	-0.0022	9:46	23.16
3	0.9630	-0.0016	2.1739	0.0036	11:18	23.21
4	0.9637	-0.0009	2.1723	0.0020	12:43	23.24
5	0.9632	-0.0013	2.1733	0.0030	14:22	23.26
6	0.9633	-0.0012	2.1731	0.0028	16:00	23.23
7	0.9645	0.0000	2.1704	0.0000	17:34	23.29
8	0.9631	-0.0014	2.1736	0.0033	19:08	23.26
9	0.9684	0.0039	2.1616	-0.0087	20:46	23.32
10	0.9649	0.0004	2.1696	-0.0008	22:28	23.29

Summary Data

Average

Standard Deviation

Volume:

0.9645 cm³

0.0016 cm³

Density:

2.1704 g/cm³

0.0037 g/cm³

EK-3. BPN Piroteknik Tozu 043. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu



AccuPyc II 1340 V1.09

Unit 1

Serial #: 2862

Page 2

Sample: **BPN 043**

MB

Submitter: 601117.19/0059

Bar Code:

File: G:\387.SMP

Analysis Gas: Helium

Reported: 14.01.2019 14:01:50

Sample Mass: 3.7725 g

Temperature: 24.42 °C

Number of Purges: 20

Chamber Insert: 10 cm³

Analysis Start: 14.01.2019 13:19:45

Analysis End: 14.01.2019 13:42:35

Equilib. Rate: 0.005 psig/min

Expansion Volume: 74.0969 cm³

Cell Volume: 15.4176 cm³

Density and Volume Table

Cycle#	Volume (cm ³)	Volume Deviation (cm ³)	Density (g/cm ³)	Density Deviation (g/cm ³)	Elapsed Time (mm:ss)	Temperature (°C)
1	1.7469	-0.0005	2.1596	0.0007	8:16	24.35
2	1.7463	-0.0012	2.1603	0.0015	9:52	24.34
3	1.7482	0.0008	2.1579	-0.0010	11:23	24.37
4	1.7482	0.0007	2.1580	-0.0009	12:59	24.38
5	1.7477	0.0003	2.1585	-0.0004	14:34	24.38
6	1.7445	-0.0030	2.1626	0.0037	16:10	24.47
7	1.7505	0.0030	2.1551	-0.0038	17:35	24.43
8	1.7475	0.0000	2.1588	0.0000	19:13	24.48
9	1.7444	-0.0031	2.1627	0.0038	20:45	24.52
10	1.7503	0.0029	2.1553	-0.0035	22:21	24.51

Summary Data

Average

Standard Deviation

Volume:

1.7474 cm³

0.0020 cm³

Density:

2.1589 g/cm³

0.0024 g/cm³

EK-4. BPN Piroteknik Tozu 044. Kafile Yoğunluk Tayini Sonucu



AccuPyc II 1340 V1.09

Unit 1

Serial #: 2862

Page 2

Sample **BPN 044**

MB

Submitter: 601117.19/0060

Bar Code:

File: G:\388.SMP

Analysis Gas: Helium

Reported: 14.01.2019 16:04:29

Sample Mass: 3.4750 g

Temperature: 24.79 °C

Number of Purges: 20

Chamber Insert: 10 cm³

Analysis Start: 14.01.2019 14:21:51

Analysis End: 14.01.2019 14:44:39

Equilib. Rate: 0.005 psig/min

Expansion Volume: 74.0969 cm³

Cell Volume: 15.4176 cm³

Density and Volume Table

Cycle#	Volume (cm³)	Volume Deviation (cm³)	Density (g/cm³)	Density Deviation (g/cm³)	Elapsed Time (mm:ss)	Temperature (°C)
1	1.6116	-0.0006	2.1562	0.0009	8:14	24.70
2	1.6132	0.0009	2.1541	-0.0012	9:40	24.74
3	1.6110	-0.0013	2.1570	0.0017	11:14	24.75
4	1.6104	-0.0019	2.1579	0.0026	12:49	24.78
5	1.6118	-0.0005	2.1560	0.0007	14:31	24.83
6	1.6129	0.0006	2.1545	-0.0008	16:01	24.76
7	1.6112	-0.0011	2.1568	0.0015	17:44	24.84
8	1.6146	0.0023	2.1522	-0.0031	19:14	24.82
9	1.6128	0.0005	2.1546	-0.0007	20:44	24.84
10	1.6134	0.0011	2.1539	-0.0014	22:20	24.87

Summary Data

Average

Standard Deviation

Volume:

1.6123 cm³

0.0012 cm³

Density:

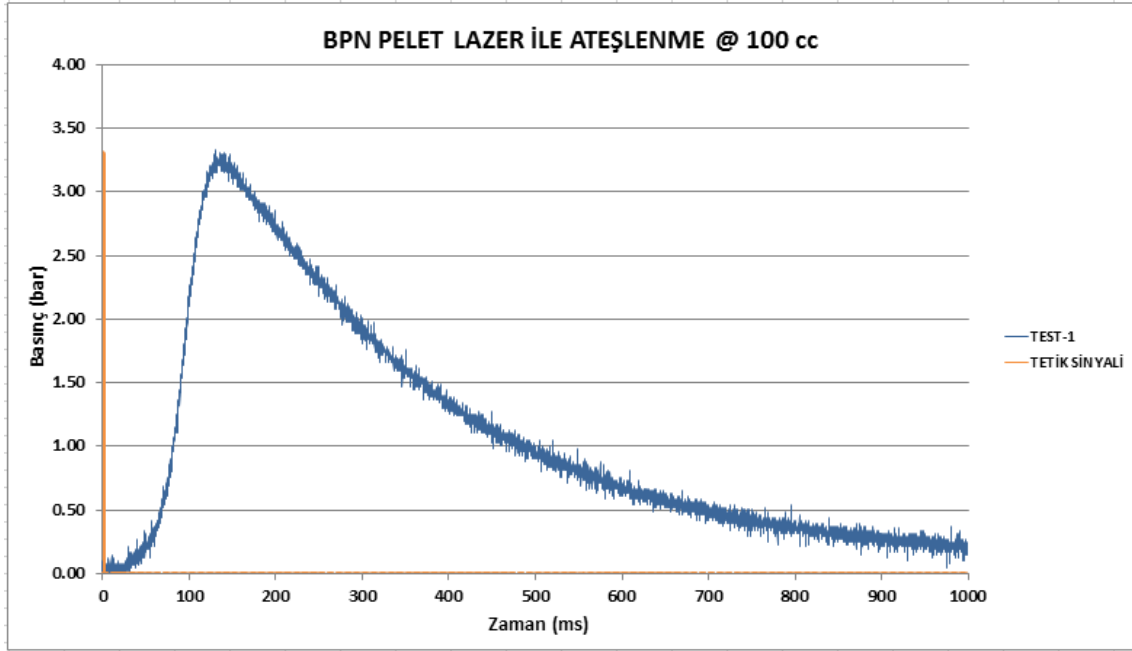
2.1553 g/cm³

0.0016 g/cm³

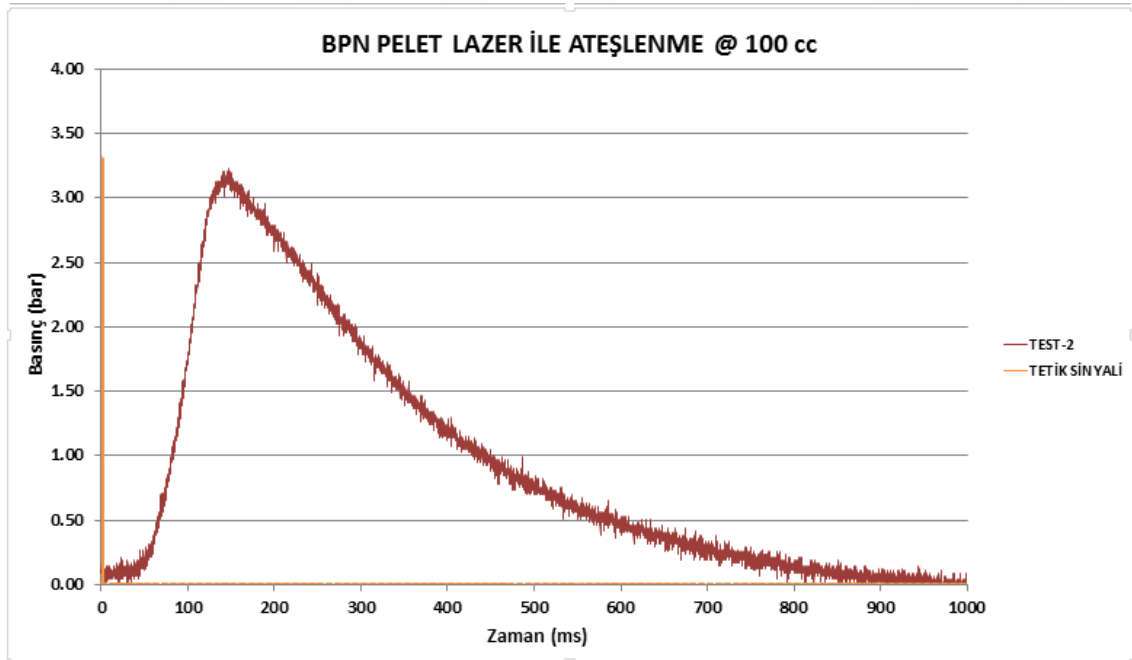
EK-5. Üretim sonrası 8 mm Çapındaki BPN Peletlerin Yoğunluk Hesapları

Pelet No	Pelet Ağırlığı (g)	Pelet Çapı (mm)	Pelet Boyu (mm)	Pelet Hacmi (cm ³)	Pelet Yoğunluğu (g/cm ³)
1	300	8	3.65	0.183	1.64
2	301	8	3.66	0.184	1.64
3	297	8	3.65	0.183	1.62
4	299	8	3.66	0.184	1.63
5	303	8	3.67	0.184	1.64
6	302	8	3.67	0.184	1.64
7	300	8	3.63	0.182	1.64
8	300	8	3.63	0.182	1.64
9	300	8	3.63	0.182	1.64
10	301	8	3.64	0.183	1.65
11	303	8	3.68	0.185	1.64
12	304	8	3.68	0.185	1.64
13	303	8	3.67	0.184	1.64
14	302	8	3.66	0.184	1.64
15	300	8	3.65	0.183	1.64
16	302	8	3.66	0.184	1.64
17	303	8	3.68	0.185	1.64
18	302	8	3.66	0.184	1.64
19	302	8	3.66	0.184	1.64
20	302	8	3.66	0.184	1.64
Ortalama	301	8	3.66	0.184	1.64

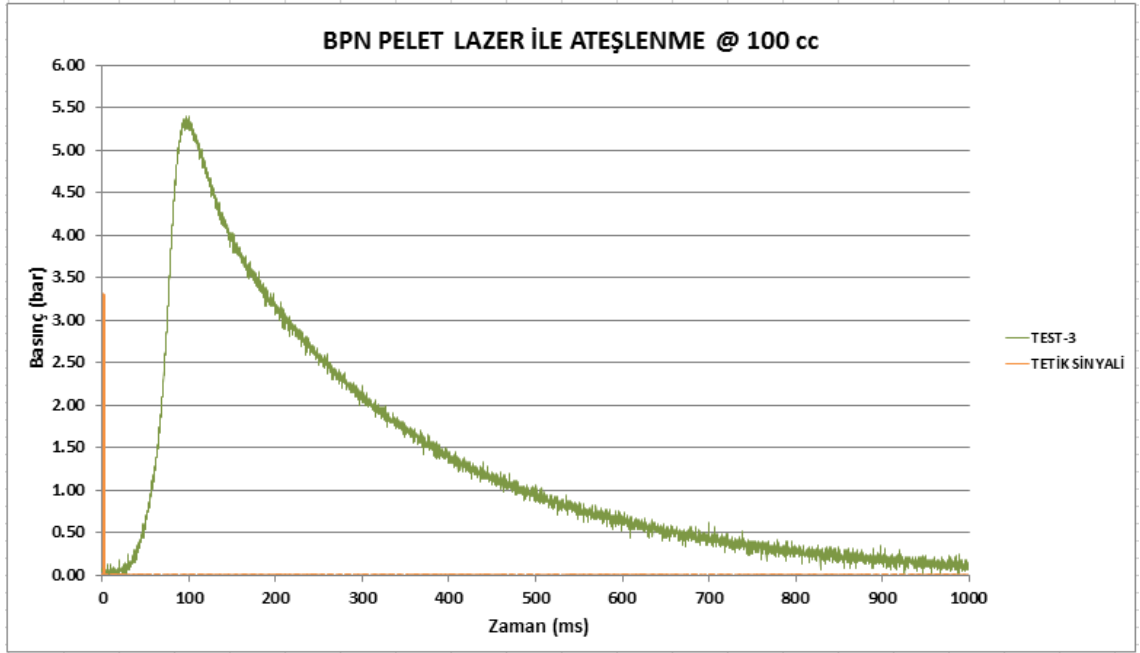
EK-6. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-1



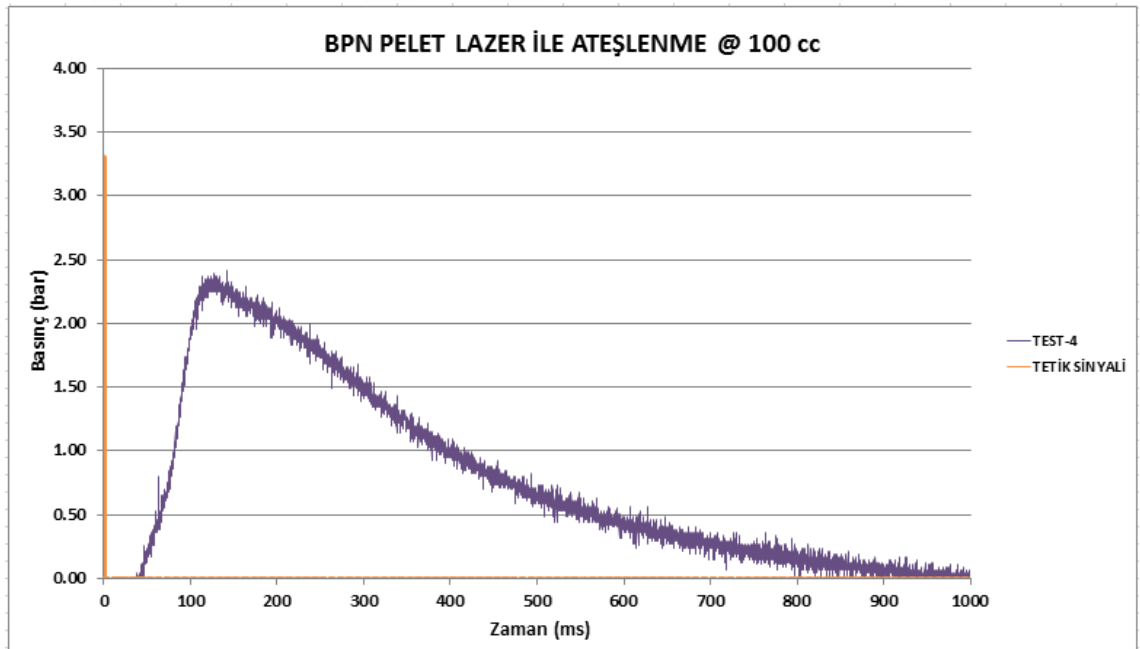
EK-7. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-2



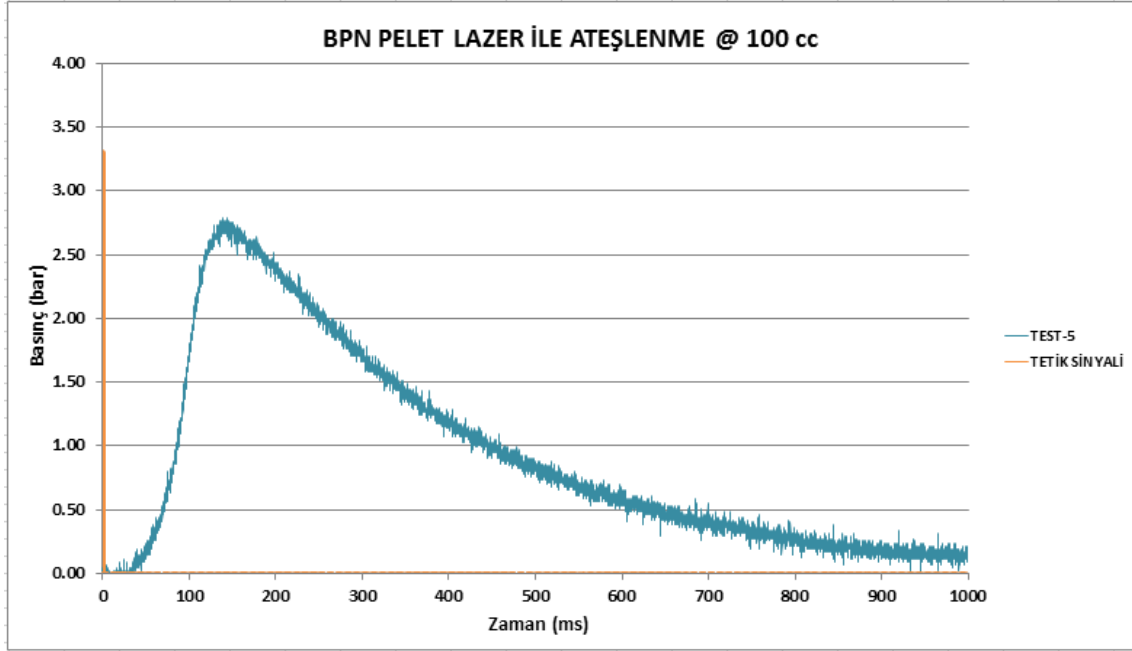
EK-8. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-3



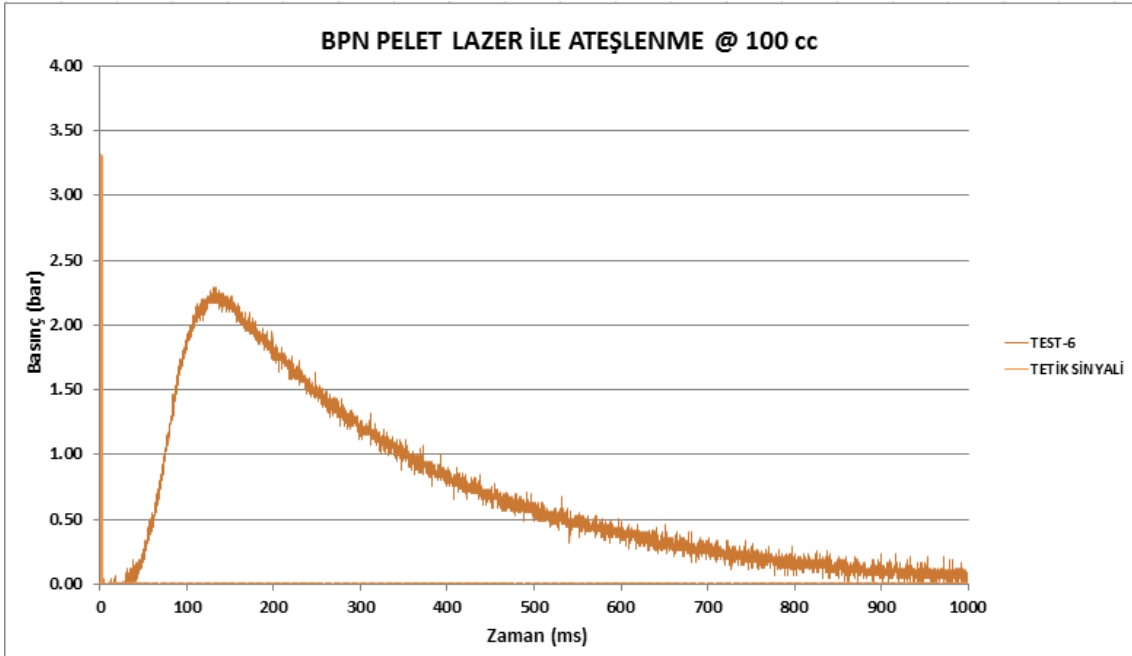
EK-9. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-4



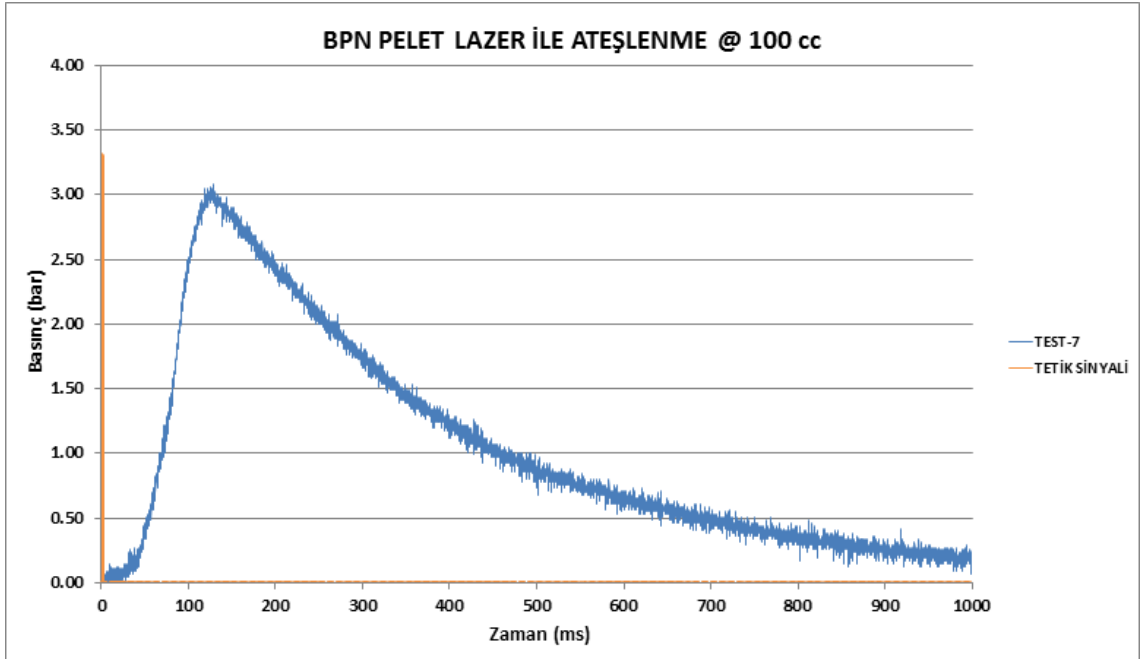
EK-10. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-5



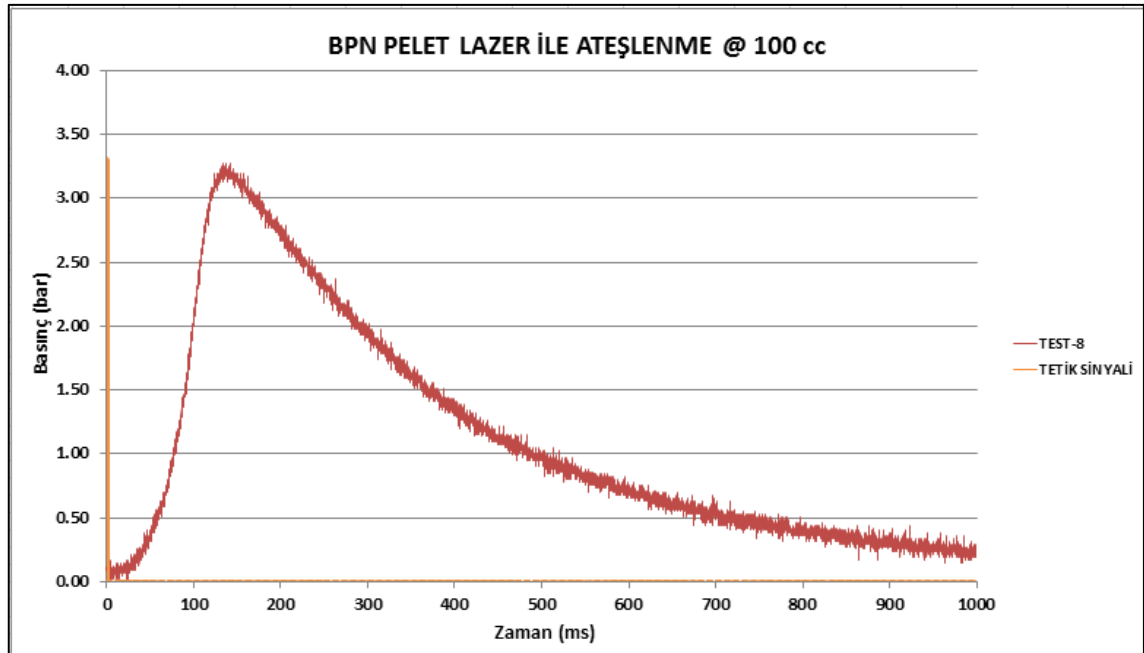
EK-11. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-6



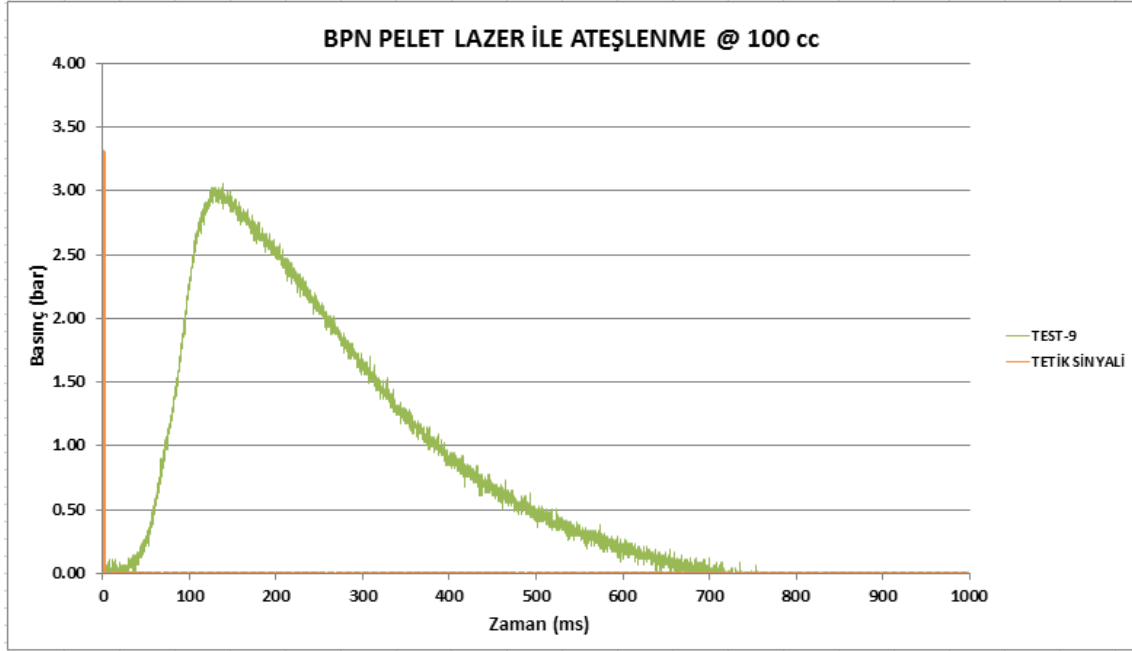
EK-12. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-7



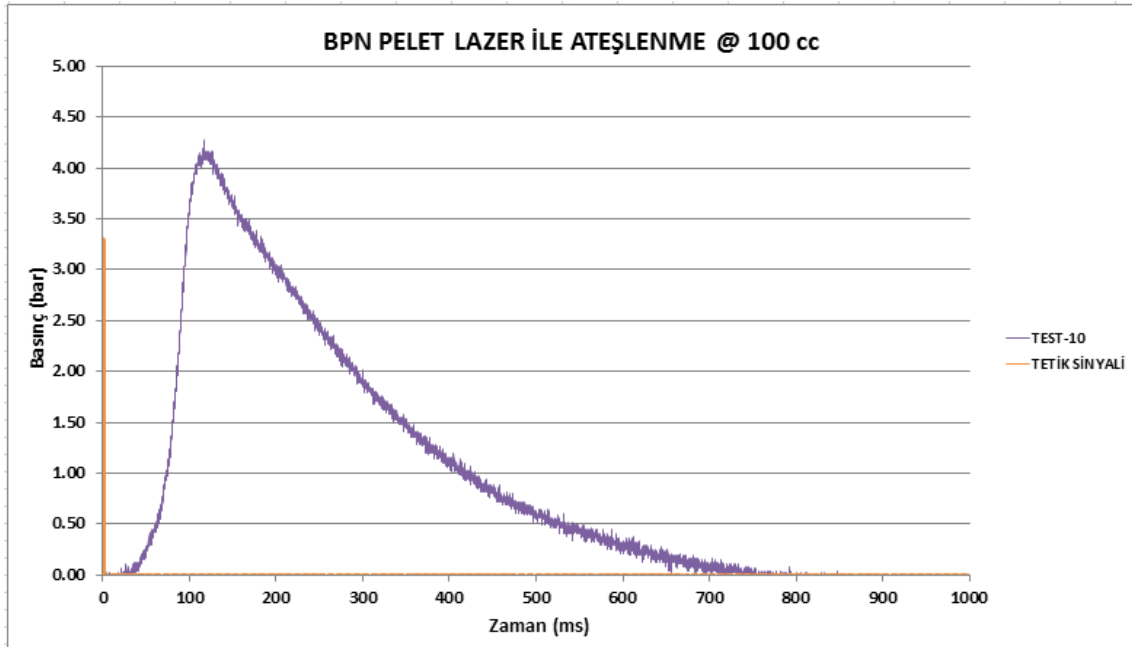
EK-13. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-8



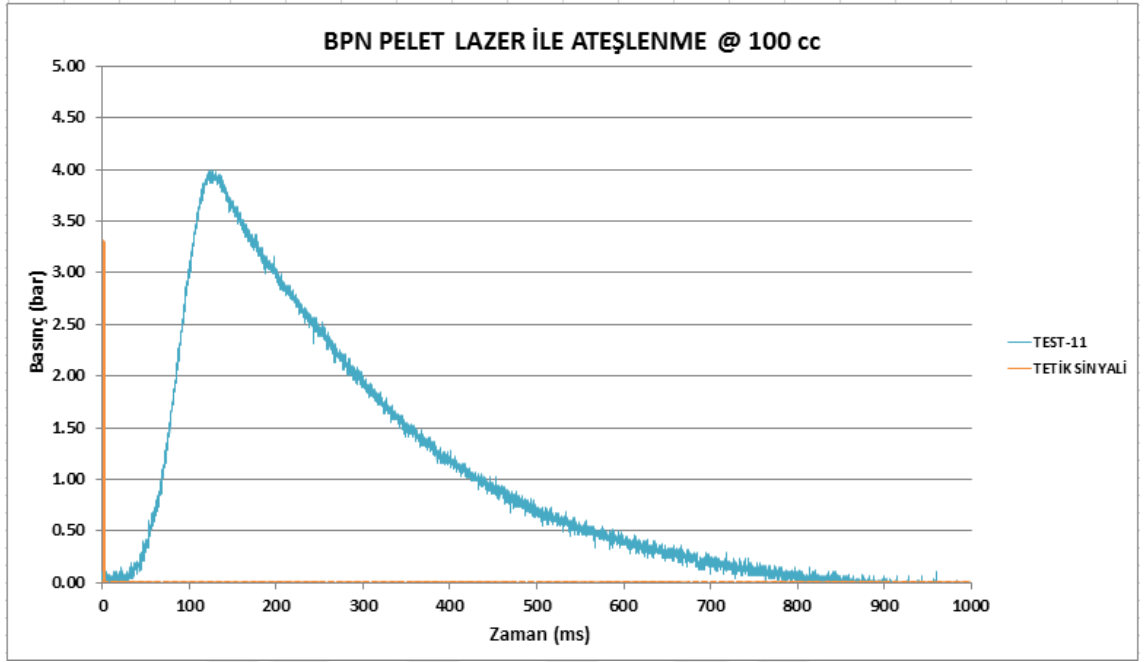
EK-14. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-9



EK-15. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-10



EK-16. BPN Peletin Kapalı Bombada Lazer İle Ateşleme Sonucundaki Basınç-Zaman Grafiği Test-11



EK-17. Tez Çalışması Orjinallik Raporu





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 29/05/2019

Tez Başlığı / Konusu: BOR POTASYUM NİTRAT PİROTEKNİK ÜRETİMİ VE LAZER İLE ATEŞLENME KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 102 sayfalık kısmına ilişkin, 28/05/2019 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: İSMET KIZILIRMAK
Öğrenci No: 12120360
Anabilim Dalı: KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
Programı: TEZLİ YÜKSEK LİSANS
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

29.05.2019

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. ZÜMRİYE AKSU

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: İsmet Kızılırmak

Doğum Yeri: Kırıkkale

Medeni Hali: Evli

Email Adresi: ismet.kizilirmak@tubitak.gov.tr

Eğitim

- **Lise :** Yahya Kemal Beyatlı Lisesi
- **Lisans:** Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans:** Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil

- **İngilizce:** YDS- 85 /100

İş Deneyimi

- PETLAS Lastik Sanayi- Arge Mühendisi (2008-2009)
- TÜBİTAK SAGE- Araştırmacı (2009- Devam Ediyor)

