

**DUYARSIZ PATLAYICILARIN DETONASYONU İÇİN
LAZER TETİKLİ DETONATÖR DÜZENEĞİ
GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF LASER DRIVEN DETONATOR
ASSEMBLY FOR DETONATION OF INSENSITIVE
EXPLOSIVES**

GONCA ÖZKASAPOĞLU

DOÇ. DR. SELİS ÖNEL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

ÖZET

DUYARSIZ PATLAYICILARIN DETONASYONU İÇİN LAZER TETİKLİ DETONATÖR DÜZENEGİ GELİŞTİRİLMESİ

Gonca ÖZKASAPOĞLU

Doktora, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selis ÖNEL

Haziran 2022, 133 sayfa

Modern patlayıcıların detonasyonu geleneksel olarak elektrik iletimi ile yapılmaktadır. Elektriksel detonatörler darbe, ısı, şok, elektrostatik boşalma ve elektromanyetik etkilere karşı ateşlenme hassasiyeti yüksek olan duyarlı birincil patlayıcıların ateşlenmesi prensibine dayandığından güvenli değildir. Elektrik iletimi yerine lazer ışınıyla ısıtma yoluyla detonasyon yapıldığında patlayıcı elektriksel dış etkilerden izole edilerek sistem emniyeti ve performansı üst düzeyde sağlanabilmektedir. Bu sebeple lazer detonatörler güvenli ateşleme sistemleri arasındadır.

Tez çalışmasında lazer tetikli bir uçan plaka sistemi geliştirilmiş, bir prototip üretilmiş ve duyarsız patlayıcıların detonasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda:

- Bir lazer ateşleme ünitesi tasarlanmış ve kurulmuştur. Lazer güç ünitesinden elde edilen %100 pik değerinde ışının %25 kayıp ile hedefe ulaşabildiği belirlenmiştir.

- Lazer ışınının iletildiği ve enerjik malzeme içeren bir ateşleyici gövdesi tasarlanmış ve üretilmiştir. Uçan plaka sisteminin yerleştirildiği gövde literatürdeki bir tasarım kullanılarak üretilmiştir.
- Duyarsız bir patlayıcı olan HMX malzemesi, lazer ışınına uygun hale getirilmiştir. HMX'in optik özelliklerinin geliştirilmesi kapsamında karbon siyahı ile homojen karıştırılması için özel bir numune hazırlama yöntemi geliştirmiştir.
- Lazerle ateşleme sistemi, HMX içeren numuneler ile test edilmiştir.
- Detonator prototipinin üretimi, uçan plaka gövdesinin lazer tetikli ateşleyici gövdesine entegre edilmesiyle tamamlanmıştır. Bu prototipin tasarımında kopma basıncı PMMA plaka için 420 MPa ve Al plaka için 198 MPa olarak hesaplanmıştır.
- Prototip ile 10 cm³ iç hacme sahip kapalı bir bomba düzeneğinde 1,32 g/cm³ değerinde düşük yoğunluklu HMX ve 400 µm kalınlığında plaka kullanılarak performans çalışmaları yapılmıştır: Ateşleme sonrası basınç 48,4±1,6 bar ve plaka hızı 620±58 m/s olarak ölçülmüştür.
- Plaka hızını tahmin etmek üzere matematiksel bir model geliştirilmiştir. Plaka hızı, aynı çalışma koşulları için 667,27 m/s olarak hesaplanmıştır ve ölçülen 562-678 m/s hız aralığı ile uyumlu bulunmuştur. 0,2 mm kalınlıkta bir Al plakanın 14 mm uzunluğunda bir ivmelendirme kanalı içeren sistemden çıkış hızının 1,4 km/s gibi çok daha yüksek bir hıza ulaşabileceği hesaplanmıştır.

Çalışmada daha güvenli olması sebebi ile lazer ile tetikleme yöntemi tercih edilerek, uçan plaka yöntemi ile detonasyon sağlayan ve duyarsız patlayıcıları doğrudan ateşleyebilen bir sistem yerli olarak geliştirilmiştir. Bu çalışma roket motoru ve harp başlığı ateşleyicileri gibi askeri mühimmatlarda ticari olarak kullanılacak lazer detonatörler için temel bir ar-ge çalışması oluşturmuştur.

Anahtar Kelimeler: Lazer tetikli uçan plaka, detonatör, duyarsız patlayıcılar, şok kaynaklı detonasyon, matematiksel modelleme, uçan plaka hızı

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF LASER DRIVEN DETONATOR ASSEMBLY FOR DETONATION OF INSENSITIVE EXPLOSIVES

Gonca ÖZKASAPOĞLU

Doctor of Philosophy, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Dr. Selis ÖNEL, Associate Professor

June 2022, 133 pages

The conventional method used for detonation of explosives is electrical transmission. Electrical detonators are not safe as they depend on the principle of firing of sensitive primary explosives, which are highly sensitive to impact, heat, shock, electrostatic discharge and electromagnetic effects. System safety and performance can be provided at high levels due to isolation of the explosive from the external electrical effects when the detonation is achieved by heating the explosive with a laser beam instead of using electrical transmission. For this reason, laser detonators are amongst the safest ignition systems.

In the thesis study, a laser driven flying plate system was developed, a prototype was manufactured, and shock-induced detonation of insensitive explosives was performed. Within this scope:

- Laser firing unit was designed and installed. It was found that the beam obtained from the laser power unit at 100% peak value could reach the target with 25% loss.
- An igniter body that contains the energetic material, where the laser beam is transmitted, was designed and manufactured. The body, in which the flying plate was placed, was manufactured using a design from literature.
- HMX, an insensitive explosive, was adapted to the laser beam. Within the scope of improving the optical properties of HMX, a special sample preparation method was developed for its homogeneous mixing with carbon black.
- The laser firing system was tested using the samples containing HMX.
- The production of the detonator prototype was finalized by integrating the flying plate body to the laser driven igniter body. In the design of this prototype, the rupture pressure was calculated as 420 MPa for the PMMA plate and 198 MPa for the Al plate.
- Performance studies of the prototype was carried out in a 10 cm³ closed bomb system using 1.32 g/cm³ low density HMX and a 400 μm thick plate: The ignition pressure and the velocity of the plate were measured as 48.4±1.6 bars and 620±58 m/s, respectively.
- A mathematical model was developed to predict the plate velocity. The plate velocity was calculated as 667.27 m/s and within the measured 562-678 m/s interval for the same operating conditions. It was calculated that the exit velocity of a 0.2 mm thick Al plate from a system with a 14 mm long acceleration gap could reach a much higher speed of 1.4 km/s.

This study comprises the domestic development of a safer detonation system due to the application of a laser triggering system for direct detonation of insensitive explosives based on the flying plate method. It has formed a basic R&D study for laser detonators that can be used commercially in military munitions, such as rocket engines and warhead igniters.

Keywords: Laser driven flying plate, detonator, insensitive explosives, shock to detonation transition, mathematical modelling, flying plate velocity

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her daim desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile yolumu aydınlatan, birlikte çalışmaktan çok büyük keyif aldığım değerli hocam Doç. Dr. Selis ÖNEL'e,

Tez çalışmamın başlangıcından itibaren akademik desteklerini esirgemeyen, tez izleme komitesi hocalarım, Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN ve Prof. Dr. Çağlar BAŞLAMIŞLI'ya,

Yüksek lisans çalışmam sırasında ve sonrasında çeşitli projelerde çalışma fırsatı bulduğum, bugün bulunduğum yerdeysem koşulsuz kendisinin sayesinde olan, her zaman sonsuz sevgi ve saygı ile andığım Prof. Dr. Ahmet Rıfat ÖZDURAL'a,

Tez çalışmama katkılarından dolayı TÜBİTAK SAGE yöneticilerim Erdoğan ÇETİN, Dr. Bülent SÜMER, Yener YEŞİLIRMAK ve Volkan KALENDER'e,

Deneysel çalışmalarındaki desteklerinden dolayı çok sevgili çalışma arkadaşlarım İsmet KIZILIRMAK, Ayfer ALTUN, Selçuk ÇELİK ve Talat UÇAR'a,

Bir parçası olmaktan büyük onur ve mutluluk duyduğum tüm TÜBİTAK SAGE Ailesi'ne,

Her zaman, her konuda destek olan, sevgilerini sonsuz hissettiğim, hayattaki en büyük şanslarım canım ailem, Annem, Anneannem, kardeşlerim Gamze ve Simge'ye,

Benimle heyecanlanan, benimle eğlenen, benimle gülen, acı, tatlı her anımı her zaman güzelleştiren, sevgilim, yol arkadaşım, canım eşime, hayat bir masal ise Prens'im kesinlikle sensin, Sezgin ÖZKASAPOĞLU'na,

Tezimi yazarken minik tekmeleri ile, tezimi sunmama sayılı günlerin kaldığı bu günlerde de sıcacık gülüşü ile bana eşlik eden, dokunuşu, bakışı, tüm varlığı ile hayat amacımı bulmamı sağlayan canımın içi, biricik kızım Deniz'ime,

En içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	x
ŞEKİLLER.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	7
2.1. Enerjik Malzemeler.....	7
2.1.1. Patlayıcılar.....	7
2.1.2. Yakıtlar.....	9
2.1.3. Piroteknikler.....	9
2.2. Patlayıcıların Ateşlenme Mekanizmaları.....	9
2.3. Elektriksel Yöntemler ile Patlayıcı Detonasyonu.....	13
2.4. Lazer ile Patlayıcı Detonasyonu.....	15
3. LAZER ATEŞLEME SİSTEMİ KURULUMU ve KARAKTERİZASYONU.....	21
3.1. Kurulum.....	21
3.1.1. Lazer Güç Ünitesi.....	21
3.1.1.1. Tetik Sinyali.....	22
3.1.1.2. Dokunmatik Ekran.....	22

3.1.1.3. Lazer Diyotlar	23
3.1.2. Mercek Sistemi.....	27
3.1.1.4. Işın İletimi	29
3.2. Karakterizasyon.....	31
3.2.1. Işın Gücü Ölçümü	31
3.2.2. Işın Çapı Ölçümü ve Dağılım Analizi.....	31
3.2.3. Lazer Ateşleme Sistemi Tetik Akımı Ölçümü	32
3.2.4. Işın Süresi Doğrulaması	33
3.3. Sonuçlar.....	34
4. LAZER TETİKLİ UÇAN PLAKA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ	45
4.1. Sistem Tasarımı.....	45
4.1.1. Ateşleyici Gövdesi	45
4.1.2. Uçan Plaka Gövdesi	47
4.2. Sistem Performansının Değerlendirilmesi	48
4.2.1. Matematiksel Mekanik Dayanım Analizleri	48
4.2.2. Sızdırmazlık Ölçümü	50
4.2.3. Hidrostatik Test.....	50
4.2.4. Radyografik Analiz	51
5. ENERJİK MALZEMELERİN LAZER İLE ATEŞLENMESİ.....	52
5.1. Genel Bilgi	52
5.2. HMX ve HMX+%3 Karbon Siyahı Karışımı ile Yapılan Çalışmalar.....	52

5.2.1. Numune Hazırlanması	54
5.2.2. Karakterizasyon	58
5.2.2.1. Yoğunluk	58
5.2.2.2. Tutuşma Sıcaklığı	58
5.2.2.3. Kalorifik Enerji	62
5.3. ZPP	62
5.3.1. Karakterizasyon	62
5.3.1.1. Yoğunluk	62
5.3.1.2. Tutuşma Sıcaklığı	62
5.3.1.3. Kalorifik Enerji	64
5.4. ZPP + HMX	64
5.5. Lazer Ateşleme Sonuçları	65
5.5.1. HMX	65
5.5.2. ZPP	69
5.5.3. ZPP + HMX	69
6. ZPP + HMX’i ATEŞLEMEDE ELEKTRİK ve LAZER YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	71
6.1. Elektriksel Yöntemle Ateşleme	71
6.1.1. Numune Hazırlama ve Test Yöntemi	71
6.1.2. Sonuçlar	75
6.2. Lazer ile Ateşleme	80
6.2.1. Numune Hazırlama ve Test Yöntemi	80

6.2.2. Sonuçlar.....	83
6.2.2.1. Sınırlandırılmış Yapının Etkisi	83
6.2.2.2. HMX Yoğunluğunun Etkisi	85
6.2.2.3. Lazer Işın Gücünün Etkisi.....	86
6.3. Karşılaştırma	88
7. LAZER TETİKLİ UÇAN PLAKA PERFORMANS ÇALIŞMALARI.....	94
7.1. Uçan Plaka Hızının Belirlenmesi	94
7.1.1. Deneysel Yöntem	94
7.1.2. Matematiksel Yöntem	99
7.2. Duyarsız Patlayıcıların Şok Detonasyonunun İncelenmesi	108
7.2.1. Yöntem.....	108
7.2.2. Sonuçlar.....	110
7.3. Sistem Parametrelerinin Performans Etkisinin Matematiksel Modelle İncelenmesi.....	112
7.3.1. Plaka Kalınlığının Etkisi	112
7.3.2. Plaka Malzemesinin Etkisi.....	114
7.3.3. Ateşleme Öncesi Sistem Boşluk Çapının Etkisi	115
7.3.4. İvmelendirme Kanal Uzunluğunun Etkisi.....	117
7.3.5. Optimum Sistem Parametreleri	118
8. SONUÇLAR	120
KAYNAKLAR	123

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Duyarlı ve Duyarsız Patlayıcıların Detonasyon Hassasiyetlerinin Karşılaştırılması	8
Çizelge 2.2. Yanma, Deflagrasyon ve Detonasyon Özelliklerinin Karşılaştırılması	10
Çizelge 3.1. 1 W ve 10 W Lazer diyotta çalışma akımı ile ışın gücü değişimi (Fiberlast A.Ş.)	25
Çizelge 3.2. Lazer diyot için ışın gücü ölçüm sonuçları	34
Çizelge 3.3. Lazer ateşleme sistemindeki optik kayıplar	38
Çizelge 3.4. Lazer ışın süresi doğrulama sonuçları	43
Çizelge 5.1. HMX Tane Dağılımı Sınıflandırması (MIL-DTL-45444C, 1996)	53
Çizelge 5.2. HMX için piknometre ile yoğunluk analizi sonuçları	58
Çizelge 5.3. ZPP+HMX'in lazer ile ateşlenme verileri	70
Çizelge 6.1. HMX pres basıncına karşılık yoğunluk değerleri	72
Çizelge 6.2. ZPP+HMX elektriksel ateşleme sonuçları	77
Çizelge 6.3. Lazer Tetikli Ateşleyici Sistem Parametreleri	80
Çizelge 6.4. Lazer Ateşleme Çalışma Parametreleri	82
Çizelge 6.5. Kapalı bomba ortamında kapalı ve açık sistemde lazerle ZPP+1,32 g/cm ³ HMX ateşleme deneylerinin sonuçları	85
Çizelge 6.6. Farklı HMX yoğunluklarında ZPP+HMX lazer ateşleme kapalı bomba deneysel verilerinin analizi	86
Çizelge 6.7. Farklı lazer ışın güçlerinde ZPP+HMX lazer ateşleme kapalı bomba deney sonuçları	87
Çizelge 6.8. ZPP+HMX numunesinin elektrik ve lazer ile ateşleme deney sonuçları	91
Çizelge 7.1. Plaka hızın zamana karşı değişimi	98
Çizelge 7.2. Kapalı Bomba Deney Parametreleri	100
Çizelge 7.3. Kapalı Bomba Deney Verilerinin Çözümleme Sonuçları	101
Çizelge 7.4. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistem Sabitleri	104
Çizelge 7.5. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistemi Hesaplanan Sistem Parametreleri	104
Çizelge 7.6. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistemi Değişkenleri	104
Çizelge 7.7. Duyarsız patlayıcılar ile şahit plaka test parametreleri ve çukur testi sonuçları	110

Çizelge 7.8. Plaka kalınlığının plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi	113
Çizelge 7.9. Plaka malzemesinin plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi	115
Çizelge 7.10. Ateşleme öncesi boşluk çapının plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi	117
Çizelge 7.11. İvmelendirme boşluk uzunluğunun plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi	118

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Detonasyon sonucu açığa çıkan şok dalgası görüntüleri, (a) Rusya tarafından geliştirilen termobarik bomba test atışlarından elde edilen fotoğraf (Crimea, Russia September 9, 2016 A thermobaric bomb explosion during the Caucasus 2016 strategic drill), (b) Kanada Savunma Sanayi araştırma geliştirme faaliyetleri sırasında çekilen fotoğraf (DRDC's experimental proving ground supports CAF, allied readiness).....	11
Şekil 2.2. DDT ve SDT mekanizmalarının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.3. Ateşleme zincirinin şematik gösterimi (Spring, 2012)	14
Şekil 2.4. Elektriksel ve lazer detonatör sistemlerinin şematik karşılaştırması (Merson ve Salas, 1994)	17
Şekil 2.5. Lazer EBW detonator sistemi (Kennedy, 2006)	18
Şekil 2.6. Lazer tetikli uçan plaka detonatör (Shen ve ark., 2017)	20
Şekil 3.1. Tasarlanan ve üretilen lazer güç ünitesi	21
Şekil 3.2. Lazer güç ünitesi ekranı ve sürekli modda ışın üretme komutunun uygulaması	23
Şekil 3.3. (a) 1 W ve (b) 10 W gücünde ışın üreten fiber optik kablo ile eşleştirilmiş lazer diyot ve (c) 1 W ve (d) 10 W cihazların boyutsal özellikleri. Ölçüler mm'dir.	24
Şekil 3.4. Lazer diyot çalışma akımına karşılık ışın çıkış gücü.....	25
Şekil 3.5. SMA tipi optik bağlantı ve fiber optik kablo.....	26
Şekil 3.6. Mercek sistemi ve ateşleme düzeneğini oluşturan bölümler	27
Şekil 3.7. Mercek sistemi arakesit görüntüsü ve lazer ışın iletimi	29
Şekil 3.8. Enerjik malzemeyi sabitlemek için kurulan düzenek	30
Şekil 3.9. Fotodiyot sensör ve optik güç ölçer.....	31
Şekil 3.10. Lazer ışın dağılımı şematik gösterimi	32
Şekil 3.11. Lazer ateşleme sistemi optik ışın analizi	32
Şekil 3.12. Lazer ışın süresini doğrulamak için kurulan test düzeneği.....	33
Şekil 3.13. 2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücünün değişimi	37
Şekil 3.14. 3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücünün değişimi	38
Şekil 3.15. Fokal mesafede lazer ışın çapı ölçüm sonuçları	39

Şekil 3.16.	Fokal mesafede lazer ışın dağılımı.....	39
Şekil 3.17.	Enerjik malzeme üzerine gönderilen lazer ışın şiddetinin dağılımı	40
Şekil 3.18.	Optik mesafenin (a) 47 mm ve (b) 44 mm olduğu durumlarda lazer ışınının çapı ve şiddetinin yüzeyde dağılımı.....	41
Şekil 3.19.	Lazer ateşleme sistemi tetik akımı grafiği	41
Şekil 3.20.	20 ms ışın süresi için 0,04 ms, 20,34 ms ve 20,36 ms anlarında hızlı kamera görüntüleri	42
Şekil 3.21.	100 ms ışın süresi için 0,02 ms, 100,42 ms ve 100,44 ms anlarında hızlı kamera görüntüleri	43
Şekil 4.1.	Lazer tetikli uçan plaka sisteminin (a) önden ve (b) 30° açı ile katı modeli ..	45
Şekil 4.2.	Ateşleyici gövdesinde lazer ışınının iletimi	46
Şekil 4.3.	Lazer tetikli ateşleyici gövdesinin arkadan görünüşü	46
Şekil 4.4.	Lazer tetikli ateşleyici gövdesi ve ZPP+HMX basılmış gövde bütünü, önden görünüşü.....	47
Şekil 4.5.	Uçan plaka gövdesinin önden ve arkadan görünüşü	47
Şekil 4.6.	Ateşleyici gövdesinin şematik görünümü	48
Şekil 4.7.	Uçan plaka gövdesinin şematik görünümü	49
Şekil 4.8.	Hidrostatik test basınç-zaman grafiği	50
Şekil 4.9.	Lazer tetikli uçan plaka sisteminin radyografik görüntüsü ve boyutsal sınırları	51
Şekil 5.1.	Duyarsız patlayıcı, HMX moleküler yapısı	53
Şekil 5.2.	Saf HMX ve ağırlıkça %3 karbon siyahı ile kaplanmış HMX (1. katile)	55
Şekil 5.3.	HMX+%3 karbon siyahı karışımı hazırlama yöntemi	56
Şekil 5.4.	(a) 1. Kafile ve (b) 2. kafile HMX+%3 karbon siyahı karışımlarının kalıba basıldıktan sonra yüzeylerinin mikroskop görüntüsü (Büyütme oranı 3X).	57
Şekil 5.5.	Haznelere basılmış saf ve karbon siyahı ile kaplı HMX.....	57
Şekil 5.6.	Saf HMX için TGA sonucu elde edilen termogram.....	60
Şekil 5.7.	HMX+%3 karbon siyahı karışımı için TGA termogramı	60
Şekil 5.8.	Saf HMX için DSC termogramı.....	61
Şekil 5.9.	HMX+%3 karbon siyahı karışımı için DSC termogramı.....	61
Şekil 5.10.	ZPP için TGA termogramı	63
Şekil 5.11.	ZPP için DSC termogramı	64
Şekil 5.12.	Lazer uygulanan HMX numunesinin yüzeyinin mikroskop görüntüsü ..	65

Şekil 5.13.	Karbon siyahı ile kaplanmış HMX lazer ateşleme sonrası mikroskop görüntüleri	67
Şekil 5.14.	Lazer ile ateşleme sonrası PMMA plakaların görüntüleri.....	69
Şekil 5.15.	Lazer ile ateşlenen ZPP+HMX’de basıncın zaman ile değişimi	70
Şekil 6.1.	NASA standardına uygun ZPP+HMX elektriksel ateşleme sisteminin şematik gösterimi (Moore, Roberson, Morgan ve ark., 2016)	71
Şekil 6.2.	NASA standardında ateşleyici tasarımına göre üretilen, ZPP, 1,32 g/cm ³ 1,48 g/cm ³ ve 1,58 g/cm ³ yoğunluğunda saf HMX ve %3 karbon siyahı içeren HMX yerleştirildikten sonra kapatılan elektriksel ateşleyici	72
Şekil 6.3.	Kapalı bomba düzeneği	73
Şekil 6.4.	Kapalı bomba deneylerinde zamana bağlı basınç ve akım değişimi	74
Şekil 6.5.	Hızlı kamera tetik akımı ve ateşleyici köprüteline gönderilen akımın zamana karşı değişimi	74
Şekil 6.6.	Farklı yoğunlukta HMX ve ZPP için elektriksel ateşlenme sonucu oluşan basıncın ve akımın zaman ile değişimi	75
Şekil 6.7.	Farklı yoğunlukta HMX ve %3 karbon siyahı karışımı ve ZPP için elektriksel ateşlenme sonucu oluşan basıncın ve akımın zaman ile değişimi	76
Şekil 6.8.	ZPP+karbon siyahı ile kaplı HMX konfigürasyonu hızlı kamera görüntüleri, HMX yoğunluğu= 1,58 g/cm ³	78
Şekil 6.9.	ZPP+saf HMX içeren elektriksek ateşleme sırasında elde edilen şok dalgası görüntüleri (saf HMX yoğunluğu: 1,58 g/cm ³).....	79
Şekil 6.10.	Düşük ve yüksek tepe basıncının elde edildiği elektriksel ateşleme sonrası ateşleyici görüntüleri.....	80
Şekil 6.11.	Kapalı bomba deneylerinde lazer ile ZPP+HMX ateşleme sürecinde (a) ZPP yanma tepkimelerinin başladığı ve (b) yanma tepkimelerinin ilerlediği anın görüntüsü.....	81
Şekil 6.12.	Kapalı ve açık sistem yapısının ZPP+1,32 g/cm ³ HMX lazer ateşlenme performansına etkisi	84
Şekil 6.13.	HMX yoğunluğunun ZPP+HMX lazer ateşlenme performansına etkisi	86
Şekil 6.14.	Lazer ışın gücünün ZPP+HMX ateşlenme performansına etkisi	87
Şekil 6.15.	(a) Elektriksel ve (b) lazer ateşleme yöntemlerinin şematik gösterimi ...	88
Şekil 6.16.	ZPP+HMX numunesine elektrik ve lazer uygulanarak ateşleme yapılan deneylerde zamana karşı basınç ve akımın değişimi	91
Şekil 7.1.	Uçan plaka hızının tayin edildiği sistem.....	94

Şekil 7.2.	Lazer ile ateşleme sonrası uçan plaka sistemi görüntüsü.....	95
Şekil 7.3.	Uçan Al plaka mikroskop görüntüsü.....	95
Şekil 7.4.	Lazer tetikli uçan plaka hızlı kamera görüntüleri.....	97
Şekil 7.5.	Plaka konumunun zamana karşı değişimi	98
Şekil 7.6.	Uçan plaka hızının matematiksel olarak belirlenmesine yönelik geliştirilen yöntem adımları	99
Şekil 7.7.	Kapalı bomba hacminin lazer tetikli uçan plaka sistemi basınç-zaman profiline etkisi	100
Şekil 7.8.	Lazer tetikli uçan plaka sistemi tepe basıncının kapalı bomba hacmi ile değişimi.....	101
Şekil 7.9.	Lazer tetikli uçan plaka sistemi için teorik olarak elde edilen basınç-zaman profili	103
Şekil 7.10.	Uçan plaka hızını belirlemeye yönelik oluşturulan ve Matlab ile çözümlenen algortima	105
Şekil 7.11.	Plakanın lazer tetikli uçan plaka sistemi içindeki konumunun zamana bağlı basit şematik gösterimi	106
Şekil 7.12.	Plaka hızının zaman ve plaka konumuna bağlı değişimi.....	107
Şekil 7.13.	Elektriksel ateşleyici gövdesinin (a) üstten ve (b) karşıdan görünüşü ..	109
Şekil 7.14.	Elektriksel uçan plaka sistemi ile duyarsız patlayıcı detonasyon inceleme düzeneği, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş, (c) şahit plaka yerleştirilmiş görünüş	109
Şekil 7.15.	Detonasyonu incelenen duyarsız patlayıcılar (presleme öncesi toz numuneler, 220 mg).....	110
Şekil 7.16.	Duyarsız patlayıcıların detonasyonu sonrası şahit plakaların görüntüsü	111
Şekil 7.17.	Plaka kalınlığının uçan plaka hız-zaman profiline etkisi	113
Şekil 7.18.	Plaka malzemesinin uçan plaka hız-zaman profiline etkisi	115
Şekil 7.19.	Ateşleyici gövdesi boşluk çapının uçan plaka hız-zaman profiline etkisi	116
Şekil 7.20.	Uçan plaka sisteminde ivmelendirme kanal uzunluğunun uçan plaka hız-zaman profiline etkisi.....	118
Şekil 7.21.	Optimum sistem parametrelerinde plaka hızının, zaman ve plaka konumu ile değişim grafiği	119

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	Uçan plaka ivmesi, m/s^2
A_p	Uçan plaka yüzey alanı, m^2
Al	Alüminyum
$D_{boşluk}$	Ateşlenme öncesi boşluk çapı, m
d_p	Uçan plaka yoğunluğu, kg/m^3
D_p	Uçan plaka çapı, m
D_{toz}	Enerjik malzeme çapı, m
$L_{boşluk}$	Ateşleme öncesi boşluk uzunluğu, m
L_p	Uçan plaka kalınlığı, m
L_{toz}	Enerjik malzeme uzunluğu, m
m_p	Uçan plakanın ağırlığı, kg
P	Sistem basıncı, Pa
P_0	Ateşleme öncesi basınç, Pa
$T(1)$	İlk basıncın oluştuğu ilk an, ms
v	Uçan plakanın hızı, m/s
$v(1)$	Uçan plakanın ateşlenme öncesi hızı, m/s
V	Sistemdeki boşluk hacmi, m^3
$V_{boşluk}$	Sistemdeki boşluğun ateşlenme öncesindeki hacmi, m^3

V_p	Uçan plakanın hacmi, m^3
V_{toz}	Enerjik bileşenin bulunduğu boşluğun ateşleme sonrasındaki hacmi, m^3
x	Uçan plakanın uçuş sırasındaki konumu, m

Kısaltmalar

DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (Differential Scanning Calorimetry)
fps	Bir saniyede kayıt altına alınan görüntü sayısı (ing. frames per second)
HMX	1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraazasiklooktan
HNS	2,2',4,4',6,6'- heksanitrostilben
MIL	Askeri (Military)
ms	Milisaniye
NSI	NASA standardında ateşleyici (NASA Standard Initiator)
PBXN	Polimer (plastik) bağlı patlayıcı (RDX+Viton A)
PEEK	Polieter eter keton
PETN	Pentaeritritol tetranitrat
PMMA	Polimetil metakrilat
RDX	1,3,5-trinitroperhydro-1,3,5-triazine
TGA	Termogravimetrik analiz (Thermogravimetric analysis)
ZPP	Zirkonyum potasyum perklorat

1. GİRİŞ

Araştırma Sorusunun Temeli

Detonatörler, patlayıcıların ateşlenmesi için kullanılan sistemlerdir. Elektriksel yöntemle detonasyonun gerçekleştiği ticari detonatörler askeri ve uzay uygulamaları ile taşıtların hava yastığının aktivasyonu, maden çıkarma gibi sivil uygulamalarda kullanılmaktadır (Ahmad ve Cartwright, 2015). Elektriksel detonatörlerin, ateşlenme hassasiyeti düşük olan duyarlı patlayıcılar ile kullanılması gerekmektedir. Detonatörlerin elektriksel etkiler ile istem dışı aktive olma olasılığı bulunmaktadır. Bu temel kısıtlamalar nedeni ile konvansiyonel detonatörlerde sistem emniyeti oldukça düşüktür.

Lazer detonatörler, konvansiyonel elektriksel detonatörler ile kıyaslandığında sistem emniyetinin daha üst düzeyde sağlandığı güvenli ateşleme sistemlerindedir. Lazer detonatörlerde darbe, ısı, şok, kaçak akım, elektromanyetik etkilere karşı istem dışı ateşlenme hassasiyeti çok yüksek olan duyarlı patlayıcılara ihtiyaç olmadan detonasyon mümkündür. Elektriksel detonatörlerde iletken bir köprüteli bulunması enerjik malzemenin elektriksel dış etkilere maruz kalmasına sebep olmakta ve güvenlik riski yaratmaktadır. Köprüteli yerine lazer ışını kullanılan lazer detonatörlerde enerjik malzemelerin elektriksel dış etkilerden izolasyonu sayesinde daha güvenli olması sağlanmaktadır.

Lazer detonatörlerin sistem emniyetinin kritik öneme sahip olduğu mühimmat alt sistemleri başta olmak üzere detonasyon ihtiyacının bulunduğu uygulamalarda elektriksel detonatörler yerine kullanımı üzerine uluslararası çalışmalar yürütülmektedir. Stratejik önemi nedeniyle ticari olarak geliştirilen lazer detonatörlerin tasarım ve üretim teknolojisi gizli tutulmaktadır. Mevcut durumda ülkemizde lazer detonatörlerin geliştirilmesi ile ilgili yayınlanmış bir literatür araştırması ya da çalışma bulunmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında duyarsız patlayıcıların şok etkisi ile detonasyonunun sağlandığı, düşük boyut ve ağırlıkta, ticari uygulamalarda kullanılabilir lazer tetikli uçan plaka sistemi geliştirilmiştir. Üretilen prototip sistemde enerjik malzemenin lazer ışını ile ateşlenmesi sonucu duyarsız patlayıcıların şok etkisi ile detonasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının nihai hedefleri:

- Elde edilen bilgi birikiminin lazer detonatörlerin ülkemize kazandırılması için temel Ar-Ge çalışması oluşturması,
- Lazer ateşleme sistemi ile lazer tetikli uçan plaka prototipinin tasarım, üretim, performans belirleme ve modelleme faaliyetlerinin yer aldığı entegre çalışmanın uluslararası bilime kazandırılmasıdır.

Detonasyon Sistemlerine Genel Bakış

Günümüzde yakıtlar, piroteknikler ve patlayıcıları kapsayan enerjik malzemelerin ateşlenmesi detonatör, ateşleyici, füyeye, aktüator vb. sistemler ile elektriksel yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin temel prensibi enerjik malzeme ile temas halinde bulunan ve köprüteli olarak adlandırılan iletken tel üzerinden akım geçirilmesine dayanmaktadır. Elektrik akımı etkisi ile oluşan ısı, köprüteliyle temas halinde olan enerjik malzemeyi ateşlemektedir.

Konvensiyonel elektriksel ateşleme yöntemlerindeki temel kısıtlama, enerjik malzemenin çevresel etkilerden elektriksel olarak izole edilememesidir. Bu sistemlerde kontrol dışı oluşan elektromanyetik alan, radyo frekansı, elektromanyetik titreşim, elektrostatik boşalma veya operatör kaynaklı etkilere bağlı istenmeyen ateşlemenin önüne geçilememektedir. Bileşenler, yalıtım ile elektriksel etkilerden kısmen uzaklaştırılabilir; ancak yalıtım hiçbir zaman tam anlamıyla etkin olmamakta ve sistemi oluşturan bileşenlerin üretim ve test maliyetlerini artırmaktadır (Merson ve ark., 1994).

Elektriksel ateşleme sistemlerinden kaynaklanan bu darboğazları engellemek amacıyla, enerjik malzemeleri lazer ile doğrudan ateşleme çalışmaları 1960 yılında başlamıştır (Brish ve ark., 1966). Bu çalışmalar ile detonasyon için ateşleme hassasiyeti yüksek duyarlı patlayıcılara duyulan ihtiyacın ortadan kalkması ve sistemin emniyetinin artırılması amaçlanmıştır (Brish ve ark., 1966; Brish ve Galeev, 1969; Bykhalo ve ark., 1986). 1990 yılından itibaren ABD ordusu tarafından lazer ile ateşlenen silahlar test edilmeye başlanmıştır (Ahmad ve Cartwright, 2015).

Lazer ile ateşleme yönteminde, elektrik akımı yerine optik yöntemle enerji yüklü ışın demeti kullanılması, söz konusu sistemleri elektriksel boşalma ve elektromanyetik girişimlere karşı duyarsız hale getirmektedir (Merson ve Salas, 1994). Lazer ateşleme

sistemleri, istem dışı ateşlemeye karşı sistem emniyetinin sağlanmasına ek olarak, dış uyarılardan bağımsızlık açısından değerlendirildiğinde, elektriksel ateşleme sistemlerine kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir (Yong ve ark., 2015).

Patlayıcılar duyarlı ve duyarsız patlayıcılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Duyarsız patlayıcıların ateşlenmesi, duyarlı patlayıcılara kıyasla oldukça zordur. Duyarlı patlayıcılar darbe, sürtünme, ısı, şok, darbe, kaçak akım, elektrostatik boşalma gibi dış etkenler ile istem dışı ateşlenebilmektedir (Oyler ve ark., 2015). Bu sebeple özellikle ticari uygulamalarda sistem emniyetinin sağlanması açısından detonasyon eldesi için duyarsız patlayıcılar tercih edilmektedir. Duyarsız patlayıcılar, lazer ışını ile doğrudan ateşlenebilmektedir (Renlund ve ark., 1989; Paisley, 1989; Ewick ve ark., 1993).

Lazer ışınının sağladığı enerji ile ince bir plakanın sistemden yüksek hızda koparak duyarsız patlayıcı yüzeyine çarpması sonucu şok etkisi ile detonasyonun elde edildiği sistemler bulunmaktadır (Sheffield ve Fisk, 1983; Steven ve ark., 2016). Bu sistemlerde GW mertebelerinde çok yüksek enerjiye sahip lazer ışınına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüz lazer teknolojisinde nanosaniye mertebelerinde mJ seviyesinde lazer ışını üreten bu sistemler oldukça büyük boyutlarda ve ağırlıktadır. Bu sebeple duyarsız patlayıcıların detonasyonu için gerçekleştirilen bu çalışmalar laboratuvar ölçeklidir ve ticari uygulamalara uygun, özellikle mühimmat alt sistemlerinde kullanılabilecek ağırlık ve boyutlarda sistemler geliştirilememiştir (Yong ve ark., 2015).

Araştırma Yöntemi ve Sonuçları

- Enerjik malzemeleri lazer ile ateşleyen bir sistem geliştirilmiştir. Sistem parametrik çalışmaya uygun ve yurtiçi firmalar tarafından üretilebilir. Lazer güç ünitesi ve mercek alt bileşenlerinden oluşan sistem FiberLAST Fiber Lazer Sistemleri ve Teknolojileri Mühendislik Bilişim Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiş ve kurulumu yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında optik güç ölçer ile sistemde üretilen ışının sistem arayüzlerindeki kayıpları ölçülmüştür. Üretilen ışın %25 kayıp ile enerjik malzeme yüzeyine ulaşmaktadır. Işın profil analiz cihazı ile enerjik malzeme yüzeyine ulaşan ışının çapı 110 µm olarak ölçülmüştür. 50 mm olan odak mesafede %100 pik değerinde gaussian şeklinde homojen ışın dağılımı elde edilmiştir. Odak mesafeden sapmalarda ışında homojen dağılım elde edilememiştir. Lazer tetikli uçan plaka prototipinde

kullanılan PMMA (polimetil metakrilat) plakanın lazer ışınının odak mesafesini değiştirdiği belirlenmiştir. Odak mesafe, prototipte 2 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığı durumda 51,5 mm, 3 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığı durumda ise 51,6 mm olarak değişmiştir. Hızlı kamera ve kızılötesi sensör kartı ile ışın süresi doğrulanmıştır. Lazer ateşleme sisteminde 15 ms'ye kadar olan ışın süreleri, 1,7 ms eksi tolerans, 20 ms ve daha yüksek lazer ışın süreleri ise, 0,3-0,4 artı tolerans ile üretilmiştir.

- Lazer tetikli uçan plaka sistemi geliştirilmiştir. Uçan plaka gövdesi tasarımında, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen elektriksel yöntem ile ateşlenen uçan plaka gövdesinin boyutsal özellikleri kullanılmıştır (Dinegar, 1982). Prototipte kullanılan PMMA ve Al plakaları için matematiksel mekanik dayanım analizleri yapılarak kalınlıkları sırasıyla 3 mm ve 400 µm olarak belirlenmiştir. Üretimi yapılan tüm ateşleyici gövdelerinde ateşleyici gövde-PMMA plaka arayüzündeki sızdırmazlık değeri He sızdırmazlık testi ile ölçülmüştür ve $1,0 \times 10^{-8}$ mbar.Lt He/s ($3,7 \times 10^{-9}$ mbar.Lt hava/s)'den küçük bulunmuştur. Hidrostatik test ile ateşleyici gövdesi ve uçan plaka sisteminin 900 bar basınca dayanıklı olduğu belirlenmiştir.
- Lazer ışını ile doğrudan ateşleme için duyarsız patlayıcı HMX seçilmiştir. HMX malzemenin lazer ışın emiliminin artırılması amacıyla karbon siyahı ile karıştırılması ve homojen bir renk dağılımı eldesi için üretim yöntemi geliştirilmiştir. Ürünler optik mikroskop ile incelenmiştir. HMX+%3 karbon siyahı karışımında eleme tekrarının artırılması ve elek açıklığının kademeli olarak 500 µm, 250 µm ve 150 µm olarak azaltılması ile homojen bir karışım elde edilmiştir. Karışıma 110 µm lazer ışın çapı, 78947 W/cm² ışın yoğunluğu ve 7,5 J enerjiye sahip bir lazer ışını uygulandığında sürdürülebilir yanma elde edilememiştir. HMX+%3 karbon siyahı karışımını ateşleyebilmek için lazer ışını-HMX arayüzüne ZPP piroteknik bileşeni yerleştirilmiştir. ZPP'nin 270 mW ışın gücüne sahip lazer ile 20 ms ısıtılıp ateşlenmesi sonucu açığa çıkan yüksek sıcaklık ve basınçtaki gaz fazın yarattığı şok etkisi ile HMX+%3 karbon siyahı karışımının ateşlenmesi başarılmıştır.
- ZPP+HMX ile lazer ateşleme çalışmaları yürütülmeden önce, konvansiyonel elektriksel yöntem ile kapalı bomba ateşleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. NASA standart ateşleyici tasarımı ile üretilen elektriksel ateşleyicilerde 50 mg HMX bulunmaktadır. En iyi HMX yoğunluğunun tespit edilebilmesi için 1,32

g/cm^3 , $1,48 \text{ g/cm}^3$ ve $1,58 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip HMX malzeme kullanılarak üretilen ateşleyiciler ile 10 cm^3 iç hacme sahip kapalı bomba düzeneğinde deneyler yapılmıştır. HMX yoğunluğunun azalması ile ateşleyici tepe basıncının $39,53$ bara kadar yükseldiği belirlenmiştir.

- Uçan plaka prototipleri ile 10 cm^3 hacimli kapalı bomba düzeneğinde lazer ile üç tekrarlı ateşleme çalışmaları yapılmıştır. $250 \text{ }\mu\text{m}$ veya $400 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında bir plaka ile sınırlandırılan sistemde yapılan çalışmalarda $1,32 \text{ g/cm}^3$ ve $1,48 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip HMX kullanılarak yoğunluğunun ateşleme sonrası prototip tepe basıncı, yanma hızı ve etkinleşme ve yanma süresi gibi parametrelere etkisi incelenmiştir. En yüksek tepe basıncı, $400 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında plaka ile sınırlandırılan ve $1,32 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğuna sahip HMX kullanılan prototipte $48,4 \pm 1,6$ bar olarak elde edilmiştir. Lazer ışın süresindeki değişim etkisi ise 18 cm^3 hacme sahip kapalı bomba düzeneğinde incelenmiştir. Ateşleme testlerinde 524 mW ve 1048 mW güce sahip lazer ışını kullanılmıştır. Etkinleşme süresinin lazer ışın gücünün artışı ile ters orantılı olarak kısaldığı görülmüştür ve 1048 mW güce sahip lazer ışını tercih edilmiştir.
- Ateşleme testleri, en yüksek tepe basıncının elde edildiği prototip ile üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir ve hızlı kamera ile kayıt altına alınmıştır. $0,05 \text{ ms}$ aralıklar ile kayıt altına alınan görüntüler ile plaka hızı $620 \pm 58 \text{ m/s}$ olarak belirlenmiştir. Bu plaka hızı ile askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılan PETN, RDX, PBXN-5 ve HNS-IV duyarsız patlayıcıların detonasyonu sağlanmıştır.
- Plaka hızının farklı koşullarda hesaplanabilmesi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Hesaplar MATLAB yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve plaka hızı $667,27 \text{ m/s}$ olarak belirlenmiştir. Hesaplanan sonucun deneysel olarak elde edilen $562-678 \text{ m/s}$ aralığı içinde olması ve en düşük deneysel hız olan 562 m/s 'den yaklaşık %19, en yüksek deneysel hız olan 678 m/s 'den %1,6 sapma ile teorik olarak belirlenebilmesi matematiksel modelin doğruluğunu ortaya koymuştur. Bu yöntem ile Al plaka kalınlığının, uçan plaka malzemesinin, ateşleme öncesi boşluk hacminin ve ivmelendirme kanal uzunluğunun uçan plaka hızına etkisinin incelenmesi amacıyla simülasyon grafikleri elde edilmiştir ve tasarım parametrelerinin sistem performansına etkisi değerlendirilmiştir.

Teze Genel Bakış

- Sonraki bölümde enerjik malzemeler ve patlayıcıların elektriksel ve lazer yöntemleri ile ateşlenmesine yönelik teorik bilgi verilmiştir.
- Üçüncü bölümde, lazer ateşleme sistemine ait lazer güç ünitesi, lazer diyot, mercek sistemi ve lazer ölçüm ekipmanları gibi alt bileşenlerinin teknik özellikleri açıklanmıştır. Optik kayıplara ilişkin ölçümler, lazer ışın dağılımı incelemesi, ışın çapı, süresi ve tetik akım sinyali doğrulaması yöntemi ve sonuçları yer almaktadır.
- Dördüncü bölümde, lazer tetikli uçan plaka sistem tasarımı ile sistem performansına ilişkin gerçekleştirilen test ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir.
- Beşinci bölümde, duyarsız patlayıcı, HMX ve piroteknik bileşen ZPP'nin lazer ile ateşlenmesine yönelik çalışma yöntemi ve sonuçları verilmiştir.
- Altıncı bölümde, ZPP+HMX'in elektriksel ve lazer yöntemleri ile ateşlenmesine ait çalışma yöntemi ve kapalı bomba deney sonuçları yer almaktadır. Her iki yöntemin karşılaştırması yapılmıştır.
- Yedinci bölümde, lazer tetikli uçan plaka sisteminde plaka hızının deneysel ve matematiksel yöntem ile belirlenmesi anlatılmıştır. Duyarsız patlayıcıların şok kaynaklı detonasyonu incelenmiştir. Geliştirilen matematiksel model ile sistem parametrelerinin uçan plaka hızına etkisi değerlendirilmiştir.
- Son bölümde, tez çalışması ile elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Enerjik Malzemeler

Enerjik malzemeler, hem yakıt hem de oksitleyicisini içeren ve enerji salınımı ile kolayca tepkimeye giren kimyasal bileşiklerdir (Joas, Klapötke ve Szimhardt, 2014). Bu enerjik kimyasal bileşikler, yeterli miktarda enerjiye maruz kaldığında, molekül bağlarındaki potansiyel enerjinin açığa çıktığı ekzotermik tepkimeler ile ayrışabilir.

Diğer malzemeler ile kıyaslandığında enerjik malzemelerin en belirgin farkı, enerjilerini çevreye yayma süreleridir. Örneğin; 1 kg petrol, aynı ağırlıktaki TNT (trinitrotoluen) ile kıyaslandığında, petrolün enerjisinin TNT'nin enerjisinden altı kat fazla olmasına rağmen TNT patlaması sırasında açığa çıkan enerjinin hızı, petrolün açığa çıkardığı enerjinin hızına göre yüz milyon kat daha fazladır. Bu sebeple patlayıcıların tahrip gücü, diğer yanıcı malzemelere göre çok daha yüksektir (Proud, 2013).

Enerjik malzemeler; patlayıcılar, yakıtlar ve piroteknikler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Enerjik malzemeleri birbirlerinden ayıran temel fark ekzotermik tepkime hızları, başka bir deyişle moleküler bağlarındaki potansiyel enerjinin açığa çıkma süreleridir. Bu süre enerjik malzemelerin tahrip gücü ile ters orantılıdır.

2.1.1. Patlayıcılar

Patlayıcıların tepkimesi sonucu hızla genişleyen sıcak gaz açığa çıkmakta ve çevreye detonasyon olarak adlandırılan yüksek enerji aktarılmaktadır. Patlayıcılarda katı fazdan gaz faza geçiş nanosaniyeler veya mikrosaniyeler mertebesinde gerçekleşmektedir.

Patlayıcılar detonasyon hassasiyetlerine göre duyarlı patlayıcılar (birincil patlayıcılar) ve duyarsız patlayıcılar (ikincil patlayıcılar) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Duyarlı patlayıcıların, darbe, sürtünme, şok, ısı veya elektrostatik boşalma gibi etkiler karşısında detonasyon hassasiyetleri çok düşüktür. Genel olarak duyarsız patlayıcıların darbe hassasiyeti 4 J, sürtünme hassasiyeti 10 N ve detonasyon hızı 5000 m/s'nin altındadır (Joas, Klapötke, Stierstorfer, 2012). En çok kullanılan duyarlı patlayıcılar kurşun azit ($Pb(N_3)_2$), kurşun stefenat ($PbC_6H(NO_2)_3O_2$), civa fulminat ($Hg(ONC)_2$), diazodinitrofenol (DDNP, $C_6H_2N_4O_5$) ve tetrazendir ($C_2H_8N_{10}O$).

Duyarsız patlayıcıların, duyarlı patlayıcılara kıyasla tahrip gücü (detonasyon hızı) daha yüksek ve detonasyon hassasiyeti daha düşüktür. Bu sebeple duyarsız patlayıcılar duyarlı patlayıcıların ateşlenme yöntemleri ile ateşlenemezler. Duyarsız patlayıcıların darbe hassasiyeti 4 J, sürtünme hassasiyeti 80 N altında olup detonasyon hızı 6500-9000 m/s arasındadır (Joas ve Klapötke, 2014). Askeri ve sivil uygulamalarda sıklıkla kullanılan duyarsız patlayıcılar; dinamit, TNT, RDX, HMS, HNS ve PETN'dir. Çizelge 2.1'de duyarlı ve duyarsız patlayıcıların darbe, sürtünme ve elektrostatik boşalma etkileri karşısında detonasyon eşik değerleri ve detonasyon hızları verilmiştir (Oyler, Mehta, Cheng, 2015).

Çizelge 2.1. Duyarlı ve Duyarsız Patlayıcıların Detonasyon Hassasiyetlerinin Karşılaştırılması

Patlayıcı/Sınıfı	Darbe Hassasiyeti (J)	Sürtünme Hassasiyeti (N)	Elektrostatik Boşalma Hassasiyeti (mJ)	Detonasyon Hızı (m/s)
Kurşun azit/Duyarlı	0,089	< 1	5,0	5500
Kurşun stefenat/Duyarlı	0,025	< 1	0,2	5200
RDX/Duyarsız	7,5	120	> 250	8750

Duyarsız patlayıcıların detonasyonu için çok güçlü bir etki gerekmektedir. Darbe, sürtünme, ısı veya elektrostatik boşalma ile duyarsız patlayıcı detonasyonu mümkün değildir. Duyarsız patlayıcıların detonasyonu, genellikle duyarlı patlayıcıların detonasyonu sonucu açığa çıkan şok dalgaları ile sağlanmaktadır. Duyarsız patlayıcıların detonasyonu için kullanılan bir diğer yöntemde pirotekniklerin veya yakıtların yanması sonucu açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki gazlar ile duyarsız patlayıcı detonasyonu gerçekleşmektedir (Joas, 2014).

2.1.2. Yakıtlar

Kelime anlamı itici güç sağlayan araç olan yakıtlar (ing. propellant) patlayıcılara kıyasla daha az şiddetle tepkimeye girmektedir. Yakıtların çevreye verdikleri enerji genellikle füze veya mermileri hızlandırmak için kullanılmaktadır. Yakıtlarda katı fazdan gaz faza geçiş milisaniyeler veya saniyeler mertebesinde gerçekleşmekte olup yakıtların tepkime hızları 10^{-2} - 10^2 m/s aralığındadır. Bununla birlikte kara barut gibi kimyasallar, belli bir hacim içinde sıkıştırılma veya sınırlandırılma derecesine (ing. degree of confinement) göre patlayıcı veya yakıt olarak kullanılabilen bileşenlerdir. Kara barut sınırlandırma derecesi arttıkça patlayıcı davranışı sergilemekte ve tepkime şiddeti artmaktadır. Amonyum perklorat (AP) ve hidroksil uçlu polibütadien (HTPB) en çok bilinen katı roket yakıtlarıdır.

2.1.3. Piroteknikler

Piroteknikler yunanca kelime olan 'pyr' (ateş) ve 'techne' (sanat) kelimelerinin birleşiminden türetilmiş ve ateş sanatı olarak tanımlanan kimyasal bileşiklerdir. Piroteknikler, milisaniye veya saniye aralığında tepkimeye giren, çevreye orta şiddetli basınç, duman, ses, ışık, ısı açığa çıkaran bileşiklerdir (Davies, 2013). Havai fişekler sivil uygulamalarda kullanılan en çok bilinen piroteknik bileşenlerdendir. Zirkonyum potasyum perklorat, bor potasyum nitrat, zirkonyum ferrik oksit askeri uygulamalarda sıklıkla tercih edilen piroteknik bileşenler arasındadır.

2.2. Patlayıcıların Ateşlenme Mekanizmaları

Patlayıcıların ateşlenmesi, tahrip gücüne göre deflagrasyon veya detonasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Deflagrasyon, ses hızından düşük yanma hızlarında gerçekleşmekte ve yanma sonucu açığa çıkan ısının tepkimeyi patlayıcı boyunca ilerletmesi prensibine dayanmaktadır. Deflagrasyonda tepkime süresi 10^{-3} saniye mertebelerinde olup yanma tepkimesinin patlayıcı boyunca ilerleme hızı, ses dalgalarının su ortamındaki hızı olan 1500 m/s'ye ulaşmaktadır. Deflagrasyon sonucu yaklaşık 10^3 W/cm³'lük enerji açığa çıkmaktadır.

Detonasyon, patlayıcı boyunca ilerleyen yanma tepkimesinin ses hızından daha yüksek hızlara ulaştığı, bu sebeple yüksek miktarda enerjinin açığa çıktığı yanma olayıdır. Detonasyonda tepkime, patlayıcı boyunca şok dalgaları ile ilerlemekte ve tepkime hızı

10^{-6} saniye mertebelerinde 9000 m/s 'ye ulaşmaktadır. Patlayıcının detonasyonu sonucu yüksek basınçta ve hızda şok dalgaları ile beraber 10^9 W/cm^3 'lük enerji açığa çıkmaktadır (Brown ve Collins, 1976; Weinheimer, 2002; Harkoma, 2010). Çizelge 2.2'de yanma, deflagrasyon ve detonasyon proseslerinin karşılaştırılmasına, Şekil 2.1'de patlayıcı detonasyonu sonucu açığa çıkan ve ses hızından daha yüksek hızlarda ortama yayılan şok dalgalarının fotoğraflarına yer verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yanma, Deflagrasyon ve Detonasyon Özelliklerinin Karşılaştırılması

	YANMA (Kıta Yakıtlar ve Piroteknikler)	DEFLAGRASYON (Patlayıcı)	DETONASYON (Patlayıcı)
Tepkime İlerleme Hızı (m/s)	10^{-5}	$1,0 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^3$	$2 \times 10^3 - 9 \times 10^9$
Tepkime Süresi (s)	10^{-1}	10^{-3}	10^{-6}
Tepkime Isısı (kJ/kg)	10^4	10^3	10^3
Güç (W/cm³)	10	10^3	10^9
Tepkime Basıncı (bar)	0 – 7	$7 - 7 \times 10^3$	$70 - 7 \times 10^5$
Ateşlenme Mekanizması	Isı	Sıcak partiküller ve gazlar, ısı bölgeler	Şok dalgaları, yüksek sıcaklık bölgeleri



(a)



(b)

Şekil 2.1. Detonasyon sonucu açığa çıkan şok dalgası görüntüleri, (a) Rusya tarafından geliştirilen termobarik bomba test atışlarından elde edilen fotoğraf (Crimea, Russia September 9, 2016 A thermobaric bomb explosion during the Caucasus 2016 strategic drill), (b) Kanada Savunma Sanayi araştırma geliştirme faaliyetleri sırasında çekilen fotoğraf (DRDC's experimental proving ground supports CAF, allied readiness)

Patlayıcıların detonasyonu, deflagrasyondan detonasyona geçiş (ing. **Deflagration-to-Detonation Transition**), kısaca DDT veya şoktan detonasyona geçiş (ing. **Shock-to-Detonation Transition**), kısaca SDT olmak üzere iki farklı mekanizma ile gerçekleşmektedir. DDT mekanizması, deflagrasyon hızının yüksek olduğu durumlarda patlayıcı üzerinde bölgesel olarak yüksek basınç ve ısı birikmesiyle patlayıcı detonasyon eşik değerine ulaşılması ve ateşlenme mekanizmasının deflagrasyondan detonasyona geçişi ile gerçekleşmektedir. Patlayıcıların detonasyon eşik değeri, patlayıcının ateşlenme hassasiyeti, patlayıcı uzunluğu, patlayıcı miktarı ve yoğunluğu ile porozite gibi patlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. DDT mekanizmasını açıklayan farklı teoriler geliştirilmiş olmakla birlikte, bu teoriler genel olarak patlayıcıda sırasıyla:

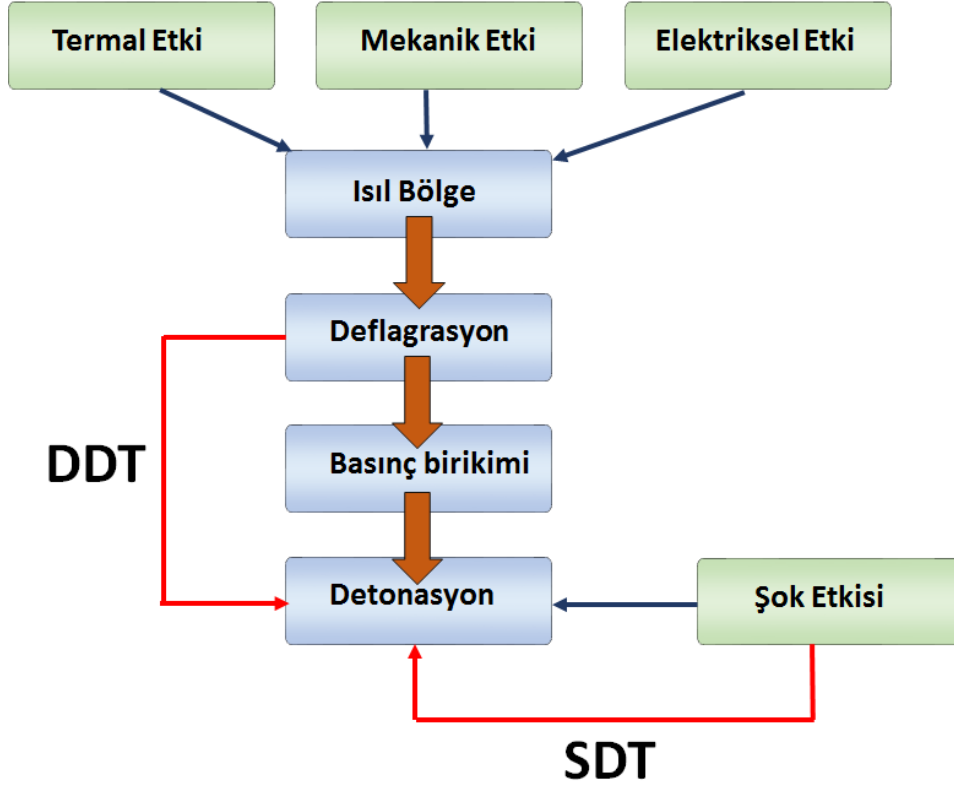
- i. Deflagrasyon,
- ii. Konvektif ısı birikimi ile yanma,
- iii. Düşük hızda geçiş detonasyonu (1000-2500 m/s),
- iv. Yatışkın durum detonasyonu

olaylarının gerçekleştiğini savunmaktadır (Baer ve Nunziato, 1986; Pawluczyk, 1995).

DDT mekanizmasında, patlayıcıyı molekülleri arası ısı iletimi sonrası yanma ile konvektif ısı aktarımı sonucu patlayıcı deflagrasyonu gerçekleşmektedir. Deflagrasyon ile açığa çıkan enerjinin yeterli olması durumunda patlayıcıda bölgesel olarak yüksek basınç altında biriken etkilerin dalga formunda ortaya çıkması sonucu patlama mekanizması deflagrasyondan detonasyona geçmektedir.

SDT, patlayıcı detonasyonunun şok etkisi ile doğrudan başlaması prensibine dayanmaktadır. SDT rejiminde detonasyon, şok dalgalarının patlayıcı boyunca ilerlemesi sonucu gerçekleşmektedir. DDT mekanizmasında patlayıcının deflagrasyon rejiminden detonasyona geçişi milisaniyeler mertebesinde gerçekleşirken, SDT rejiminde patlayıcının şok etkisi ile detonasyonu mikrosaniyeler mertebesinde gerçekleşmektedir.

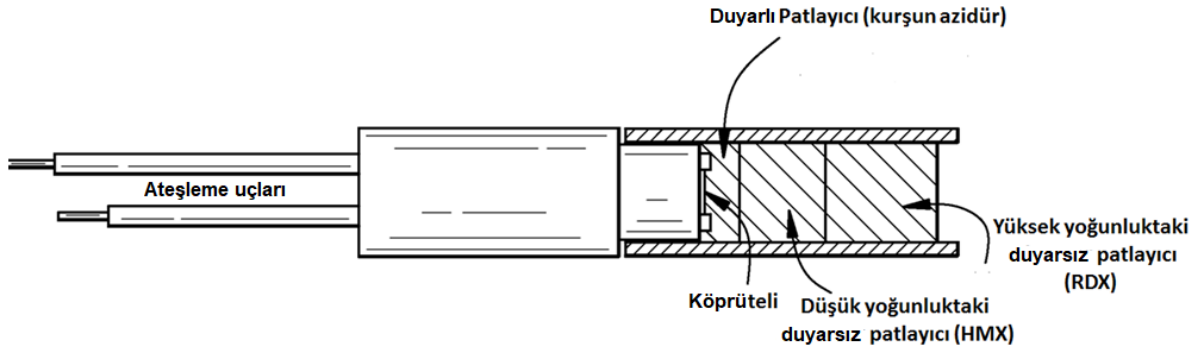
DDT rejiminde, detonasyonun gerçekleşebilmesi için patlayıcının yerleştirildiği haznede sıkıştırılmış bir yapıda bulunması ve tepkime hızının ses hızından düşük deflagrasyon rejiminden, ses hızından yüksek detonasyon rejimine geçebilmesi için patlayıcının belli bir uzunlukta olması gerekmektedir (Assay, 1992; Harkoma, 2010). SDT rejiminde ise şok etkisi ile patlayıcıda detonasyon başladığı için patlayıcının gövde içindeki yapısının veya patlayıcı uzunluğunun detonasyona herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 2.2'de DDT ve SDT oluşum mekanizmalarının şematik gösterimi verilmiştir (Bourne, 2013).



Şekil 2.2. DDT ve SDT mekanizmalarının şematik gösterimi

2.3. Elektriksel Yöntemler ile Patlayıcı Detonasyonu

Duyarlı patlayıcıların düşük detonasyon hassasiyetleri nedeniyle taşıma ve depolama emniyetleri çok düşüktür. Askeri mühimmatlarda bütünleme sırasında kaçak akımlar veya elektromanyetik girişimler ile duyarlı patlayıcıların istem dışı detonasyon riski bulunmaktadır. Bu sebeplerle duyarlı patlayıcılar, sistem güvenliğinin ön planda olduğu askeri veya ticari uygulamalarda detonasyon eldesi için tercih edilmemektedir. Bunun yerine askeri mühimmatlarda düşük miktarda duyarlı patlayıcı, duyarsız patlayıcının detonasyonu için ateşleyici olarak kullanılmaktadır. Ateşleme zinciri olarak adlandırılan bu uygulamada, elektriksel akım ile duyarlı patlayıcının deflagrasyonu ve daha sonra detonasyonu gerçekleştirilmektedir. Duyarlı patlayıcının detonasyonu ile açığa çıkan şok dalgaları ve yüksek basınç, duyarlı patlayıcı ile temas halinde bulunan düşük yoğunluktaki duyarsız patlayıcının detonasyonunu sağlamaktadır. Ateşleme zincirinin son halkasında düşük yoğunluktaki duyarsız patlayıcının detonasyonu sonucu açığa çıkan enerji, yüksek yoğunluktaki duyarsız patlayıcının detonasyonunu gerçekleştirmektedir. Şekil 2.3'te elektriksel yöntemler ile ateşlenen duyarsız patlayıcının detonasyonu ile duyarlı patlayıcıların detonasyonunu sağlayan sistemin şematik gösterimi verilmiştir (Spring, 2012).



Şekil 2.3. Ateşleme zincirinin şematik gösterimi (Spring, 2012)

Günümüzde detonatör sistemlerinde, ateşleme zinciri ile DDT mekanizmasına dayanan elektriksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu konvansiyonel yöntemler, elektriksel olarak iletken köprütelinin üzerinden akım geçirilmesi sonucu köprütelinin Joule etkisi ile ısınması ve bu ısının termal ısı iletimi mekanizmasıyla köprüteli ile temas halinde olan duyarlı patlayıcı yüzeyine iletilmesi prensibi ile gerçekleşmektedir.

Elektriksel yöntemlere dayanan detonatör sistemlerindeki en temel kısıtlama, duyarlı patlayıcının ateşleme mekanizmasını oluşturan olan köprüteline doğrudan temaslı olması sebebiyle sistemin elektromanyetik girişimlere, elektrostatik boşalmalara ve kaçak akımlara karşı olan hassasiyetidir. Patlayıcının elektromanyetik alan, radyo frekansı, elektromanyetik titreşim, elektrostatik boşalma veya operatör kaynaklı kontrol edilemeyen kaçak akımlar ile istem dışı ateşlenme olasılığı bulunmaktadır. Detonatör sisteminin kaçak akımlara karşı ateşlenme güvenliğini artırmak için detonatör sistemini oluşturan bileşenler bu tarz etkilerden elektriksel yalıtım yolu ile kısmen uzaklaştırılmakla birlikte, yalıtım hiçbir zaman tam anlamıyla etkin olmamakta ve bileşenlerin maliyetini arttırmaktadır. Elektriksel girişimlere ek olarak duyarlı patlayıcıların darbe, sürtünme ve ısı hassasiyetleri nedeni ile istem dışı detonasyon olasılığı, duyarlı patlayıcıları içeren detonatör sistemlerinin ateşlenme güvenilirliğini oldukça düşürmektedir.

Bu kısıtlamaların önüne geçmek ve detonasyon sisteminin taşıma, saklama ve uygulama sırasında ateşlenme güvenliğini artırmak amacıyla duyarlı patlayıcıları ateşleme zincirinden çıkararak duyarsız patlayıcıların doğrudan ateşlenmesine yönelik tasarım geliştirme faaliyetleri başlatılmıştır. Duyarsız patlayıcıların detonasyon eşik değerlerinin çok yüksek olması nedeniyle duyarlı patlayıcıların detonasyonunu sağlayan sistemler ile ateşlenmeleri mümkün değildir. Duyarsız patlayıcıların detonasyonu için patlayan folyo

ateşleyici (EFI-exploding foil initiator) ve patlayan köprütelı ateşleyici (EBW-exploding bridge wire detonator) sistemleri geliştirilmiştir (Johnston, 1962; Held, 1996; Varesh, 1996; Hennings ve ark., 2002).

EFI ateşleme sisteminde, bakır bir malzemenin elektrikle ısıtılıp kapalı bir ortamda buharlaşarak çok yüksek basınç oluşması sağlanmaktadır. Bu basınç ile sistemde bulunan yalıtkan folyo koparak, km/s mertebesinde bir hızla, yüksek yoğunluktaki duyarsız patlayıcıya çarpmaktadır. Çarpma etkisi ile duyarsız patlayıcının detonasyonu gerçekleşmektedir. EBW ateşleme sisteminde ise köprütelı ile düşük yoğunluktaki duyarsız patlayıcı temas halindedir. Üzerinden akım geçirilen köprütelı ısınarak yüksek sıcaklıkta duyarsız patlayıcı üzerine fırlamakta ve patlayıcı deflagrasyonunu izleyen detonasyon gerçekleşmektedir. EFI sisteminde detonasyon SDT rejimi ile sağlanırken EBW sisteminde DDT rejimi ile gerçekleşmektedir. EFI ve EBW sistemleri sadece duyarsız patlayıcıyı içerdiği için duyarlı patlayıcıların kullanıldığı elektrikselse detonatör sistemlerine kıyasla daha emniyetlidir.

EFI ve EBW sistemlerinde uygulanabilirlik açısından bazı kısıtlamalar mevcuttur. EFI sistemi birçok tasarım parametresine sahip olması nedeni ile üretimi zordur. EFI sistemini oluşturan bileşenlerin çok düşük toleranslarda üretilmesi gerekliliği maliyet ve zaman açısından değerlendirildiğinde sistemde birçok dezavantajı beraberinde getirmektedir. EBW sisteminde ise ancak düşük yoğunluktaki duyarsız patlayıcıların detonasyonu gerçekleşebilmekte, yüksek yoğunluktaki veya HNS gibi detonasyon hassasiyeti çok yüksek olan patlayıcıların detonasyonu için sistem yetersiz kalmaktadır (Bowden, 2014). EFI ve EBW sistemlerinin tetiklenme mekanizmaları elektrikselse yöntemlere dayandığından konvensiyonel elektrikselse detonatör sistemlerinin kısıtlamaları her iki sistem için geçerlidir.

2.4. Lazer ile Patlayıcı Detonasyonu

Elektrikselse detonatör sistemlerinden kaynaklanan kısıtlamaları engellemek amacıyla lazer detonatör sistemleri geliştirilmiştir. Lazer detonatör sistemlerinde, patlayıcının deflagrasyon veya detonasyonunun elektrik akımı yerine optik yöntemle aktive olması, söz konusu sistemleri elektrikselse boşalma ve elektromanyetik girişimlere karşı duyarsız hale getirmektedir. Hızlı aktive olmaları ve dış uyarılardan bağımsızlık gibi özellikleri bakımından değerlendirildiğinde, lazer detonatör sistemlerinin elektrikselse detonatör sistemlerine göre üstünlüğü bulunmaktadır.

Lazer üretimi için bir güç kaynağı, enerji iletimi için fiber optik bir kablo ve enerjik bir malzemedan oluşan lazer ateşleme sistemleri, elektriksel ateşleme sistemleri ile aynı boyutlara sahiptir. Tek fark elektrik bağlantısının fiber optik kabloyu kabul edecek şekilde yeniden tasarlanması gerekliliğidir. Elektrikli sistemlerde kullanılan köprüteli ile seramik başlık, optik sistemlerde cam/metal ara yüzeyine yapıştırılmış ve ateşleme basıncına dayanıklı bir pencere ile yer değiştirmiştir. Köprütelinin sistemden çıkarılması ile elektrikle ateşleme ekipmanları kapsamında başlık üretimi, pim-başlık sızdırmazlığı testi, köprüteli kaynak ve direnç testi, gövde-köprüteli yalıtkanlık testi, elektrostatik boşalma testi, 1 W/1 A ateşlenmeme testi gibi işlemlerin %80'i elimine edilmektedir (Merson ve ark., 1994).

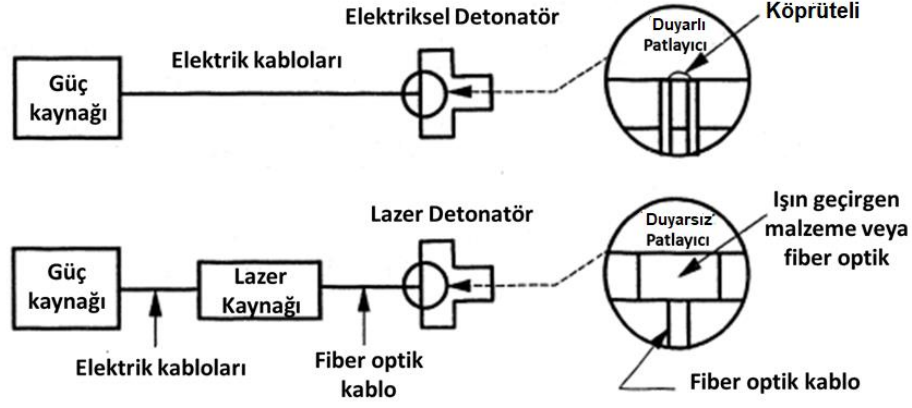
Lazer detonatör sistemleri, lazer kaynağını aktive edecek bir güç kaynağı, lazer ışın kaynağı, tasarım tercihine bağlı olarak lazer ışınını odaklayıcı optik lens veya lazer kaynağından yayılan ışını patlayıcının bulunduğu düzeneğe iletecek bir fiber optik kablo ile patlayıcının yerleştirildiği düzenekten oluşmaktadır.

Lazer detonatör sistemlerinde lazerden yayılan ışının patlayıcı üzerine iletimini sağlayan optik fiberler yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklıdır ve kaçak elektromanyetik alan ve kaçak akımlara karşı yalıtkanlıdır. Patlayıcının dış ortamdan tamamen izolasyonu sağlanabildiği için elektrikli detonatörlere göre daha güvenlidir.

Elektrikli ve lazer detonatör sistemlerinin tasarımlarının karşılaştırması şematik olarak Şekil 2.4'te (Merson ve Salas, 1994) görülmektedir. Lazer detonatör sistemlerinin elektrikli sistemlere kıyasla avantajları aşağıda listelenmiştir (Yong ve ark., 2015). Lazer detonatör sistemlerinin:

- Elektromanyetik alanlardan, elektrostatik boşalmadan ve kaçak elektrik akımından kaynaklanan istem dışı detonasyonları söz konusu değildir.
- Kalite kontrolü sistem güvenliğini etkilemeden yapılabilmektedir.
- Ekipmanları herhangi bir elektrik akımından bağımsız olduğundan güvenlik ve teçhizat sistemleri tamamen elektronik aksamdan oluşabilmektedir.
- Lazer çıkış enerjisi, gücü ve süresinin değiştirilmesi ile elektrikli detonatör sistemlerine göre daha esnek tasarım imkanları elde edilebilmektedir.
- Tek kullanımlık elektriksel detonatör sistemlerine kıyasla çoklu ateşleme imkanı bulunmaktadır.

- Üretim ve test maliyeti, elektriksel detonatörlere kıyasla daha az güvenlik önlemleri içerdiğinden, daha düşüktür.
- Lazer detonatörlerin alt bileşen sayısı, elektriksel detonatörlere kıyasla daha az olduğundan, ateşlenme güvenilirlikleri daha yüksektir.



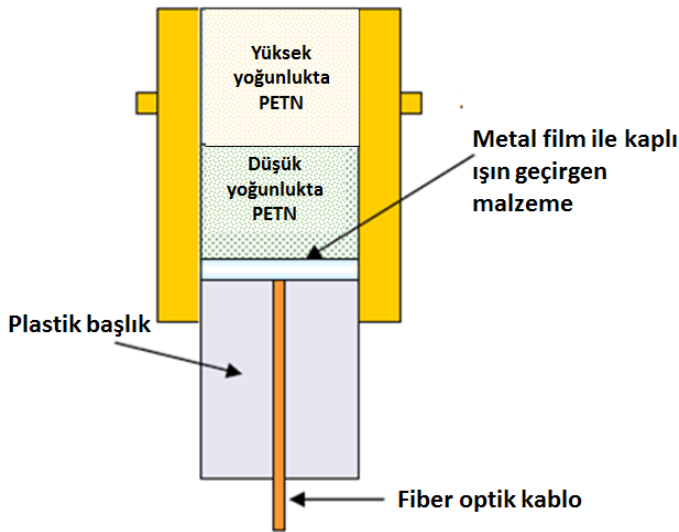
Şekil 2.4. Elektriksel ve lazer detonatör sistemlerinin şematik karşılaştırması (Merson ve Salas, 1994)

Lazer detonatör sistemlerinin kullanımı ilk olarak 1960'lı yıllarda, lazer ışın enerjisi kullanılarak duyarlı patlayıcıların doğrudan ateşlenmesi ile başlamıştır. Bu çalışmalarda lazer ışınının oluşturduğu yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle ısı hassasiyeti yüksek olan duyarlı patlayıcı yüzeyinde yüksek sıcaklıkta ısıl bölgeler meydana getirilmiştir. Bunu izleyen çalışmalarda lazer ışınına doğrudan maruz kalan duyarlı patlayıcıların detonasyonu ve duyarlı patlayıcı ile temas halinde olan duyarsız patlayıcıların detonasyonu sağlanmıştır. Brish ve ark. (1969) duyarlı patlayıcı olarak seçtikleri kurşun azidür üzerine $0,8 \text{ GW/cm}^2$ güçte lazer ışını göndermiş ve duyarlı patlayıcı detonasyonu ile duyarsız patlayıcı olan PETN detonasyonunu sağlamışlardır. Çalışmalarında PETN detonasyon hızının 5500 m/s 'ye ulaştığını bildirmişlerdir (Brish ve ark., 1966; Brish ve Galeev, 1969).

Lazer sistemlerindeki hızlı gelişmeler, daha yüksek enerji yoğunluğunda ve kısa sürede lazer ışını yayabilen lazer ışın kaynaklarının üretilmesine imkân vermiştir. Bunun sonucu olarak duyarlı patlayıcılar lazer ateşleme zincirinden çıkarılarak duyarsız patlayıcıların lazer ışını ile detonasyon çalışmaları başlatılmıştır. Bykhalo ve ark. (1986), 10^3 GW/cm^2 güçteki lazer ile PETN detonasyonunu gerçekleştirmiş ve PETN detonasyonu sırasında PETN yüzeyinde 500 GPa basınç oluştuğunu matematiksel olarak hesaplamışlardır

(Bykhalo ve ark., 1986). Benzer çalışmalar lazer güç yoğunluğunun $0,1-1 \text{ GW/cm}^2$ olduğu aralıkta RDX ve HMX duyarsız patlayıcıları için gerçekleştirilmiştir (Yang ve Menichelli, 1972; Paisley, 1989); ancak detonasyon hassasiyeti çok düşük olan HNS patlayıcısının detonasyonu 10 GW/cm^2 güçteki lazer ışını ile elde edilememiştir (Renlund ve ark., 1989; Sketchell ve Trot, 1995).

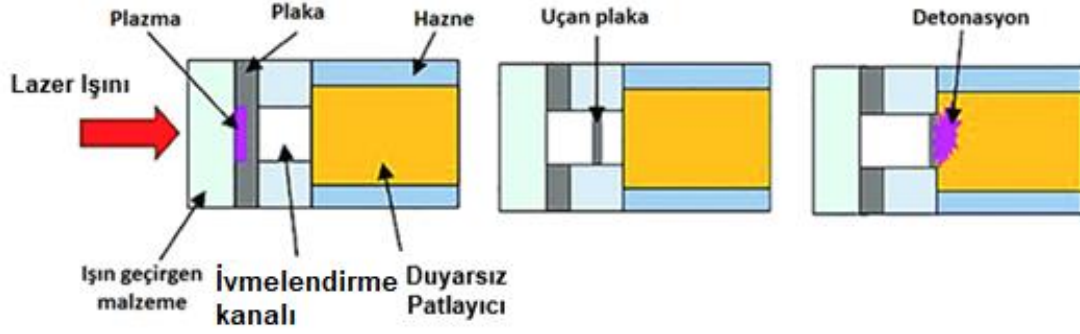
Duyarsız patlayıcıların lazer ışınına doğrudan maruz bırakılarak DDT mekanizması ile detonasyonları ancak çok yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışın kaynakları ile gerçekleşmektedir. HNS gibi detonasyon hassasiyeti çok yüksek olan duyarsız patlayıcıların detonasyonu için bu yöntem yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, lazer ışını-duyarsız patlayıcı arayüzüne metal bir tabaka yerleştirilerek duyarsız patlayıcı detonasyon çalışmaları yapılmıştır. Şekil 2.5'te şematik görünüşü verilen lazer EBW (ing. laser exploding bridgewire) olarak adlandırılan bu teknikte (Kennedy, 2006) lazer ışınının metal tabaka yüzeyine gönderilmesi ile tabaka yüzeyinde ani ısı birikmesi sonucu metal tabakanın yırtılarak veya patlayarak tabaka ile temas halinde bulunan duyarsız patlayıcıya çarpması sağlanmaktadır. Çarpma etkisi ile duyarsız patlayıcı yüzeyinde deflagrasyon gerçekleşmekte, deflagrasyonun ilerlemesi ile patlayıcının detonasyonu sağlanmaktadır. Bu yöntem ile yapılan çalışmalarda $0,5-1 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlıklarda alüminyum film üzerine, $1-10 \text{ GW/cm}^2$ güçte lazer ışını gönderilmiştir. RDX, HMX ve HNS duyarsız patlayıcıları ile temas halinde bulunan alüminyum tabakanın patlaması sonucu DDT mekanizması ile patlayıcının detonasyonu başarılmıştır (Paisley, 1989; Renlund ve ark., 1989; Akinci ve ark., 2005; Kennedy, 2006).



Şekil 2.5. Lazer EBW detonator sistemi (Kennedy, 2006)

Lazer ışının doğrudan duyarsız patlayıcı yüzeyine gönderilmesi veya arayüze yerleştirilen metal film tabakasının lazer ışınına maruz bırakılarak duyarsız patlayıcının darbe etkisi ile detonasyonu, DDT mekanizmasına dayanmaktadır. Başka bir deyişle her iki yöntemde de patlayıcıda ilk olarak deflagrasyon meydana gelmekte, patlayıcı yüzeyinde yüksek basınçta ve sıcaklıkta ısıl bölgelerin birikimi sonucu patlayıcı deflagrasyonundan detonasyonuna geçiş gerçekleşmektedir. Patlayıcı hacminin bir bölümü deflagrasyon sonucu harcanmakta ve kalan patlayıcı hacminde detonasyona ulaşılmaktadır. Sonuç olarak bu sistemler ile patlayıcının tamamının detonasyona ulaşması sonucu açığa çıkacak enerjiye ve tahrip gücüne erişilememektedir. Bu sistemler ile sadece düşük yoğunluktaki duyarsız patlayıcıların DDT mekanizması ile detonasyonu sağlanabilmektedir. Yüksek yoğunlukta ve detonasyon hassasiyetleri çok yüksek olan duyarsız patlayıcıların detonasyonu için bu sistemler yetersiz kalmaktadır.

Duyarsız patlayıcıların lazer ile detonasyon çalışmalarından elde edilen tecrübeler ile lazer şok detonatör sistemleri geliştirilmiştir. Lazer tetikli uçan plaka (ing. laser driven flyer plate) detonatör olarak adlandırılan teknoloji sayesinde duyarsız patlayıcının SDT mekanizması ile detonasyonu gerçekleştirilmiştir. Duyarsız bir patlayıcının şok kaynaklı detonasyonuna dayalı sistem şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Lazer tetikli uçan plaka detonatörde, lazer ışını gönderilerek metal plaka yüzeyinde yüksek sıcaklık bölgesi oluşturulmaktadır. Plaka yüzeyinin nanosaniyeler mertebesinde yüksek sıcaklıklara ulaşması ile plaka yüzeyinde başlayan ergime olayları sonucu ortamda GPa mertebesinde plazma basıncı oluşmaktadır. Plazma basıncı, plaka yüzeyinin lazer ışınına maruz kalmayan ve ergime olmayan kısmına yüksek basınç uygulamakta ve böylelikle bu bölge yüzeyden kopmaktadır. Plakadan kopan parça ivmelendirme kanalında ivmelenerek çok yüksek hızlarda duyarsız patlayıcı yüzeyine çarpmaktadır. Duyarsız patlayıcı yüzeyinde oluşan etki, patlayıcı çarpma bölgesinde GPa basınç mertebelerinde şok yaratmakta ve patlayıcının detonasyonunu sağlamaktadır.



Şekil 2.6. Lazer tetikli uçan plaka detonatör (Shen ve ark., 2017)

Paisley, Nd:YAG lazer ile 300 mJ enerjideki lazer ışını, 10 ns darbe (pulse) süresince, 2-10 μm kalınlıkta alüminyum ve bakır plaka yüzeyine göndermiştir. Çalışmada, plaka yüzeyinden kopan parçaların 5 km/s hıza ulaşarak duyarsız patlayıcı HNS yüzeyinde 1 ns süre ile 8 GPa şok etkisi oluşturduğu ve HNS detonasyonunun gerçekleştiği belirtilmiştir (Paisley, 1989). Watson ve Field, plaka yüzeyinden kopan parçanın kalınlığını belirlemeye yönelik geliştirdikleri analiz yöntemi ile lazer ışın enerjisine karşılık, plaka yüzeyinden kopan parça kalınlıklarını incelemiştir (Watson ve Field, 2000). He ve ark., 280 GW/cm^2 gücüne sahip bir lazer ışını, 10 μm kalınlığında bir alüminyum plaka üzerine göndererek, kopan plaka hızınının 9 km/s'ye ulaşmasını sağlamıştır (He ve ark., 2001).

3. LAZER ATEŞLEME SİSTEMİ KURULUMU ve KARAKTERİZASYONU

3.1. Kurulum

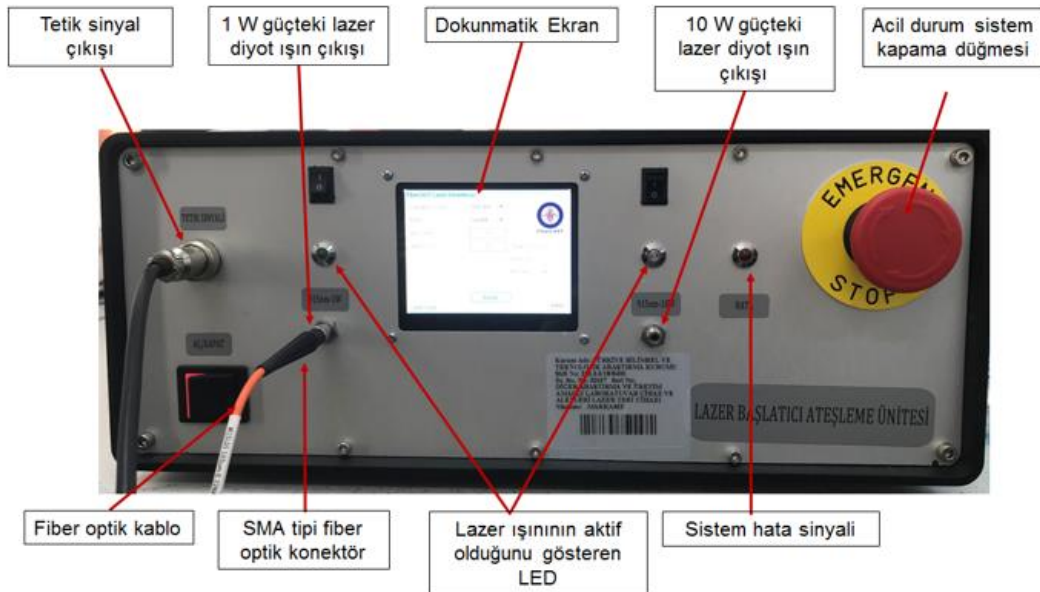
Enerjik malzemelerin lazer ile ateşleme gereksinimlerine göre tasarlanan ve üretilen lazer ateşleme sistemi, lazer güç ünitesi ve mercek sisteminden oluşmaktadır.

3.1.1. Lazer Güç Ünitesi

Lazer güç ünitesini oluşturan alt bileşenler:

- Tetik sinyali,
- Dokunmatik ekran,
- Lazer diyotlardır.

Şekil 3.1'deki lazer güç ünitesi 364 x 333 x 146 mm boyutlarındadır. Taşınabilir, hafif ve darbelere karşı dayanıklıdır. Ünite içinde yer alan fan sistemi ile kendiliğinden soğutulmalıdır ve 220±10 Volt AC ile çalışmaktadır.



Şekil 3.1. Tasarlanan ve üretilen lazer güç ünitesi

3.1.1.1.Tetik Sinyali

Lazer ışınının enerjik malzeme yüzeyine gönderilmesi ile enerjik malzemenin ateşlenmeye başlaması arasında geçen süre enerjik malzemelerin ateşlenme gecikmesi olarak tanımlanmaktadır. Enerjik malzemelerin ateşlenme gecikmesi, sistem performansını belirleyen başlıca parametrelerden biridir. Bu süre genel olarak piroteknik malzemeler için milisaniye, patlayıcı malzemeler için ise mikrosaniye mertebelerindedir. Deneysel çalışmalarda, ateşlenme gecikmesinin belirlenebilmesi için ilk olarak lazer ışınıyla tetikleminin ne kadar geciktiğinin belirlenmesi gerekmektedir

Lazer ışınıyla tetiklemede gecikme, lazer güç ünitesi dokunmatik ekranında yer alan lazer ışını gönderme komutu ile lazer ışınının sistemden çıkışı arasında geçen süredir. Ünite, ışın tetikleme gecikmesinin belirlenmesi için, ünitenin hızlı kamera, veri toplama ve benzeri sistemler ile entegre çalışabilmesini sağlayan tetik sinyal çıkışı bulunmaktadır. Tetik sinyali dijital ekran üzerinde bulunan lazer ışını gönderme komutu ile eş zamanlı olarak 3,5 Volt tetik sinyali üretmektedir. Ünite tetik sinyal bağlantı kablo arayüzü BNC'dir.

3.1.1.2. Dokunmatik Ekran

Ünitenin dijital ekranı dokunmatiktir. Ekran toza ve suya karşı korumalıdır. Şekil 3.2'de görülen ekranda ünite içinde yer alan lazer diyotların ışın çıkış modu, ışın gücü ve süresi kullanıcı tarafından manuel olarak ayarlanabilmektedir.

Ekrandan, üniteye yer alan 1 W ve 10 W güçlerindeki iki lazer diyottan aktif olması istenilen diyot seçilebilmektedir. Lazer ışını sürekli mod veya darbeli modda üretilmektedir. Sürekli modda lazer ışını ekrana girilen sürede ve güçte tek darbeye ışın üretmektedir. Darbeli modda lazer ışını; ekrana girilen sürede, güçte ve sayıda, birden fazla ışın atımı yapmaktadır. Ekranda yer alan "darbe frekansı (Hz)" ve "darbe genişliği (ms)" ile sırasıyla ışın atım sayısı ve her ışın atımı arasındaki bekleme süresi kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Tez kapsamında, sürekli modda başka bir ifadeyle tek darbeye lazer ışın atımı ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu nedenle darbeli mod ışın üretme komutu için ekran görüntüsüne yer verilmemiştir.

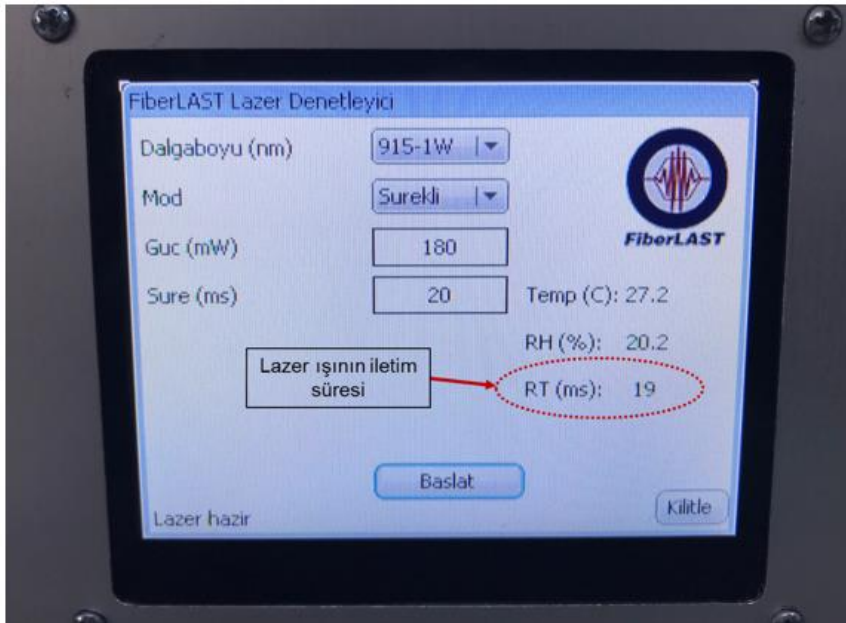
Şekil 3.2’de görüntüsü verilen ekrandan lazer ışın gücü ve süresi ayarlanmaktadır. 1 W güçte ışın üreten lazer diyot ile aşağıdaki aralıklarda ışın üretilmektedir:

- 0,050 - 1 W güçte (adım aralığı: 1 mW) ve
- 1 ms – 5 dakika sürede (adım aralığı: 1 ms)

10 W güçte ışın üreten lazer diyot ile aşağıdaki aralıklarda ışın üretilmektedir:

- 0,050 - 10 W güçte (adım aralığı: 50 mW) ve
- 1 ms – 5 dakika sürede (adım aralığı: 1 ms)

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

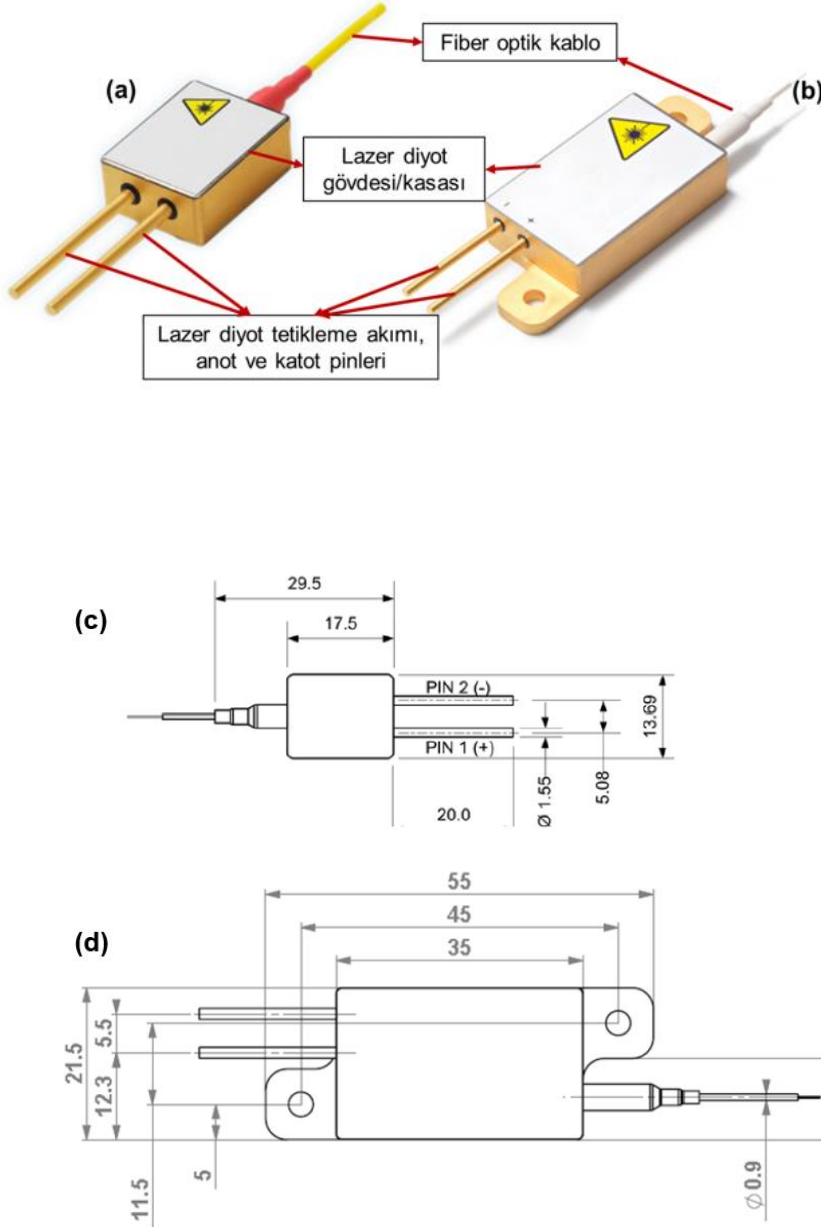


Şekil 3.2. Lazer güç ünitesi ekranı ve sürekli modda ışın üretme komutunun uygulaması

3.1.1.3.Lazer Diyotlar

Lazer ateşleme sisteminde, 1 W ile 10 W gücünde ve 915 nm dalgaboyunda lazer ışını üreten iki adet lazer diyot bulunmaktadır. Bu lazer diyotlar ve diyot sürücüleri/kartları, Bölüm 3.1.1’de açıklanan lazer güç ünitesinin içinde yer almaktadır.

Şekil 3.3'te yer alan 1 W gücündeki lazer diyot (BMU9/10A-915-01/02-R, II-VI Laser Enterprise, İsviçre) 1,9 Volt, 10 W gücündeki lazer diyot (BMU30-915-01-R/R02, II-VI Laser Enterprise, İsviçre) 5,2 Volt gerilimde çalışmaktadır. Lazer diyotların depolama sıcaklığı $-45-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve çalışma sıcaklığı $15-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Lazer diyotların 500 Volt gerilim (100 pikofarad kapasitör) ile yüklenen, 1,5 k Ω dirence sahip devreye seri bağlandığı durumda elektrostatik boşalma koruması bulunmaktadır.

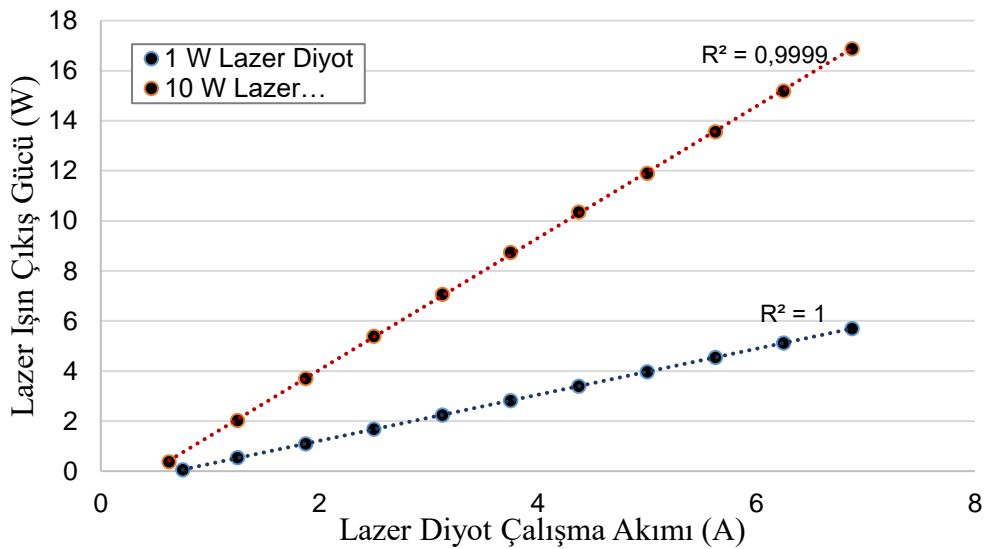


Şekil 3.3. (a) 1 W ve (b) 10 W gücünde ışın üreten fiber optik kablo ile eşleştirilmiş lazer diyot ve (c) 1 W ve (d) 10 W cihazların boyutsal özellikleri. Ölçüler mm'dir.

Lazer diyotlarda ışın üretimi, diyodun elektriksel olarak aktive olması ile başlamaktadır. Diyotun anot ve katot pinleri arasındaki devreden geçen akım miktarı ve akım süresi, üretilen lazer ışın gücünü ve süresini belirlemektedir. Lazer ateşleme sistemi üretici firması tarafından verilen bilgiye göre (Fiberlast A.Ş.) Çizelge 3.1’de ve Şekil 3.4’te görüldüğü üzere lazer diyoda verilen akım ile diyotta üretilen ışın gücü doğrusal olarak değişmektedir.

Çizelge 3.1. 1 W ve 10 W Lazer diyotta çalışma akımı ile ışın gücü değişimi (Fiberlast A.Ş.)

Lazer Diyot (1W)		Lazer Diyot (10W)	
Çalışma Akımı (A)	Işın Çıkış Gücü (W)	Çalışma Akımı (A)	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

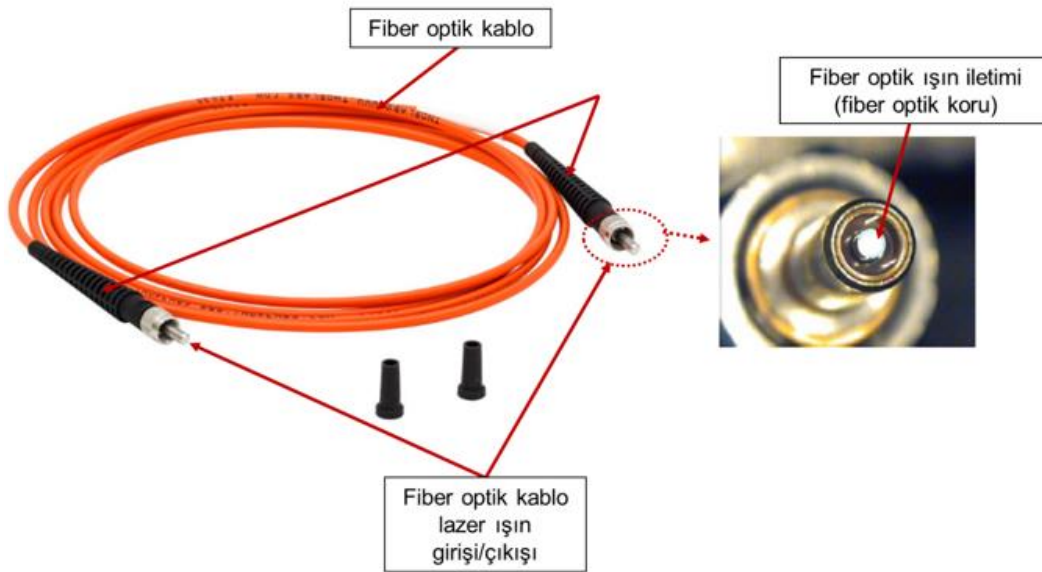


Şekil 3.4. Lazer diyot çalışma akımına karşılık ışın çıkış gücü

Lazer ışın süresi lazer diyoda verilen akım süresine eşdeğerdir. Güç ünitesi ekranına kullanıcı tarafından girilen ışın gücü ve süresi ile diyot sürücülerine gönderilen akım miktarı ve akım süresi elektronik kontrol ünitesi tarafından ayarlanmakta ve ışın üretilmektedir.

Güç ünitesinde yer alan lazer diyotlar, fiber optik kablo ile eşleştirilmiş şekilde üretilmiştir. Diyotlarda üretilen ışın, fiber optik kablo ile güç ünitesinin çıkışına iletilmektedir. Fiber optik kabloların kor çapı 105 μm , kaplama çapı 125 μm ve tampon çapı 250 μm 'dur. Optik kabloda kor içine düşen ışın demeti sapmasını tanımlamak için kullanılan sayısal açıklık değeri (ing. numerical aperture, NA) 0,15'tir.

Güç ünitesi çıkışında lazer ışın demetini fiber optik kablonun koruna iletmek için kullanılan ve içinde ışın demetini odaklayan merceği bulunan SMA tipi bağlantı ile eşleştirilmiş fiber optik kablo (M14L05, Thorlabs Inc., ABD) bulunmaktadır (Şekil 3.5). Kablonun kor çapı 50 μm , kaplama çapı 125 μm , sayısal açıklık değeri 0,22'dir. Kablo 400 – 2400 nm dalgaboyu aralığında ışını iletebilecek özelliindedir.



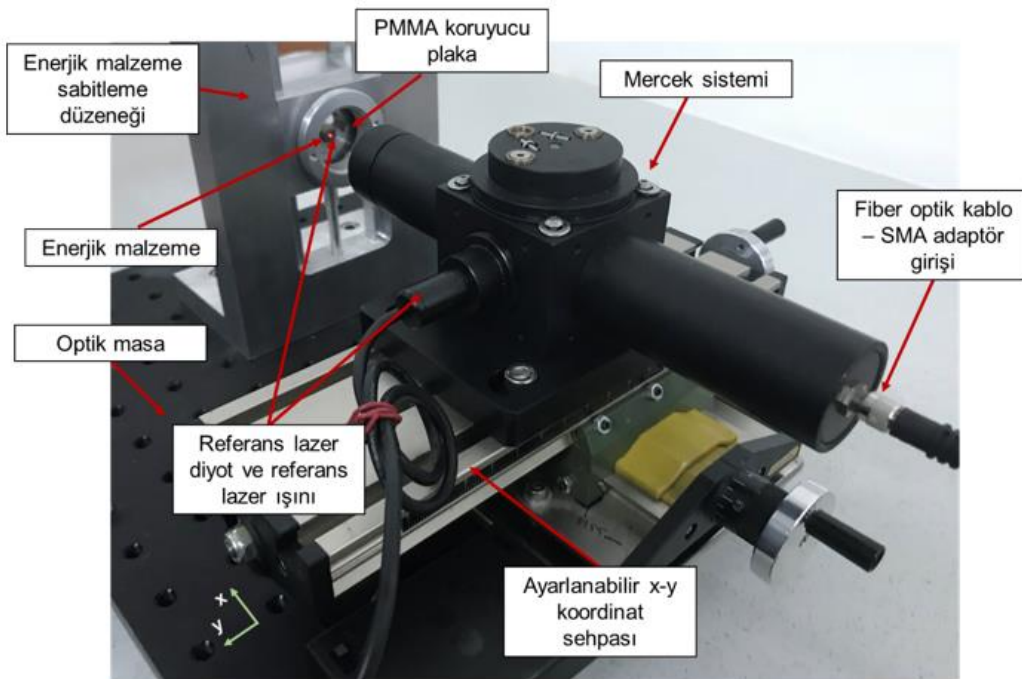
Şekil 3.5. SMA tipi optik bağlantı ve fiber optik kablo

Güç ünitesi çıkışından SMA optik bağlantı – fiber optik kablo arayüzü ile iletilen lazer ışını, fiber optik kablo – SMA optik bağlantı arayüzü ile mercek sistemine taşınmaktadır.

3.1.2. Mercek Sistemi

Mercek sistemini (Şekil 3.6) oluşturan alt bileşenler şunlardır:

- N-BK7 plano konveks lens (LA1131-B, Thorlabs Inc., ABD),
- Referans lazer diyot (HL6312G, Thorlabs Inc., ABD),
- Dikroik ayna (DMSP750B, Thorlabs Inc., ABD),
- N-BK7 koruyucu cam (WG11050-A, Thorlabs Inc., ABD).



Şekil 3.6. Mercek sistemi ve ateşleme düzeneğini oluşturan bölümler

N-BK7 Plano Konveks Lens:

Plano konveks lensler, ışın kaynağından gelen lazer ışın demetini, ışın lensin düz yüzeyine iletildiğinde kollime eder. Kollime ışın lensin kavisli yüzeyine gönderildiğinde ışını odaklar. Mercek sisteminde plano konveks lensler bu prensibe göre yerleştirilmiştir. Kalınlığı 10 mm olan lens, N-BK7 borosilikat camdan üretilmiştir. Kaplaması olmayan, 10 mm kalınlığında N-BK7 cam, 915 nm dalgaboyunda ışının %93'ünü geçirmekte, %7'sini ise yansıtmaktadır. Yansıma oranının azaltılması için lens kaplamalı olarak tedarik edilmiştir. Kaplamalı N-BK7 lenste ışının sadece %0,5'i yansıma nedeniyle

kaybedilmektedir. Işın geçirgenlik özelliklerinin yanında N-BK7 malzemelerin fiziksel ve kimyasal dayanımları çok yüksek olduğu için optik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mercek sisteminde kullanılan kaplamalı N-BK7 lens, 25,4 mm çapında olup lens fokal uzunluğu 50 mm'dir.

Referans Lazer Diyot:

915 nm dalgaboyundaki lazer ışını, elektromanyetik spektrumun görünmeyen bölgesinde yer almaktadır. Deneysel çalışmalarda, enerjik malzeme üzerine gönderilen lazer ışınının, malzeme üzerine odaklanabilmesi için mercek sistemine referans lazer diyot yerleştirilmiştir. Referans lazer diyot 635 nm dalgaboyunda ve elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde ışın üretmektedir. Kırmızı renkte görünen ışın gücü 5 mW olup bu mertebelerdeki ışın güçlerinin enerjik malzeme ateşlenmesine etkisi bulunmamaktadır. Referans ışın, dikroik ayna ile 915 nm dalgaboyundaki lazer ışını ile eşleştirilmektedir.

Dikroik Ayna:

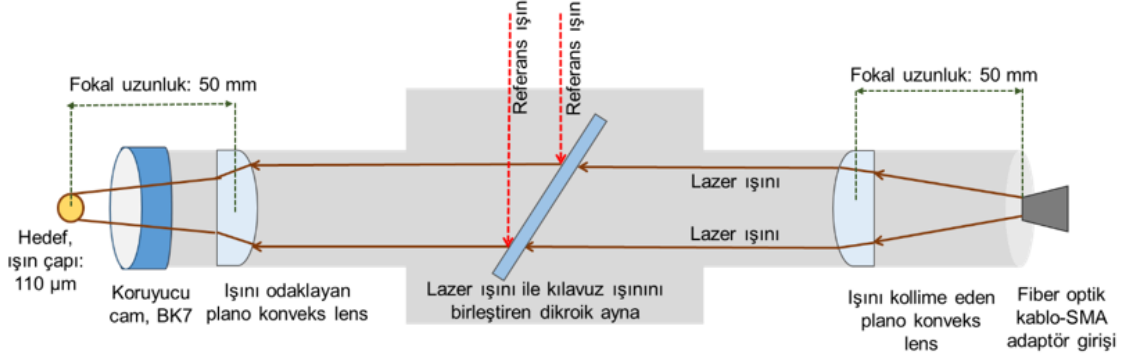
Dikroik ayna, ışını dalgaboyuna göre yönünü değiştirmeden iletebilir veya sabit açıda yansıtabilir. Bu prensip ile mercek sisteminde dikroik ayna üzerine gönderilen 915 nm dalgaboyunda lazer ışını, ışın yönü değişmeden iletilmektedir. 635 nm dalgaboyundaki ışın ise dikroik ayna yüzeyine 45° derece açıyla iletilmekte ve ayna yüzeyinden aynı açı ile yansıtılarak ışın yönü değişmektedir. Böylelikle referans ışın ile 915 nm dalgaboyundaki lazer ışını eşleştirilmektedir. Kırmızı renkteki referans ışının enerjik malzeme üzerine hizalanması ile 915 nm dalgaboyundaki ışının temas ettiği bölge belirlenmektedir.

N-Bk7 Koruyucu Cam:

Enerjik malzemelerin ateşlenmesi sırasında yüksek sıcaklıkta ve basınçta gaz çıkışı meydana gelmektedir. Bu sebeple mercek sistemini dış etkilerden korumak için sistemin kendine ait dış ünitesi bulunmaktadır. Ayrıca mercek sistemi ışın çıkışında mekanik dayanımı ve ışın geçirgenliği yüksek BK-7 koruyucu cam bulunmaktadır.

3.1.1.4. Işın İletimi

Lazer güç ünitesinde üretilen lazer ışını fiber optik kablo - SMA bağlantı arayüzü ile mercek sistemine taşınmaktadır. Mercek sisteminde ilerleyen ışın, 110 μm çapında hedef yüzeyine odaklanmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.7. Mercek sistemi arakesit görüntüsü ve lazer ışın iletimi

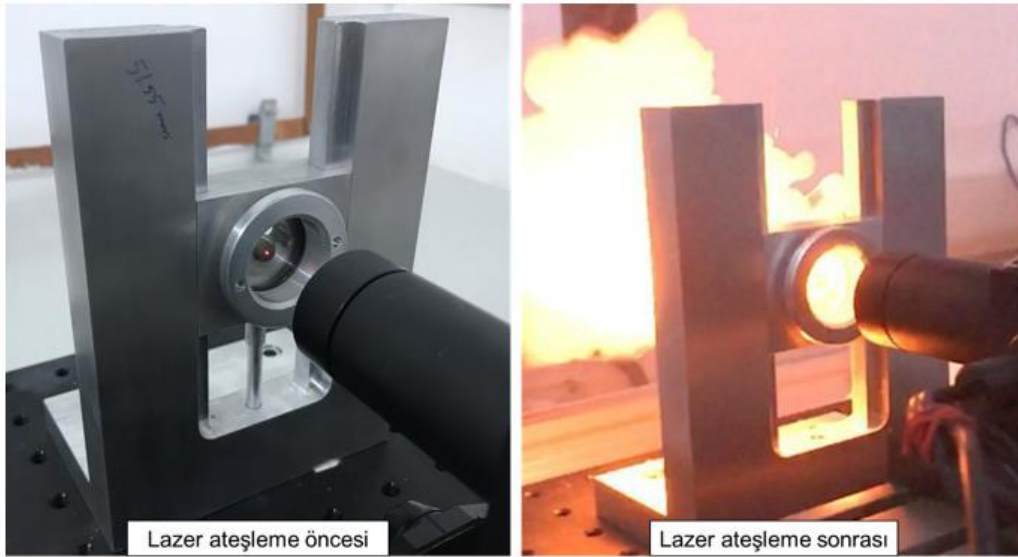
Fiber optik kablonun kor kısmından çıkan ve yapısı gereği sapma göstererek, başka bir deyişle artan açı ile ilerleyen lazer ışını birinci plano konveks lens ile kollime edilmektedir. Kollime lazer ışını dikroik ayna yüzeyinden, ışın yönü ve açısı değişmeden ikinci plano konveks lens yüzeyine iletilerek ışının odaklanması sağlanmaktadır. Işının odak mesafesi lens çıkışı sonrası 50 mm olup bu noktada ışın çapı 110 μm 'dir. Lazer ışınının hedefle hizalanması amacıyla referans ışın dikroik ayna yüzeyinden yansıtılarak lazer ışını ile eşleşmiş olarak ilerlemektedir.

Enerjik malzeme üzerinde lazer ışın çapının 110 μm olacak şekilde ayarlanabilmesi için enerjik malzeme ile mercek arasında 50 mm fokal mesafenin olması gerekmektedir. Bu amaçla, mercek sistemi ayarlanabilir x-y koordinat sehпасı üzerine monte edilmiştir. Enerjik malzeme ile mercek sistemi arasındaki uzaklık, koordinat sehпасının x yönünde hareket ettirilmesiyle ayarlanmaktadır.

Enerjik malzeme ateşleme çalışmaları 915 nm dalgaboyunda, elektromanyetik spektrumun görünmeyen bölgesindeki lazer ışını ile gerçekleştirilmiştir. Enerjik malzeme üzerinde lazer ışınının hizalanması için kullanılan düşük güçte, 635 nm dalgaboyunda (elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde), kırmızı ışın yayan referans lazer diyot mercek sistemine yerleştirilmiştir. Referans ışınının koordinat sehпасını y yönünde hareket

ettirerek enerjik malzeme üzerine düşecek şekilde ayarlanması ile 915 nm dalgaboyundaki lazer ışını hizalanmıştır.

Lazer ateşleme sisteminde kullanılmak üzere, enerjik malzemelerin yerleştirildiği Şekil 3.8'de verilen düzenek üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek, enerjik malzemelerin ateşleme çalışmaları sırasında malzemelerin sisteme sabitlenmesini sağlamaktadır. Farklı kalınlıklardaki PMMA plakalar, enerjik malzeme ile lazer ışını arasına yerleştirilmiştir. Böylelikle mercek sistemi, enerjik malzemelerin ateşlenmesi sırasında ekzotermik tepkimeler sonucu açığa çıkan yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazlardan korunmaktadır. Düzenek bağlantı arayüzü enerjik malzemelerin pelet halinde atmosferik ortamda ateşlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.8. Enerjik malzemeyi sabitlemek için kurulan düzenek

Lazer ateşleme sistemi ve enerjik malzeme sabitleme düzeneği birbirlerine 25 mm mesafede bulunan M6 tipi diş çapına sahip kılavuzlara sahip 300x300x12,7 mm optik masa (MB3030/M, Thorlabs Inc., ABD) üzerine monte edilmiştir. Optik masayı sabitleyen ayakların konumu değiştirilerek lazer ışını yatay veya dikey düzlemde gönderilebilmektedir.

3.2. Karakterizasyon

3.2.1. Işın Gücü Ölçümü

Lazer ışının gücü, fotodiyot sensör (S146C, Thorlabs Inc., ABD) ve optik güç ölçer (PM100D, Thorlabs Inc., ABD) ile ölçülmüştür (Şekil 3.9). Fotodiyot sensör, 900-1650 nm dalgaboyu aralığındaki ışın gücünü, 10 μ W – 20 W aralığında ölçebilmektedir. Sensör tepki süresi 1 μ s'nin altındadır ve sensörün ışın gücü sapması \pm %5'dir.



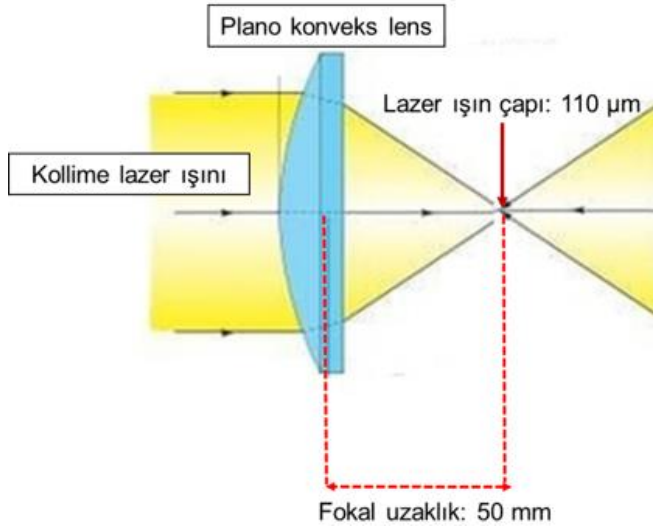
Şekil 3.9. Fotodiyot sensör ve optik güç ölçer

Fotodiyot sensörün tepkisi, gönderilen ışının dalgaboyuna bağlıdır. Bu nedenle fotodiyot sensör sadece monokromatik kaynaklardan yayılan optik güç ölçümünde kullanılmaktadır. Bu sensör, üzerine gönderilen ışın gücüne ve dalgaboyuna göre akım üretmektedir. Akım ile doğru orantılı olarak fotodiyot sensörde üretilen gerilim, optik güç ölçer ile ışın gücüne çevrilmektedir.

Lazer ateşleme sisteminde, dokunmatik ekrana girilen güç değerinde ışın lazer diyotta üretilmektedir. Üretilen ışının gücü, optik kayıplar sonucu enerjik malzeme üzerine taşınıncaya kadar düşmektedir. Fotodiyot sensör ve optik güç ölçer ile bu kayıplar ölçülmüş ve hedef yüzeyine ulaşan ışın gücü belirlenmiştir.

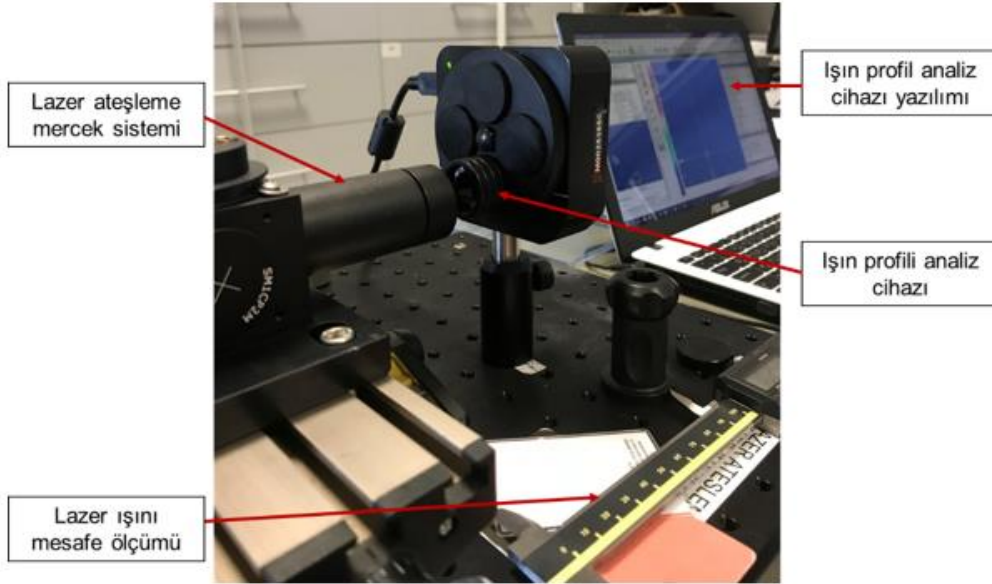
3.2.2. Işın Çapı Ölçümü ve Dağılım Analizi

Mercek sisteminde ışını odaklamak için kullanılan plano konveks lens focal uzunluğu 50 mm'dir. Buna göre lens konumundan 50 mm uzaklıkta lazer ışın çapı minimum değeri olan 110 μ m'ye ulaşmaktadır. Bu mesafe öncesinde ve sonrasında konumlarda lazer ışını Şekil 3.10'daki gibi dağılım gösteren yapıda ilerlemektedir.



Şekil 3.10. Lazer ışın dağılımı şematik gösterimi

Optik ışın profil analiz cihazı (ing. optical beam profiler) ile lazer ışın çapı ölçümü ve yüzeyde dağılımı incelenmiştir. Cihazdaki (BC106-VIS, Thorlabs Inc., ABD) fotodiyot sensöre gönderilen ışın x ve y ekseninde taranmış ve iki boyutlu ölçüm sonuçları elde edilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Lazer ateşleme sistemi optik ışın analizi

3.2.3. Lazer Ateşleme Sistemi Tetik Akımı Ölçümü

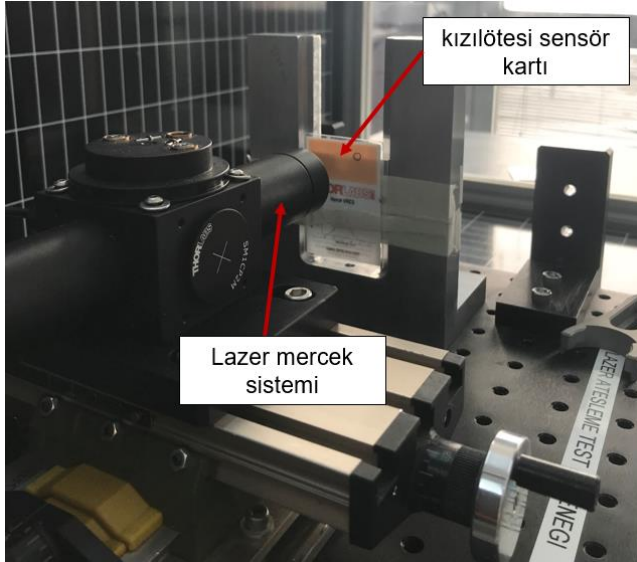
Enerjik malzemelerin lazer ateşlenme gecikmelerinin belirlenebilmesi için ışının enerjik malzeme yüzeyine gönderildiği zamanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, lazer

ateşleme sistemi güç ünitesinde tetik sinyali bulunmaktadır. Bu sinyal, lazer ışını enerjik malzeme yüzeyine gönderilmeye başladığı an 3,5 Volt gerilim üretmektedir. Bu gerilim, akım ölçer (80i-110s, Fluke, Fransa) ile ölçülmüş ve veri toplama sistemi ile zamana karşı kaydedilmiştir.

3.2.4. Işın Süresi Doğrulaması

Lazer ateşleme sistemine ait güç ünitesinde dokunmatik ekrana girilen ışın süresinin doğrulanması amacıyla bir test yöntemi geliştirilmiştir. Ölçüm için hızlı kamera ve kızılötesi sensör kartı (VRC5, Thorlabs Inc., ABD) kullanılmıştır. Kart yüzeyine, kızılötesi bölgedeki lazer ışını gönderildiği zaman, kart üzerindeki 915 nm dalgaboyundaki ışığa duyarlı yüzeyde lazer ışını görünür olmaktadır. Güç ünitesinde üretilen ve dokunmatik ekrandan süresi ayarlanan ışın sensör karta yansıtılmıştır. Sensör kart üzerinde görülen ışın hızlı kamera ile kaydedilerek ışın süresi belirlenmiştir.

Şekil 3.12'deki test düzeneğinde lazer ateşleme mercek sistemi, optik uzaklığına başka bir deyişle ışın çapının 110 μm olduğu mesafeye kızılötesi sensör kart yerleştirilmiştir. Kartın ışına duyarlı bölgesi, referans ışın ile hizalanmıştır ve böylelikle lazer diyotta üretilen ışının kartın duyarlı yüzeyine gönderilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.12. Lazer ışın süresini doğrulamak için kurulan test düzeneği

Lazer güç ünitesinde test süresince 50 mW lazer ışın gücü sabit tutulmuştur. Güç ünitesi ekranına girilen ışın süresi milisaniye mertebelerinde değiştirilmiştir. Kart yüzeyine

düşen ışın, hızlı kamera ile 50000 fps (ing. frame per second) görüntü hızında izlenmiştir. 0,02 ms aralıklarda alınan görüntülerde, güç ünitesi ekranına girilen lazer ışın süresi ile kart üzerinde hızlı kamera ile ölçülen lazer ışın süreleri kıyaslanmıştır.

3.3. Sonuçlar

Işın Gücü:

Lazer diyotta üretilen ışın gücünün %3,5'i, 5 m uzunluğundaki fiber optik kablo içinde taşınımı sırasında ve SMA bağlantı arayüzünde kaybedilmiştir. Işın gücünün %16,5'i mercek sistemi içindeki plano konveks lens, dikroik ayna ve BK-7 koruyucu cam ile teması sırasında kaybedilmiştir. Mercek sistemi çıkışındaki toplam güç kaybı %20'dir.

Lazer ateşleme deneysel çalışmalarında 2 mm ve 3 mm kalınlıklarında PMMA plaka çıkışına, plaka ile temas edecek şekilde enerjik malzemeler yerleştirilmiştir. Bu nedenle lazer diyotta üretilen lazer ışınının, PMMA plaka çıkışındaki gücünün belirlenmesi, başka bir deyişle enerjik malzeme üzerine gönderilen lazer ışın gücünün ölçülmesi deneysel çalışmalar için kritik önem taşımaktadır. Sistemde 2 mm ve 3 mm kalınlıklarda PMMA kullanıldığı durumda, enerjik malzeme üzerine gönderilen ışının güç kaybı belirlenmiştir (Çizelge 3.2).

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'ten görüldüğü üzere lazer ateşleme sistemindeki ışın kaybı, lazer diyotta üretilen ışın gücü ile doğrusal olarak değişmektedir. Grafik eğimlerinden yola çıkılarak lazer ateşleme sistemindeki toplam ışın kaybı hesaplanmıştır. Bu hesaba göre sistemde 2 mm ve 3 mm kalınlıklarda PMMA kullanıldığı durumda, enerjik malzeme üzerine gönderilen ışının sırasıyla %22,6'si ve %25'i kaybedilmiştir.

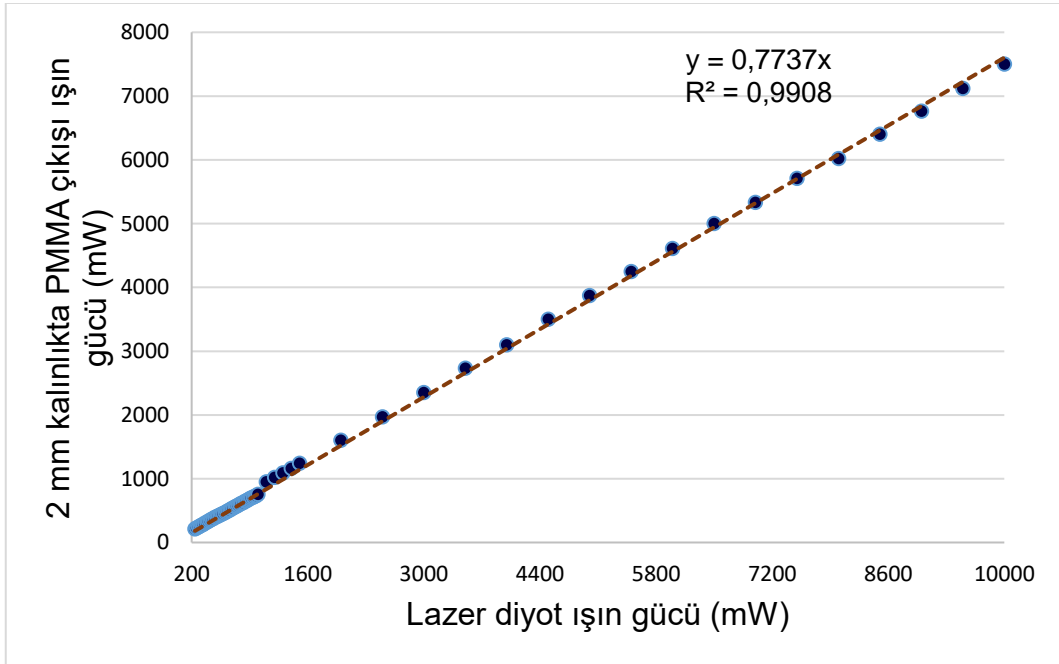
Çizelge 3.2. Lazer diyot için ışın gücü ölçüm sonuçları

Lazer diyotta üretilen ışın gücü (mW)	Mercek sistemi çıkışında ışın gücü (mW)	2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)	3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)
240	225	213	209
260	242	226	220

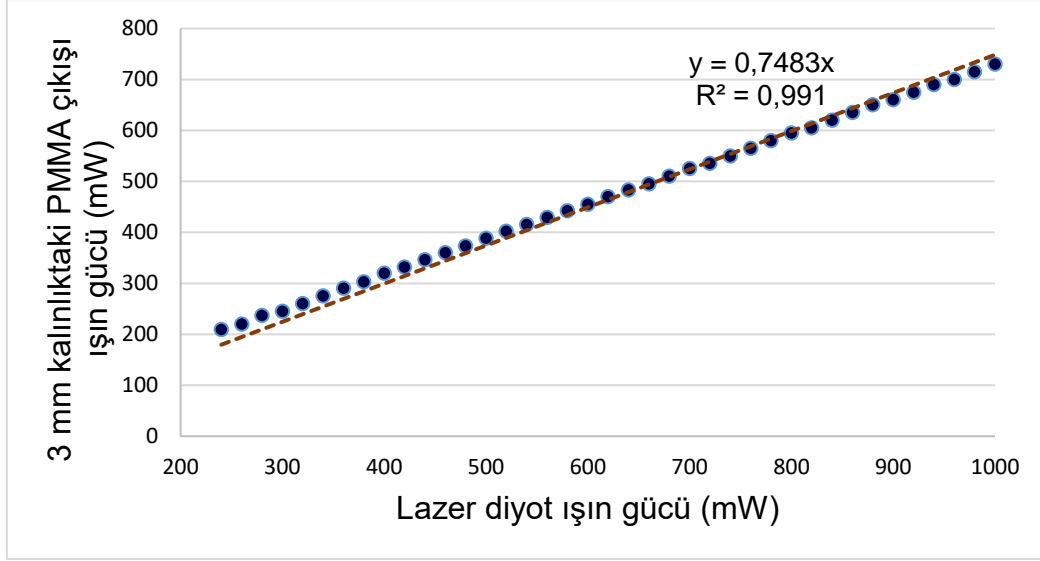
Lazer diyotta üretilen ışın gücü (mW)	Mercek sistemi çıkışında ışın gücü (mW)	2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)	3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)
280	260	242	237
300	270	257	245
320	287	270	260
340	300	283	275
360	317	300	290
380	330	315	303
400	345	330	320
420	360	345	332
440	375	360	346
460	390	370	360
480	403	390	373
500	415	400	388
520	430	415	402
540	445	430	415
560	460	445	429
580	475	455	442

Lazer diyotta üretilen ışın gücü (mW)	Mercek sistemi çıkışında ışın gücü (mW)	2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)	3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)
600	490	470	455
620	510	485	470
640	520	500	483
660	535	510	495
680	550	530	510
700	565	540	524
720	580	560	535
740	595	570	550
760	610	585	565
780	630	600	580
800	645	613	595
820	655	625	605
840	670	642	620
860	685	655	635
880	700	670	650
900	715	685	660

Lazer diyotta üretilen ışın gücü (mW)	Mercek sistemi çıkışında ışın gücü (mW)	2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)	3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücü (mW)
920	725	700	675
940	740	710	690
960	755	725	700
980	770	735	715
1000	785	755	730



Şekil 3.13. 2 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücünün değişimi



Şekil 3.14. 3 mm kalınlıkta PMMA plaka çıkışında ışın gücünün değişimi

Kapalı bomba sisteminde yapılan lazer ateşleme deney çalışmaları, 3 mm kalınlıktaki PMMA ile sınırlandırılmış sistemde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan lazer ışın gücü, Çizelge 3.3'te verilen optik kayıplar göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

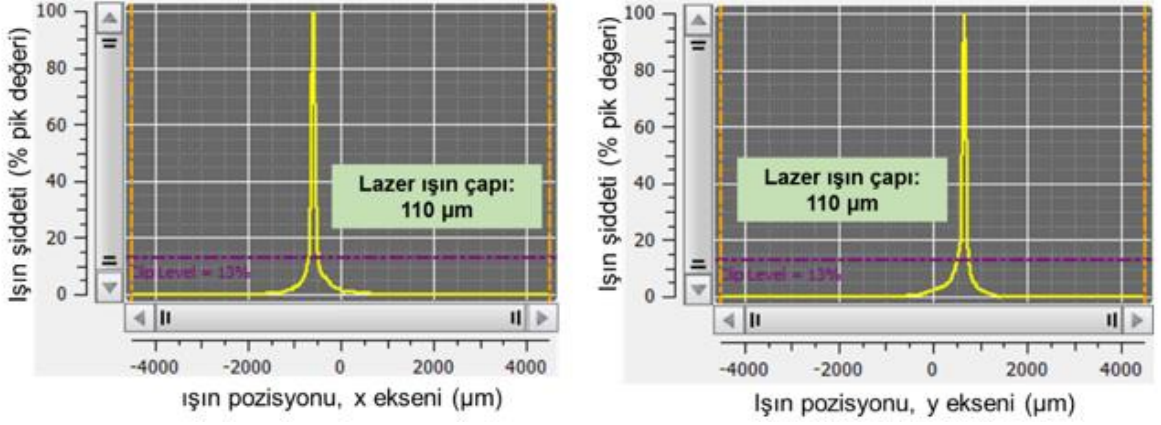
Çizelge 3.3. Lazer ateşleme sistemindeki optik kayıplar

Lazer ateşleme sistemi ve ateşleme düzeneği alt bileşenleri	Işın kayıp yüzdesi
5 m uzunluğundaki fiber optik kablo ve SMA konektör arayüzü	%3,5
Lens sistemi (plano konveks lens, dikroik ayna ve BK-7 koruyucu cam)	%16,5
3 mm kalınlıktaki PMMA koruyucu cam	%5,0
Toplam	%25,0

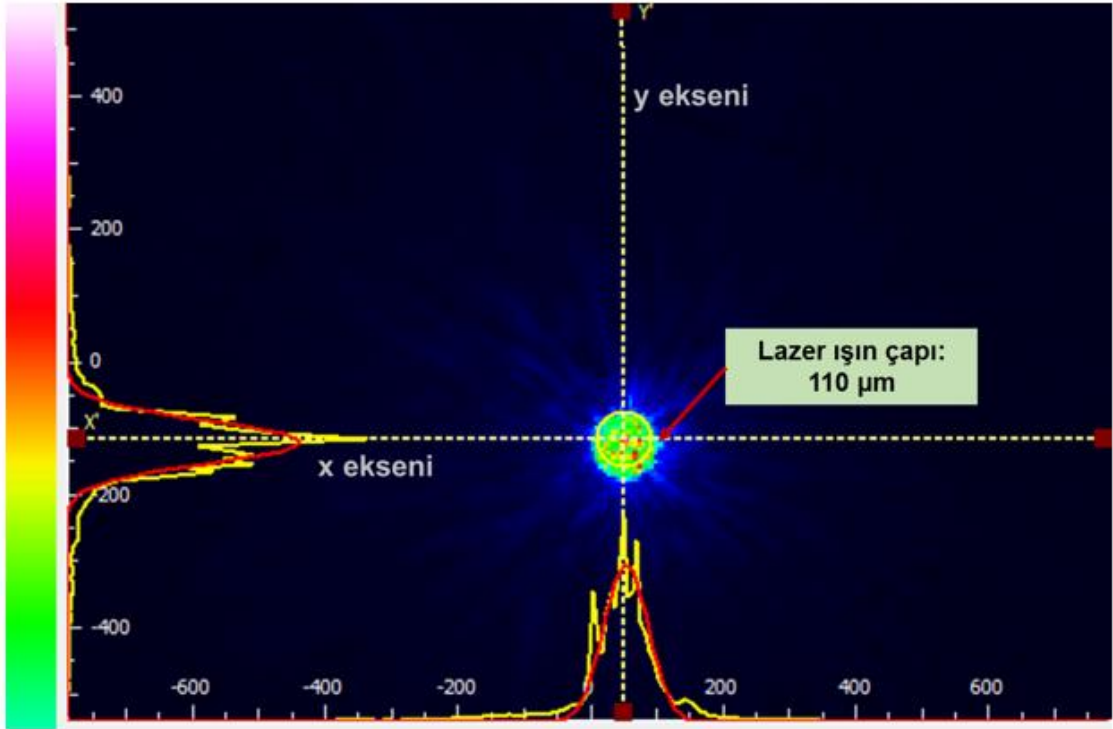
Tezin bu bölümünden sonraki kısımlarında lazer ışın gücü olarak tanımlanan değerler, enerji malzeme üzerine ulaşan lazer ışın gücünü temsil etmektedir.

Işın Çapı ve Dağılımı:

Lazer ışını, fokal mesafede 110 µm çapındadır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'dan görüldüğü üzere fokal mesafede ışın şiddeti maksimum değerindedir. Başka bir deyişle bu mesafede ışın dağılımı homojen yapıda olup, ışın şiddet oranı %100 pik değerindedir.



Şekil 3.15. Fokal mesafede lazer ışın çapı ölçüm sonuçları

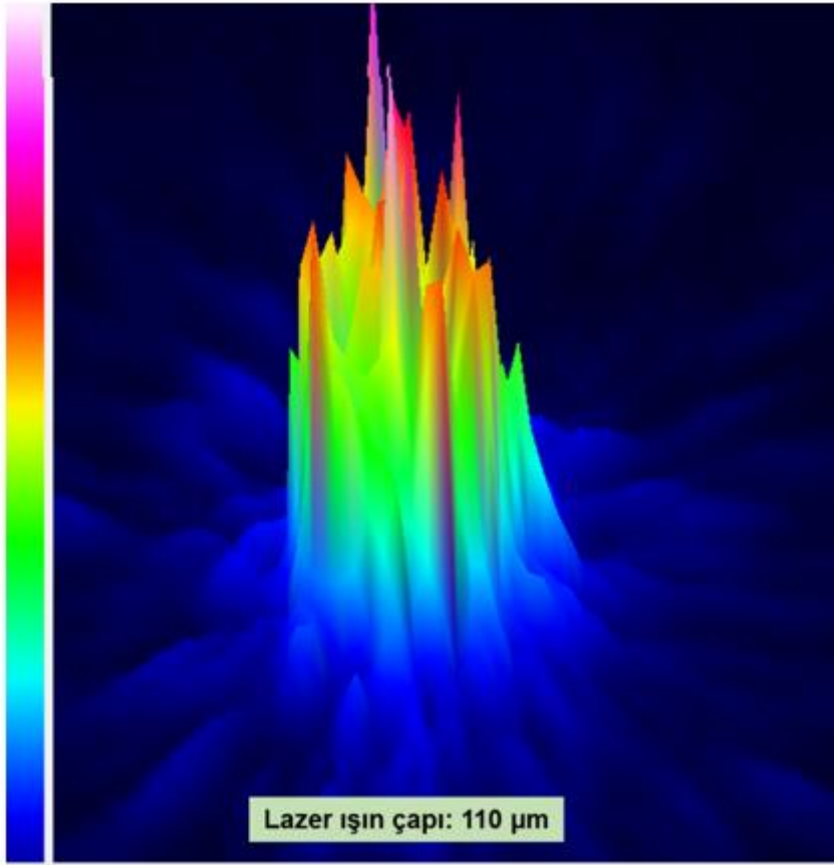


Şekil 3.16. Fokal mesafede lazer ışın dağılımı

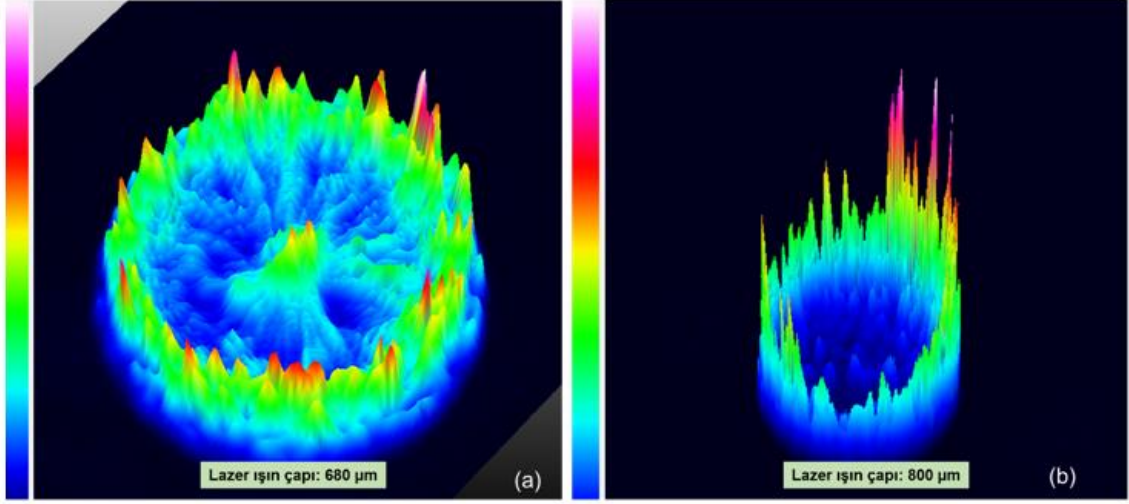
Lazer ateşleme çalışmaları sırasında enerjik malzeme sistemini kapalı hale getirmek ve aynı zamanda lazer ışınının sistem içindeki enerjik malzemeye ulaşmasını sağlamak amacıyla kullanılan PMMA plakanın, lazer ışını kırıldığı belirlenmiştir. PMMA plakanın ışını kırması sonucu 50 mm fokal mesafedeki, 110 μm olan ışın çapı değişmiştir. Bu nedenle, öngörülen lazer ışın gücü ve ışın süresinde, enerjik malzeme ateşlenmesi gerçekleşmemiştir. PMMA plakanın kullanılması durumunda değişen optik mesafe ışın profil analiz cihazı ile belirlenmiştir. PMMA plaka kullanılmadan en düşük çap ve

homojen dağılıma sahip ışının elde edildiği optik mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir. Sistemde 2 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığında optik mesafe 51,5 mm (Şekil 3.17), 3 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığında 51,6 mm olarak belirlenmiştir.

Fokal uzaklıktan daha kısa mesafelerde lazer ışın çapının 110 μm 'dan fazla olacağı teorik olarak Şekil 3.10'da görülmektedir. Şekil 3.18'de görüldüğü üzere lazer ışın çapı, optik uzaklıkta 47 mm olduğunda 680 μm , 44 mm olduğunda 800 μm 'dir. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 kıyaslandığında fokal uzaklıktan sapma durumunda ışın dağılımının homojen olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle enerjik malzemeleri lazer ile ateşleme çalışmaları, ışın çapının 110 μm ve ışın dağılımının homojen olduğu fokal uzaklıkta yürütülmüştür.



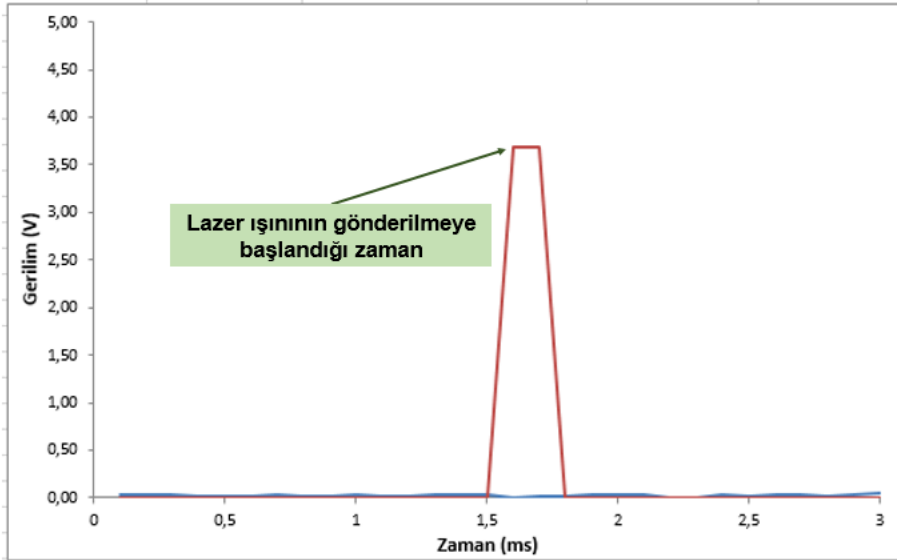
Şekil 3.17. Enerjik malzeme üzerine gönderilen lazer ışın şiddetinin dağılımı



Şekil 3.18. Optik mesafenin (a) 47 mm ve (b) 44 mm olduğu durumlarda lazer ışınının çapı ve şiddetinin yüzeyde dağılımı

Lazer Ateşleme Sisteminde Tetik Akımı:

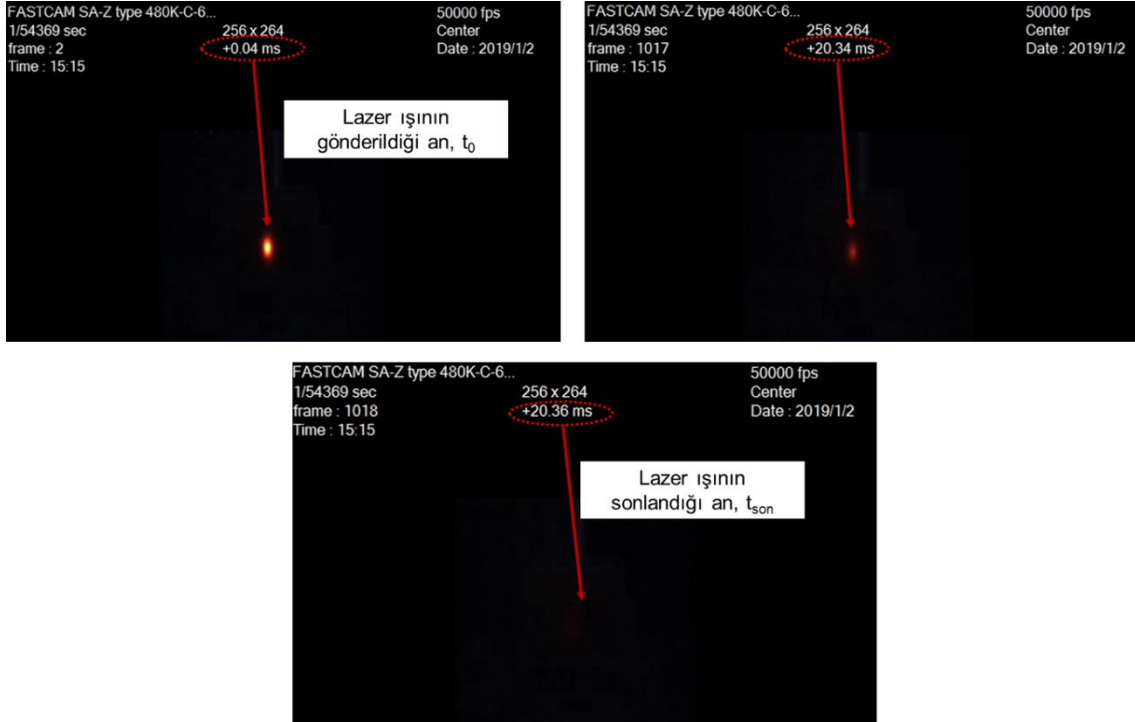
Şekil 3.19’da verildiği üzere lazer ateşleme sisteminde başlat komutu ile lazer ışınının sistemde üretilmesi arasında gecikme tespit edilmiştir. Işın 1,5 ms gecikme ile sistemde üretilmiş ve enerjik malzeme üzerine ulaşmıştır.



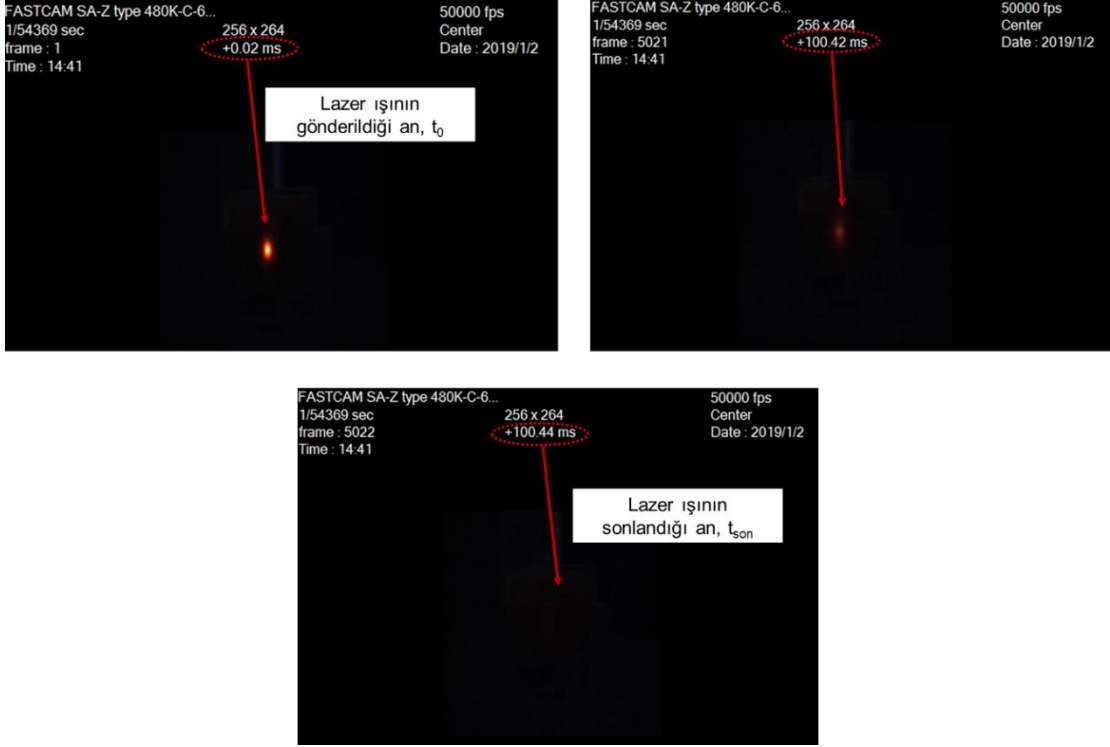
Şekil 3.19. Lazer ateşleme sistemi tetik akımı grafiği

Işın Süresi:

Şekil 3.20’de 20 ms ve Şekil 3.21’de 100 ms süre ile lazer ışını uygulamasında ışının sensör kart üzerinde görüldüğü ilk an, ışının sonlanmasından 0,02 ms öncesi ve ışının sonlandığı ana ait hızlı kamera görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.20. 20 ms ışın süresi için 0,04 ms, 20,34 ms ve 20,36 ms anlarında hızlı kamera görüntüleri



Şekil 3.21. 100 ms ışın süresi için 0,02 ms, 100,42 ms ve 100,44 ms anlarında hızlı kamera görüntüleri

Çizelge 3.4’te verildiği üzere lazer ateşleme sisteminde ışın süresi sistemde ayarlanan süreden sapmalı olarak üretilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre uygulanan ışın süreleri 15 ms’ye kadar olduğunda 1,7 ms eksik elde edilmiştir. 20 ms ve daha uzun ışın süreleri ise, 0,3-0,4 artı tolerans ile elde edilmiştir. Sapmalar çok düşük olduğu için deneysel çalışmalarda dikkate alınmamıştır.

Çizelge 3.4. Lazer ışın süresi doğrulama sonuçları

Lazer ateşleme sistemi ışın süresi (ms)	Ölçülen lazer ışın süresi (ms)	Işın süresinde sapma (ms)
2	0,38	-1,62
5	3,32	-1,68
7	5,32	-1,68

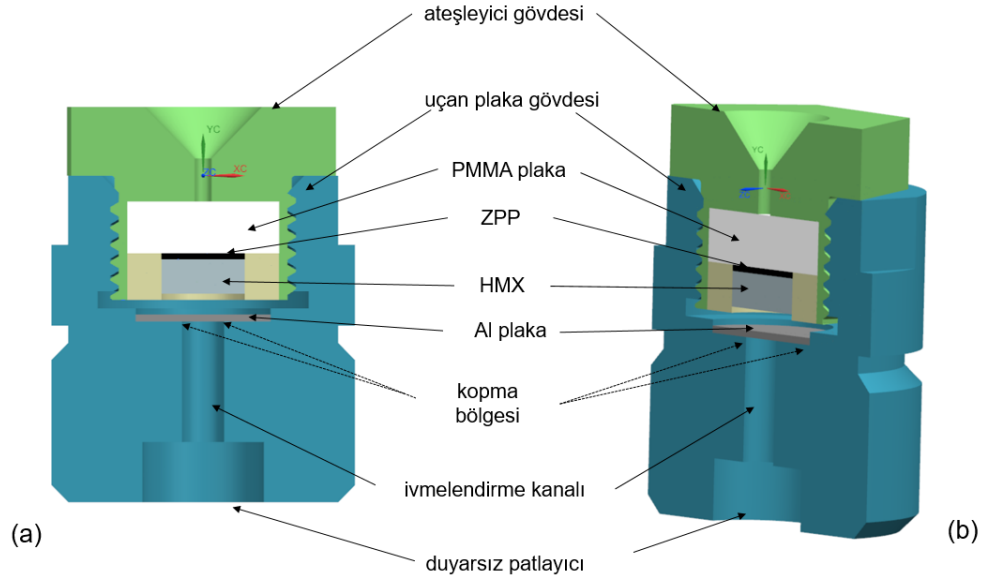
Lazer ateşleme sistemi ışın süresi (ms)	Ölçülen lazer ışın süresi (ms)	Işın süresinde sapma (ms)
10	8,32	-1,68
15	13,30	-1,70
20	20,32	0,32
25	25,34	0,34
50	50,36	0,36
100	100,42	0,42

4. LAZER TETİKLİ UÇAN PLAKA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

4.1. Sistem Tasarımı

Lazer tetikli uçan plaka sistemini oluşturan bölümler (Şekil 4.1)

- Ateşleyici gövdesi ve
- Uçan plaka gövdesidir.



Şekil 4.1. Lazer tetikli uçan plaka sisteminin (a) önden ve (b) 30° açı ile katı modeli

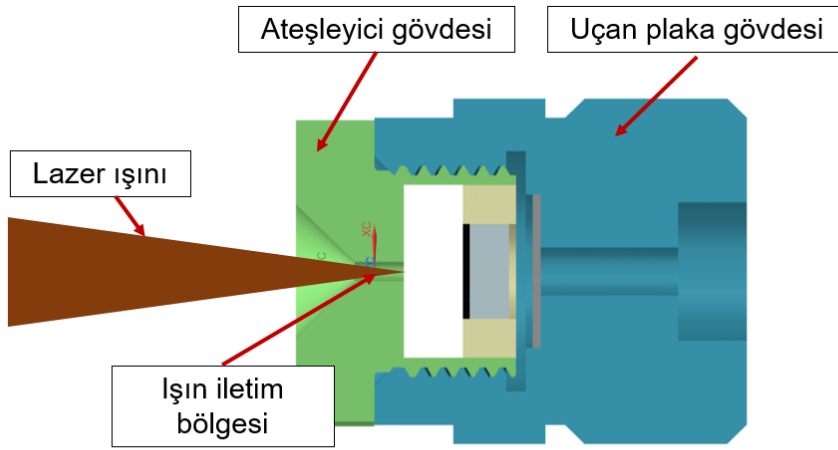
4.1.1. Ateşleyici Gövdesi

Ateşleyici gövdesi $7,1\pm 0,3$ gr ağırlığında erkek ve dişi standart M12 (metrik 12) diş çapına sahip 304 tipi paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir.

Gövdede, lazer ışını ile enerjik malzeme arayüzünde kullanılacak malzeme seçiminde, malzemenin ışın geçirgenlik özelliği, maliyeti, bulunabilirliği, işlenebilirliği ve mekanik dayanımı göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla, benzer optik uygulamalarda tercih edilen UV sınıfı kaynaşık silika, BK-7, safir, borosilikat cam ve pleksiglass-PMMA malzemelerin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir (Dossier ve Kramer, 1995, Gottfried, Chase, Colburn, Beyler, 2014). Bu malzemeler üzerine gönderilen 915 nm dalgaboyunda ışınının %90-%95'ini geçirebilir özelliktedir. PMMA işlenebilirlik, maliyet ve bulunabilirlik açısından diğer malzemelerden daha avantajlı olduğu için tercih edilmiştir.

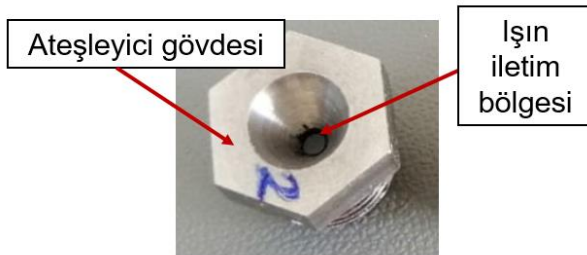
Gövde içine 3 mm kalınlıkta PMMA plaka yerleştirilmiştir. PMMA plaka, gövdede yer alan enerjik malzemelerin sistem içinde hapsedilerek sınırlandırılmasını ve lazer ışınının gövdeye girebilmesini sağlamıştır.

Gövde içi konik geometriye sahip olacak şekilde üretilmiştir. Plakanın ateşleyici gövdesi yüzeyine temas ettiği ve lazer ışını geçerek yüksek basınç ile kopmanın gerçekleştiği bölgenin çapı düşürülmüştür (Şekil 4.2). Bunun sebebi ışının tamamının gövde içine iletilmesini sağlamak, PMMA plakanın yüzey alanını düşürerek ateşleme sırasında sistem içinde oluşan yüksek basınca karşı mekanik dayanımını artırmak ve birim alana daha çok mekanik kuvvet uygulanarak plaka koptuğu zaman daha büyük bir kinetik enerji ile daha hızlı uçmasını sağlamaktır.



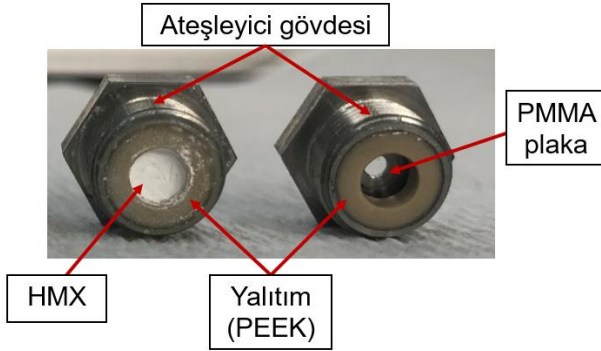
Şekil 4.2. Ateşleyici gövdesinde lazer ışınının iletimi

Gövdenin PMMA plaka ile temas ettiği yüzey, yani konik gövdenin dar olan ucu, lazer ışınının gövde içine geçmesine olanak verecek en düşük çap olan 2 mm çap ile üretilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Lazer tetikli ateşleyici gövdesinin arkadan görünüşü

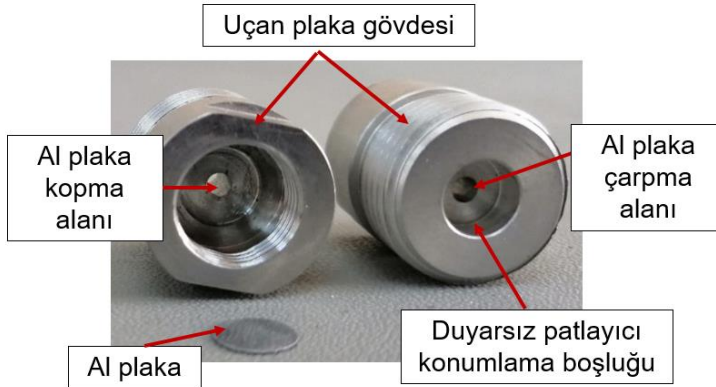
Ateşleyici gövdesi ile PMMA plaka arasında sıvı conta uygulanarak sistemin sızdırmazlığı sağlanmıştır. Gövde içine yerleştirilen PMMA plaka üzerine PEEK (polieter eter keton) yalıtım haznesi bütünlenmiştir (Şekil 4.4). Enerjik malzemeler bu hazne içine preslenmiştir.



Şekil 4.4. Lazer tetikli ateşleyici gövdesi ve ZPP+HMX basılmış gövde bütünü, önden görünüşü

4.1.2. Uçan Plaka Gövdesi

Uçan plaka gövdesi tasarımında ve üretiminde, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen elektriksel yöntem ile ateşlenen gövde boyutsal özellikleri kullanılmıştır (Dinegar, 1982). $25,6 \pm 0,5$ gr ağırlığındaki gövdede uçan plakanın yerleştirildiği 7,0 mm çapındaki kesit, 2,5 mm çapına daralmaktadır (Şekil 4.5). Ateşlenme sırasında gövdede oluşan basınç etkisi ile plaka 2,5 mm çapındaki bölgeden kopmaktadır. Kopan plaka 7 mm uzunluğundaki ivmelendirme kanalında yüksek hıza ulaşarak duyarsız patlayıcı yüzeyine çarpmaktadır.



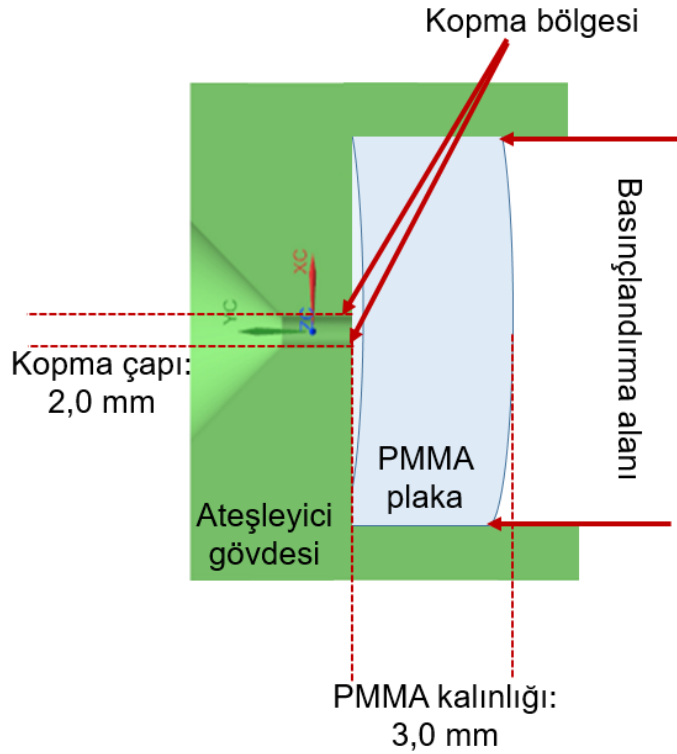
Şekil 4.5. Uçan plaka gövdesinin önden ve arkadan görünüşü

Gövdede kullanılan uçan plaka malzemesi T-6061 alüminyumdur. Plaka için Al malzeme seçilmesinin başlıca nedeni malzemenin hafif olması ve plaka kopma mukavemet eşliğinin aşılması ile plakanın yüksek hızlara ulaşmasıdır.

4.2. Sistem Performansının Değerlendirilmesi

4.2.1. Matematiksel Mekanik Dayanım Analizleri

Sistemin işlevsel gereksinimi ateşleme sırasında uçan plaka gövdesindeki Al plakanın kopması, ateşleyici gövdesindeki PMMA plakanın ise sistem sızdırmazlığını sağlayarak bütünlüğünü korumasıdır. Bu nedenle Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sırasıyla şematik görüntüsü verilen gövdelerdeki PMMA ve Al plakaların matematiksel mekanik analizi yapılmıştır.

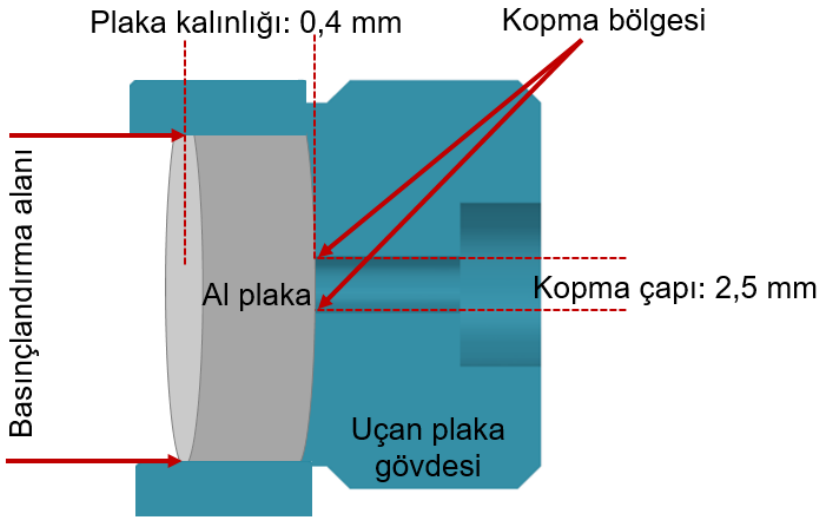


Şekil 4.6. Ateşleyici gövdesinin şematik görünümü

Ateşleyici gövdesinin fiziksel ve mekanik özellikleri şöyledir:

- PMMA kopma mukavemeti: 70 MPa (Wahab, Ataya, Silberschmidt, 2017)
- PMMA plaka kopma çapı (D): 2,0 mm

- PMMA plaka kalınlığı (L): 3,0 mm
- PMMA plaka kopma alanı ($\pi.D.L$) = $1,9 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
- PMMA plaka kopma kuvveti (kopma mukavemeti x kopma alanı) = 1320 N
- Basınçlandırma alanı ($\pi.D^2/4$): $3,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- PMMA plaka kopma basıncı (kopma kuvveti / basınçlandırma alanı) = **420 MPa**



Şekil 4.7. Uçan plaka gövdesinin şematik görünümü

Uçan plaka gövdesinin fiziksel ve mekanik özellikleri şöyledir:

- Al kopma mukavemeti: 310 MPa (Tang, Prakash, Lewandowski, 2006; Li, Wierzbicki, Sutton, Yan, Deng, 2011)
- Al plaka kopma çapı (D): 2,5 mm
- Al plaka kalınlığı (L): 0,4 mm
- Al plaka kopma alanı ($\pi.D.L$) = $3,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- Al plaka kopma kuvveti (kopma mukavemeti x kopma alanı) = 974 N
- Basınçlandırma alanı ($\pi.D^2/4$): $4,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

- Al plaka kopma basıncı (kopma kuvveti / basınçlandırma alanı) = **198 MPa**

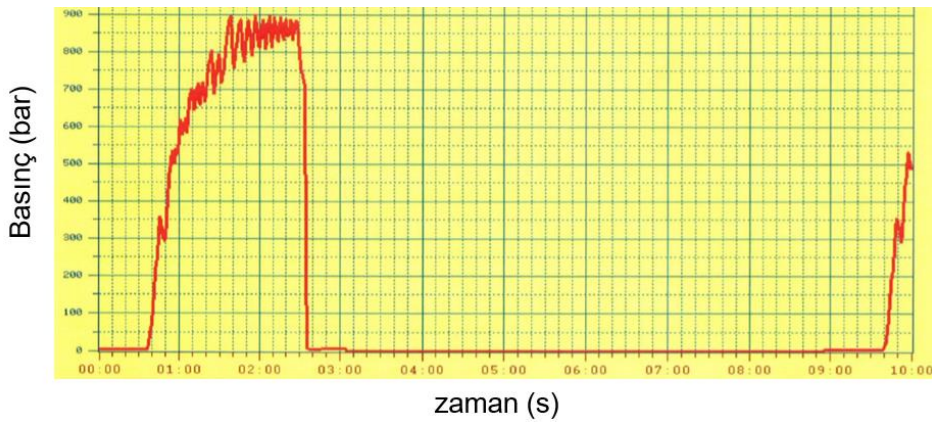
Ateşleme çalışmalarında sistem güvenliğinin sağlanması için Al plakanın mekanik dayanımının PMMA plakaya göre çok daha az olması gerekmektedir. Al plakanın kalınlığı en fazla 0,4 mm tutularak 198 MPa, PMMA plakaya uygulanan 420 MPa basıncın yarısından biraz daha düşük bir mekanik dayanıma sahip olması sağlanmıştır.

4.2.2. Sızdırmazlık Ölçümü

Üretimi yapılan her bir ateşleyici gövdesinde, ateşleyici gövdesi ve PMMA plaka arasındaki sızdırmazlık değeri He sızdırmazlık testi ile ölçülmüştür. Gövdelerin sızdırmazlık değeri en fazla $1,0 \times 10^{-8}$ mbar.Lt He/s ($3,7 \times 10^{-9}$ mbar.Lt hava/s) olup, sızdırma değeri daha düşük çıkan gövdeler ateşleme deneylerinde kullanılmamıştır. Bu sızdırmazlık değerinde, ateşleme deneyleri sırasında sistem içinde oluşan basıncın gövde ve PMMA arayüzünde kaybedilmediği değerlendirilmiştir. Oluşan basıncın tamamının Al plakanın koparak sistem içinde ivmelenmesini sağladığı varsayılmıştır.

4.2.3. Hidrostatik Test

Ateşleyici ve uçan plaka gövdelerine yerleştirilen PMMA ve Al plaka dayanımları gövdelere uygulanan hidrostatik test ile kontrol edilmiştir. Test sırasında gövdelere basınçlı su gönderilmiş ve su basıncı Şekil 4.8’de görüldüğü gibi kademeli olarak artırılmıştır. Gövdeler hidrostatik test cihaz kabiliyetinin en üst limiti olan 900 bar basınca maruz bırakılmış ve bu koşullar altında gövdelerde sızıntı gözlenmemiştir.

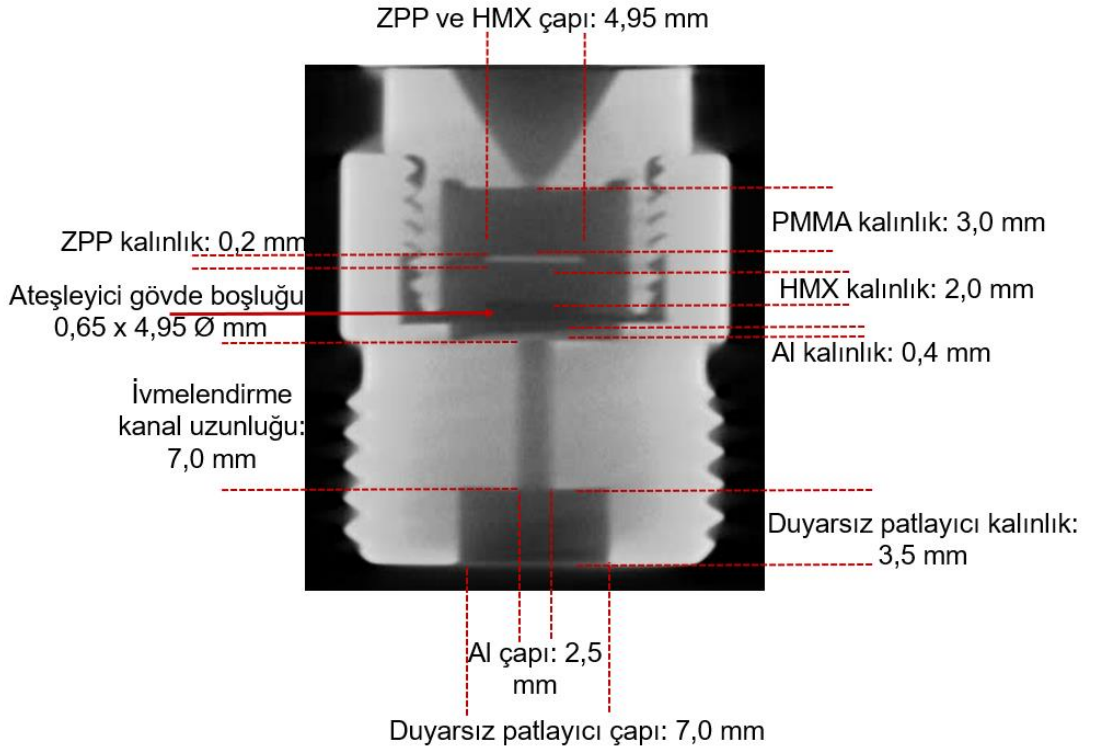


Şekil 4.8. Hidrostatik test basınç-zaman grafiği

4.2.4. Radyografik Analiz

Üretimi yapılan sistemin radyografik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9’da yer alan radyografik görüntü şu sonuçları göstermiştir:

- Sistemde PMMA plaka ve ZPP malzeme temas halindedir,
- Sistem içindeki boşluklarda basınç birikimini değiştirecek veya Al plaka ilerleyişini engelleyecek yabancı madde bulunmamaktadır,
- Gövde yapısında sistemin mekanik dayanımını etkileyecek çatlak ve diğer deformasyon bulunmamaktadır.



Şekil 4.9. Lazer tetikli uçan plaka sisteminin radyografik görüntüsü ve boyutsal sınırları

5. ENERJİK MALZEMELERİN LAZER İLE ATEŞLENMESİ

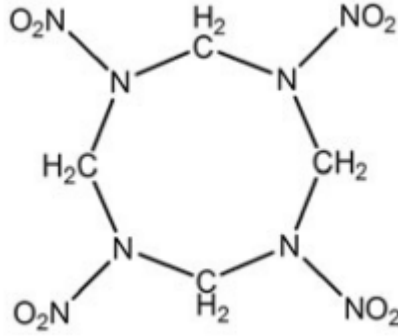
5.1. Genel Bilgi

Lazer tetikli uçan plaka sisteminde, Al plakanın yüksek hızda duyarsız patlayıcı yüzeyine çarpması ve bu şok etkisi ile patlayıcıda detonasyonun gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Plakanın patlayıcıda şok detonasyonunu sağlayacak hızlara ulaşabilmesi için milisaniye mertebelerinde yüksek basınç gereksinimi bulunmaktadır. Bu basınç, enerji malzemelerin enerji malzemelerin ateşlenmesi/yanması ile elde edilmiştir.

Yakıtların yanma süreleri diğer enerji malzemelerden olan piroteknik bileşenler ve patlayıcılara kıyasla daha uzundur. Bu sebeple tez çalışmasında yakıtların lazer ile ateşlenmesi çalışılmamıştır. Patlayıcıların ateşlenme tepkimeleri, piroteknik bileşenlere göre daha hızlıdır. Buna bağlı olarak patlayıcıların kalorifik enerjileri piroteknik bileşenlere kıyasla daha kısa sürede açığa çıkmakta ve daha yüksek basınç çıktısı elde edilmektedir. Piroteknik bileşenlerin ateşlenme süreleri ise yakıtlardan daha fazla, patlayıcılardan daha düşüktür. Bu kapsamda lazer ile ateşlenme çalışmalarında duyarsız patlayıcı olarak HMX (siklotetrametilen tetranitramin) ve piroteknik bileşen olarak ZPP (zirkonyum potasyum perklorat) kullanılmıştır.

5.2. HMX ve HMX+%3 Karbon Siyahı Karışımı ile Yapılan Çalışmalar

Şekil 5.1’de moleküler yapısı verilen HMX sürtünme, darbe, elektrostatik boşalma hassasiyeti çok düşük ve detonasyon eşik sıcaklığı çok yüksek olduğu için duyarsız patlayıcılar sınıfına girmektedir (Zhang, Shen, Ye ve ark., 2017). Duyarsız patlayıcı olması sebebi ile HMX’in istem dışı ateşlenme veya detonasyon olasılığı oldukça düşüktür (Johnson, 1956; Weinheimer, 2002). HMX’in lazer ile ateşlenme eşik değeri (tutuşma sıcaklığı) diğer duyarsız patlayıcılara kıyasla daha düşüktür (Ewick, Graham, Hawley, 1993; Dosser ve Kramer 1995).



Şekil 5.1. Duyarsız patlayıcı, HMX moleküler yapısı

HMX ile ilgili teknik bilgiler içeren MIL-DTL-45444C askeri standardında (1996) belirtildiği üzere HMX, RDX duyarsız patlayıcısından elde edilmektedir. Bu sebeple HMX, RDX ile karışım halinde, farklı partikül boyutlarında üretilmektedir. HMX saflık oranına göre "derece A" ve "derece B" olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Derece A olarak tanımlanan HMX, ağırlıkça %93 β-HMX ve %7 oranında RDX içermektedir. Derece B olarak tanımlanan HMX ise, ağırlıkça %98 β-HMX ve %2 oranında RDX içermektedir. Lazer ateşleme çalışmaları, HMX saflığı daha yüksek olduğu için "derece B" olarak tanımlanan %98 saflıktaki HMX ile yürütülmüştür.

Standartta HMX partikül boyut dağılımlarına göre farklı sınıflarda tanımlanmıştır (Çizelge 5.1). Ateşleme çalışmalarında lazer ışınının temas ettiği 110 µm çapındaki HMX yüzeyinde birim alanda maksimum HMX partikül miktarının olmasının HMX'in lazer ile ateşlenebilirliğine olumlu yönde etki edeceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda en düşük partikül boyutuna sahip "sınıf 5" olarak gruplandırılan HMX kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. HMX Tane Dağılımı Sınıflandırması (MIL-DTL-45444C, 1996)

U.S. Standart Elek No	Elek açıklığı	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	Sınıf 5	Sınıf 6
		<i>ağırlıkça yüzde değerleri</i>					
8	2,36 mm				100		
12	1,70 mm			99	85		99

U.S. Standart Elek No	Elek açıklığı	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	Sınıf 5	Sınıf 6
		<i>ağırlıkça yüzde değerleri</i>					
				(en az)	(en az)		(en az)
35	500 µm				25 ± 15		
50	300 µm	90 ± 6	100	40 ± 15			90 (en az)
100	150 µm	50 ± 10		20 ± 10	15 (en fazla)		65 ± 15
120	125 µm		98 (en az)				
200	75 µm	20 ± 6		10 ± 10			30 ± 15
325	45 µm	8 ± 5	75 (en az)			98 (en az)	15 ± 10

Tezin buradan sonraki kısımlarında, deneysel çalışmalarda kullanılan %98 saflıkta ve ortalama 45 µm partikül çapına sahip "derece B, sınıf 5" kategorisindeki HMX, saf HMX olarak adlandırılmıştır.

5.2.1. Numune Hazırlanması

Enerjik malzemenin lazer ile ateşlenme eşik değeri, malzeme karbon siyahı veya ısı absorpsiyonu yüksek olan inert bir bileşen ile karıştırılınca düşmektedir (Opdebeck ve Gillard, 2001; Fang ve Ahmad, 2016). Saf HMX duyarsız bir patlayıcı olması sebebi ile ancak çok yüksek bir ısı etki olursa ateşlenebilmektedir. Bununla beraber saf HMX'in ışın absorpsiyon katsayısı, beyaz renkli bir organik bileşen olması sebebi ile oldukça düşüktür (Ahmad ve Russell, 2009). Saf HMX, yüzeyine gönderilen lazer ışınının önemli miktarını yansıtmaktadır. Saf HMX'in lazer ile ateşlenebilmesi için optik absorpsiyonunu

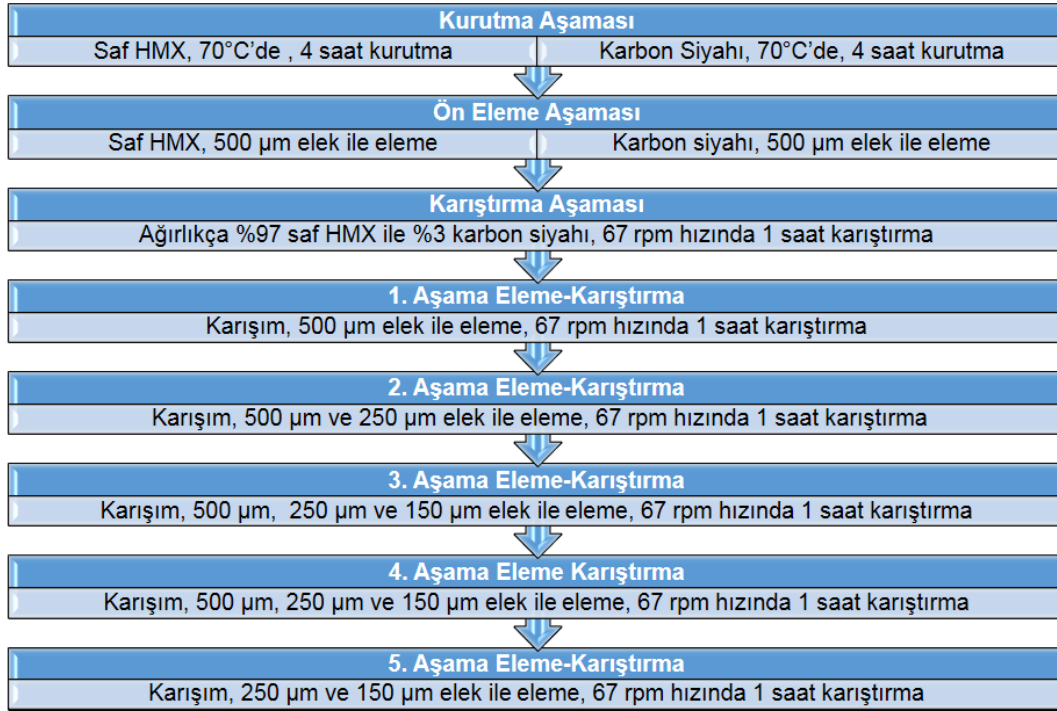
artırmak amacıyla içine karbon siyahı karıştırılmıştır. Saf HMX'in karbon siyahı ile homojen karışımını sağlamak için düşük partikül boyutuna, başka bir deyişle yüksek yüzey alanına sahip karbon siyahı kullanılmıştır.

Saf HMX ağırlıkça %3 oranında, 44 nm partikül boyutlu karbon siyahı ile üç eksenli turbula karıştırıcıda, 50 rpm hızında, 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım incelendiğinde, nemlenme sebebiyle topaklar meydana geldiği görülmüştür. Topaklanmanın giderilmesi amacıyla karışım, 55°C'de 1 saat süre ile kurutulmuştur. Kurutulan karışım, 250 µm elek ile elenmiş ve turbula karıştırıcıda 70 rpm hızında, 30 dakika boyunca tekrar karıştırılmıştır. Şekil 5.2'de 1. katile olarak adlandırılan karışım mikroskop ile incelendiğinde saf HMX'in karbon siyahı ile homojen biçimde kaplanmadığı görülmüştür.

Lazer ateşleme çalışmalarında patlayıcı üzerine düşen lazer ışın demetinin çapı 110 µm olarak bulunmuştur. Bu çapta bir örnek içindeki HMX ve %3 oranında karbon siyahı karışımının homojen dağılımlı olması, karışımın lazer ile ateşlenebilirliği için kritik öneme sahiptir. Karışımında beyaz renkte saf HMX tozlarının bulunması lazer ile ateşlenebilme verimini düşürerek tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesini engellemektedir. HMX ve %3 oranında karbon siyahının homojen bir biçimde karışmasının ve HMX partiküllerinin kaplanmasının sağlandığı Şekil 5.3'te adımları gösterilen yeni bir yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 5.2. Saf HMX ve ağırlıkça %3 karbon siyahı ile kaplanmış HMX (1. katile)

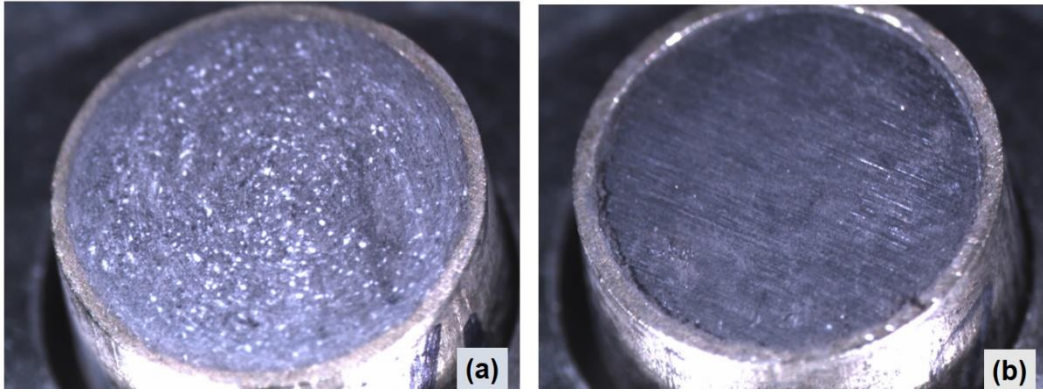


Şekil 5.3. HMX+%3 karbon siyahı karışımı hazırlama yöntemi

Bu yöntemde saf HMX ve karbon siyahı karışımı nemden arındırılmak amacıyla 70 °C'de kurutulmuştur ve karışımda topaklanma oluşumu engellenmiştir. Kurutulan karışım, ön eleme aşamasında 500 µm elek ile elenmiştir. Üç eksenli turbula karıştırıcıda karıştırılan karışım, elek gözenek boyutu kontrollü bir şekilde azaltılarak beş aşamada elenmiştir. Eleme aşamasını izleyen karıştırma yöntemi ile saf HMX partiküllerinin homojen bir şekilde karbon siyahı ile kaplanması sağlanmıştır. Bu yöntem ile hazırlanan karışım 2. katile olarak adlandırılmıştır. 1. ve 2. katile karışımlar kalıba dökülüp sıkıştırıldıktan sonraki yüzeylerinin incelenebilmesi için, her iki karışım 98 mm³ hacmindeki haznelere, eşit yoğunlukta basılmış ve hazne yüzeyleri mikroskop ile incelenmiştir (Şekil 5.4).

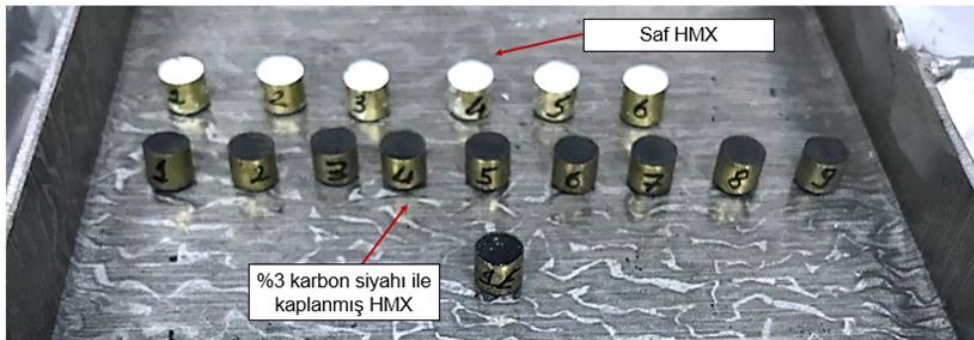
Şekil 5.4(a)'da görüldüğü üzere 1. katile HMX+%3 karbon siyahı karışımında HMX partikülleri karbon siyahı ile tamamen kaplanmamıştır. Hazne yüzeyinde beyaz renkli görünen partiküller, yüzeyi karbon siyahı ile kaplanmamış saf HMX kalıntılarıdır. Şekil 5.4(b)'de görülen 2. katilede, 1. katileye kıyasla, HMX ile karbon siyahının daha homojen biçimde karıştığı ve kaplandığı görülmüştür. Homojen bir karışım elde edilebilmesi için eleme tekrarının artırılmasının ve elek açıklığının kademeli olarak düşürülmesinin etkili olduğu görülmüştür. Bu şekilde HMX partiküllerinin tamamı karbon siyahı ile

kaplanabilmiştir. Bundan sonraki çalışmalara 2. katile HMX+%3 karbon siyahı karışımı ile devam edilmiştir.



Şekil 5.4. (a) 1. Katile ve (b) 2. katile HMX+%3 karbon siyahı karışımlarının kalıba basıldıktan sonra yüzeylerinin mikroskop görüntüsü (Büyütme oranı 3X)

Lazer ateşleme deneyleri için hazırlanan HMX ve HMX+%3 karbon siyahı numunelerinde ateşlemeye etkisi bilinmediği için bağlayıcı kullanılmamıştır. Bağlayıcı bulunmaması sebebiyle HMX ve HMX+%3 karbon siyahı karışımı numuneleri 300 kg yük uygulanmasına rağmen pelet haline getirilememiştir. Bu nedenle toz bileşenler 98 mm³ hacminde (çap: 5 mm, yükseklik: 5 mm) haznelere, pnömatik pres ile 300 kg yük uygulanarak basılmıştır (Şekil 5.5). Haznelere basılmış HMX yoğunlukları 1,66 g/cm³ olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 5.5. Haznelere basılmış saf ve karbon siyahı ile kaplı HMX

5.2.2. Karakterizasyon

5.2.2.1. Yoğunluk

Yoğunluk ölçümü helyum piknometresi (Accupyc II 1345, Micromeritics, USA) ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile yoğunluk belirleme, He gazının katı numune ile yer değiştirmesi sonucu ortamdaki basınç değişiminin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Piknometrenin cihaz haznesi He gazı ile doldurulmakta ve ortam basıncı ölçülerek referans basınç değeri belirlenmektedir. Yoğunluğu ölçülecek olan numune bu hazneye doldurulduktan sonra aynı miktar ve basınçta He gazı gönderilerek ortam basıncı tekrar ölçülmektedir. Referans basınç ve ölçülen basınç arasındaki fark ve hazne hacmi kullanılarak numune yoğunluğu tayin edilmektedir. HMX için bu ölçüm on tekrar ile yapılmıştır ve Çizelge 5.2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu tabloda yoğunluk, tek bir HMX partikülün yoğunluğunu ifade eden teorik maksimum yoğunluk (ing. theoretical maximum density, TMD) değeridir.

Çizelge 5.2. HMX için piknometre ile yoğunluk analizi sonuçları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
HMX (%98, derece B, sınıf 5)	1,8992
HMX+%3 karbon siyahı	1,9084
Standart sapma	0,0013 g/cm ³

TMD değeri ile peletin teorik maksimum hacmi hesaplanabilmekte ve ölçülen pelet hacminden pelet içindeki boşluk oranı bulunabilmektedir. Farklı yükler uygulanarak sıkıştırılan HMX peletinin porozitesi belirlenebilmektedir.

5.2.2.2. Tutuşma Sıcaklığı

HMX için zincirleme ayrışma tepkimeleri kabaca aşağıdaki gibidir:

- Endotermik tepkimeler:
Beta HMX -----> Delta HMX
Delta HMX -----> Katı faz ara ürünler
- Ekzotermik tepkimeler:

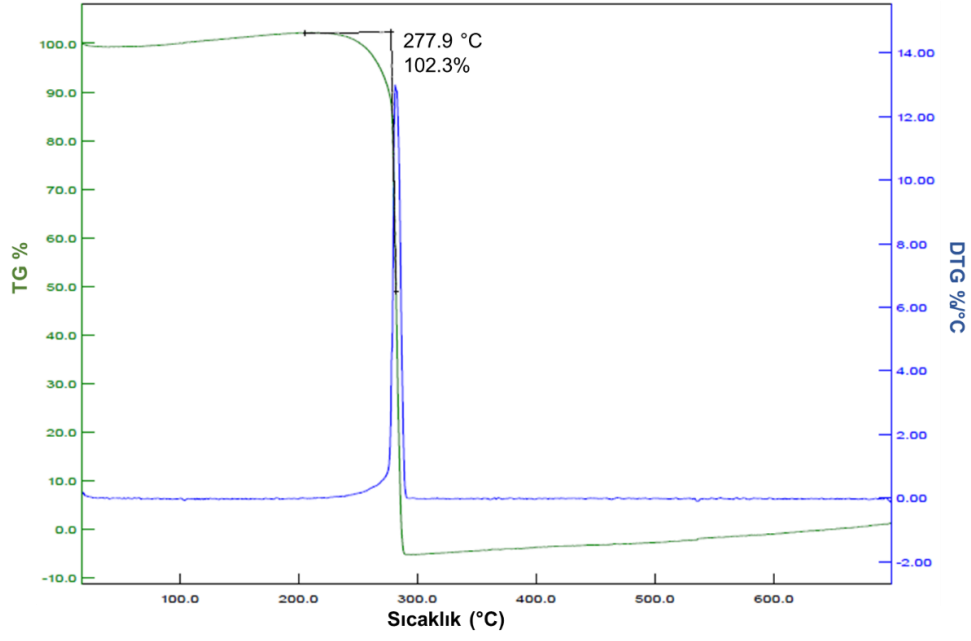
Katı faz ara ürünler -----> Gaz faz ara ürünler (CH₂O, N₂O, HCN, HNO₂)

Gaz faz ara ürünler -----> Son ürünler (CO₂, H₂O, N₂, CO)

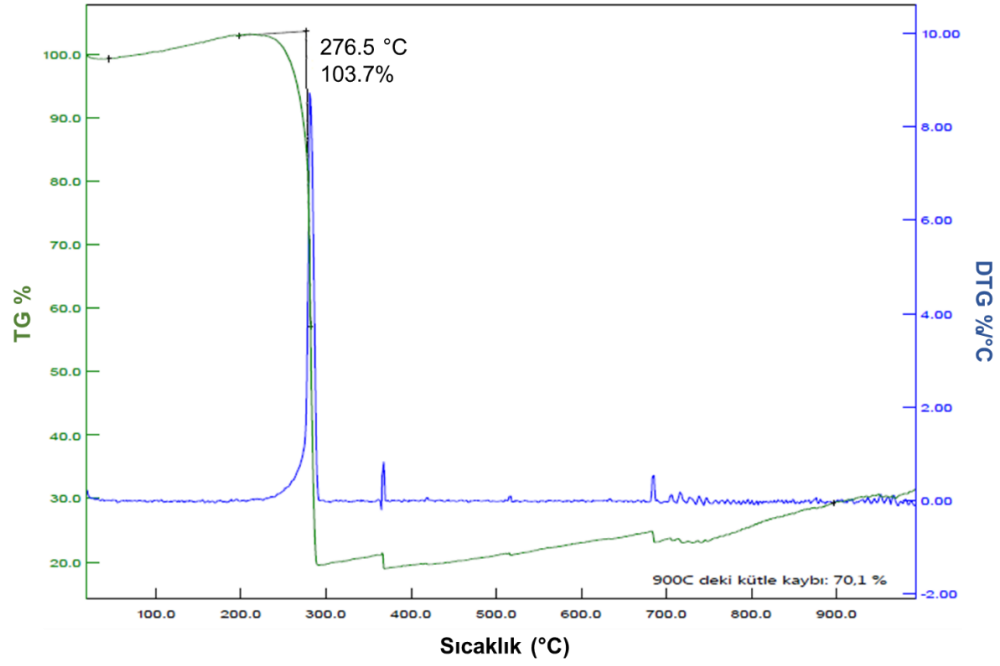
HMX kendiliğinden tutuşma sıcaklığına (ing. autoignition temperature) ulaşmadan önce, moleküler bağların kırıldığı endotermik tepkimeler ile katı fazında ara ürünler açığa çıkmaktadır. Tutuşma sıcaklığına ulaşıldığında, gaz fazındaki ürünlerin açığa çıktığı, HMX ayrışma tepkimeleri iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada CH₂O ve N₂O gibi ara ürünlerin oluştuğu ekzotermik tepkime meydana gelmektedir. HMX kimyasal enerjisinin çoğu, ikinci aşama ekzotermik ikinci dereceden ayrışma tepkimesinde açığa çıkmaktadır (Tarver, 2004).

Saf HMX ve HMX+%3 karbon siyahı karışımının tutuşma sıcaklıkları TGA (Pyris 1, Perkin Elmer, USA) ve DSC (Diamond, Perkin Elmer, USA) termogram analizleri ile belirlenmiştir. Analiz, 1 mg'dan az miktardaki numuneler ile ortam sıcaklığından 700°C sıcaklığa kadar, 10°C/dak. hızla sıcaklık taraması yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6'da DSC sonucu elde edilen termogramda görülen ilk ekzotermik pik, numunenin tutuşma sıcaklığını vermektedir. Saf HMX'te kütle kaybı 277,9 °C'de gerçekleşmiştir (Şekil 5.6). HMX için TGA termogramındaki keskin pik HMX kütle kaybının hızlı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bunun sebebi HMX'in patlayıcı sınıfında olması dolayısıyla ekzotermik tepkime hızının diğer yanıcı bileşenlere kıyasla çok daha yüksek olmasıdır.

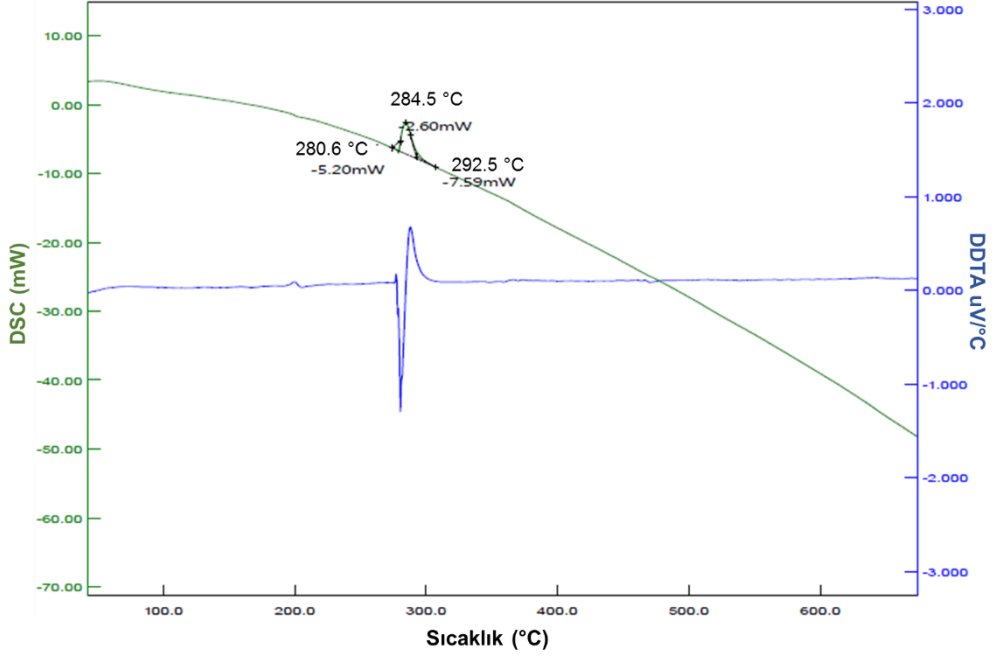
Karbon siyahı ve HMX karışımında kütle kaybı 276,5 °C'de gerçekleşmiştir (Şekil 5.7). Saf HMX ve HMX+%3 karbon siyahı karışımı için TGA sonuçları kıyaslandığında, karbon siyahı içeren HMX karışımında kütle kaybı, saf HMX'e göre daha hızlı gerçekleşmiştir.



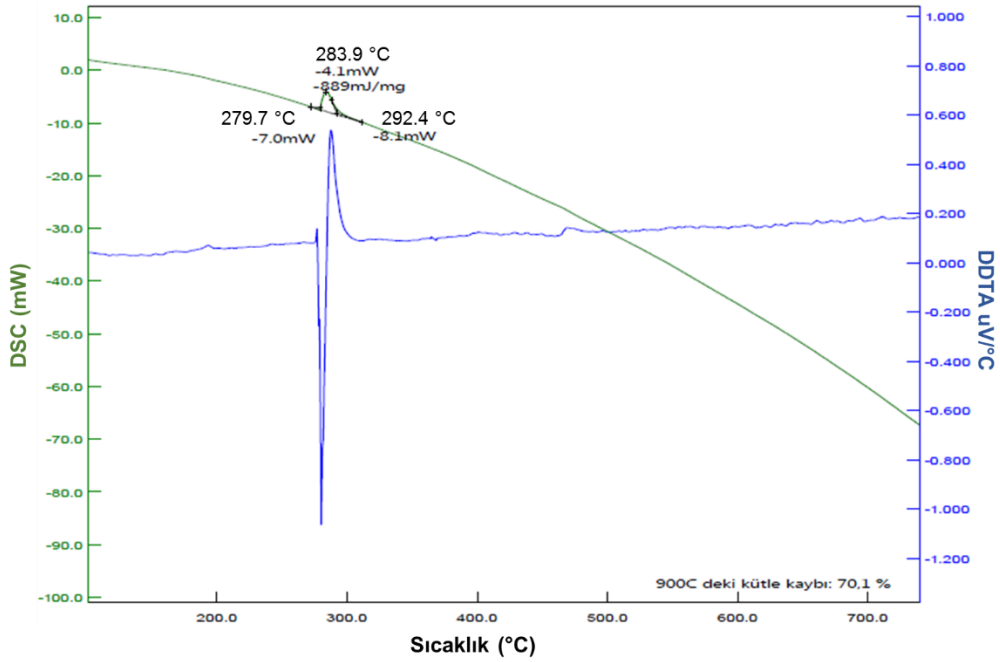
Şekil 5.6. Saf HMX için TGA sonucu elde edilen termogram



Şekil 5.7. HMX+%3 karbon siyahı karışımı için TGA termogramı



Şekil 5.8. Saf HMX için DSC termogramı



Şekil 5.9. HMX+%3 karbon siyahı karışımı için DSC termogramı

Saf HMX ve HMX+%3 karbon siyahı için yapılan DSC analizleri sonucunda (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9) yaklaşık 200 °C'de moleküler bağların koptuğu bir endotermik tepkimenin meydana geldiği belirlenmiştir. Gaz fazında ürünlerin açığa çıktığı ekzotermik ayrışma tepkimeleri ise saf HMX ve HMX+%3 karbon siyahı için aynıdır. HMX tutuşma sıcaklığının 284 °C olduğu belirlenmiştir.

5.2.2.3. Kalorifik Enerji

Saf HMX ve HMX+%3 karbon siyahı karışımı için kalorifik enerji değerleri bir kalorimetre (Parr – 6200, Isoperbol Calorimeter, USA) ile belirlenmiştir. Bu ölçüm yönteminde kalorimetre cihazına ait bomba içine yerleştirilen numunelere 10 cm uzunluğunda ateşleme teli geçirilmekte ve bombanın içi 25 bar basınçta Ar gazı ile doldurulmaktadır. Kalorimetre haznesi ortam sıcaklığında $2000 \pm 0,5$ g ağırlığında saf su ile doldurulmaktadır. Ateşleme telinden akım geçirilerek numunenin yanması sağlanmaktadır. Numunenin yanması sonucu açığa çıkan ısı bombanın çevresindeki saf suyu ısıtmakta ve saf su sıcaklık değişiminin ölçülmesi ile numunenin kalorifik enerjisi hesaplanmaktadır. Kalorimetre cihazı ölçümleri üç tekrar ile gerçekleştirilmiştir. Saf HMX kalorifik enerji değeri ortalaması 1312,8 cal/g, HMX+%3 karbon siyahı kalorifik enerji değeri ortalaması 1226,8 cal/g bulunmuştur. Her iki numunenin kalorifik enerji değerleri kıyaslandığında, ağırlıkça %3 oranında karbon siyahı eklenmesi ile HMX kalorifik enerji değerinin %6,55 oranında düştüğü görülmüştür.

5.3. ZPP

ZPP (zirkonyum potasyum perklorat), yanıcı olarak zirkonyum metal tozu, oksitleyici olarak potasyum perklorat içeren bir piroteknik bileşendir.

5.3.1. Karakterizasyon

5.3.1.1. Yoğunluk

ZPP yoğunluk ölçümü helyum piknometresi (Accupyc II 1345, Micromeritics, USA) ile on tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. ZPP partikül yoğunluğu olarak belirlenen teorik maksimum yoğunluk (ing. theoretical maximum density, TMD) $3,6350 \pm 0,0030$ g/cm³ bulunmuştur.

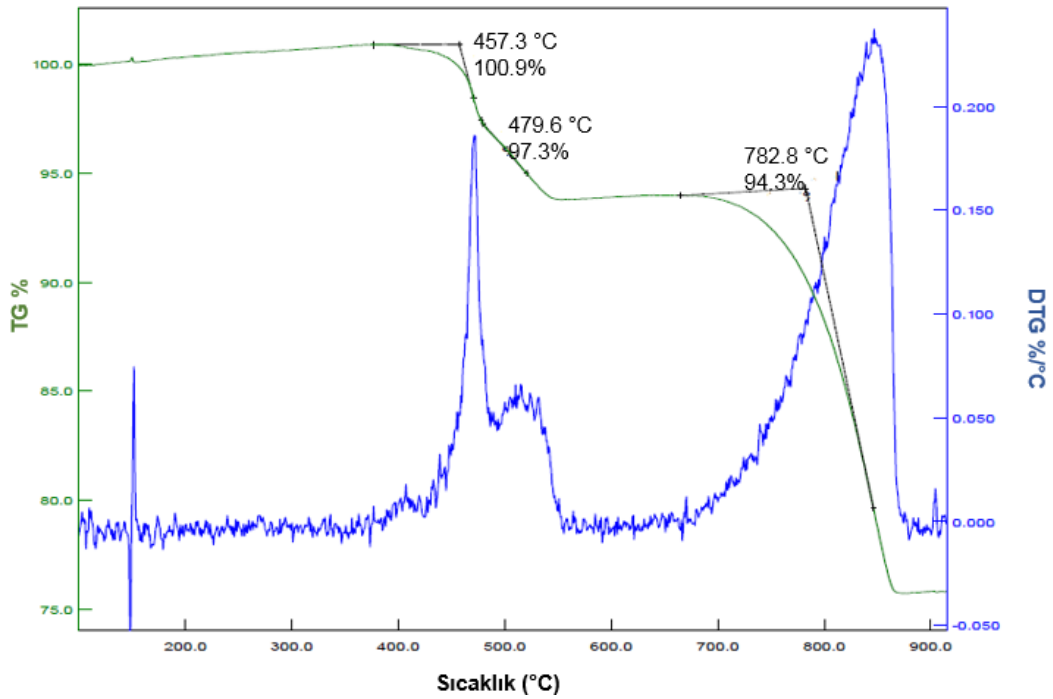
5.3.1.2. Tutuşma Sıcaklığı

ZPP'nin ayrışması $2Zr + KClO_4 \rightarrow 2ZrO_2 + KCl$ tepkimesi ile gerçekleşmektedir (Khan, Malik ve Lodhi, 2017).

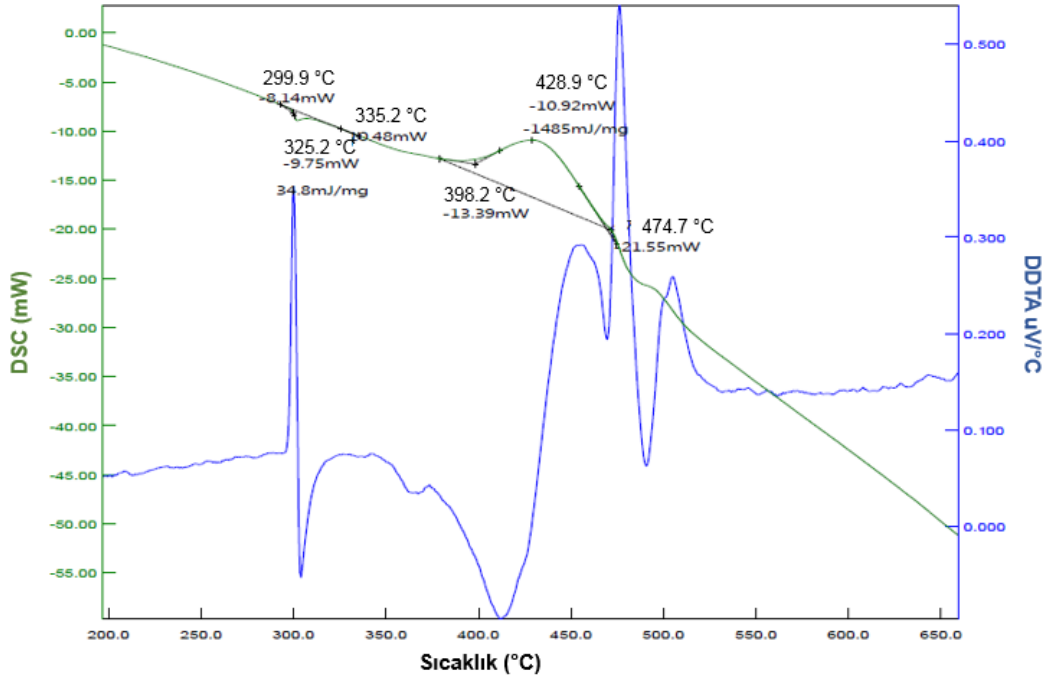
ZPP tutuşma sıcaklığı TGA (Pyris 1, Perkin Elmer, USA) ve DSC (Diamond, Perkin Elmer, USA) yöntemleri ile belirlenmiştir. Analiz 1 mg'dan az miktardaki numuneler ile ortam sıcaklığından 700°C sıcaklığa kadar, 10 °C/dak. hızla sıcaklık taraması yapılarak gerçekleştirilmiştir. DSC termogram sonuçlarında elde edilen ilk ekzotermik pik, ZPP'nin tutuşma sıcaklığını vermektedir.

Termogravimetrik analiz sonucu (şekil 5.10), ZPP tutuşma sıcaklığı 457 °C'de gerçekleşen kütle kaybının 782,8 °C'ye kadar devam ettiğini göstermektedir. Yaklaşık 150 °C'de görülen kütle artışı en başta cihazın Ar gazı ile yeteri kadar şartlandırılmamış olması ile ilgili bir sapma olarak değerlendirilmiştir.

ZPP'nin DSC analizinde (şekil 5.11) 300 °C'de görülen endotermik pik $KClO_4$ kristal fazının ortorombik yapıdan kübik yapıya geçişine ilişkin faz dönüşümünü temsil etmektedir (Berger, 1995). 428 °C'de görülen keskin ekzotermik pik Zr ve $KClO_4$ yanma tepkimesine aittir ve bu sıcaklık ZPP'nin tutuşma sıcaklığıdır.



şekil 5.10. ZPP için TGA termogramı



Şekil 5.11. ZPP için DSC termogramı

5.3.1.3. Kalorifik Enerji

ZPP ile kalorimetre (Parr – 6200, Isoperbol Calorimeter, USA) ölçümleri üç tekrar ile gerçekleştirilmiştir ve yoğunluğu ortalama 1364,3cal/g olarak belirlenmiştir. ZPP ve HMX (1312,8 cal/g) kalorifik enerjilerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Yanma tepkimesi sonucu oluşan basıncı, tepkime hızı belirlemektedir. Başka bir deyişle, tepkimeye giren bileşenin moleküler bağlarında bulundurduğu enerjiyi açığa çıkarma süresine göre oluşan basınç çıktısı ve buna bağlı olarak tahrip gücü değişmektedir. ZPP bir piroteknik bileşen olduğu için duyarsız patlayıcı olan HMX'e göre yanma hızı daha düşüktür. Buna bağlı olarak kütlice aynı miktarda HMX'in basınç çıktısı, ZPP'ye göre çok daha yüksektir.

5.4. ZPP + HMX

Duyarsız bir patlayıcı olan HMX'in mevcut lazer ateşleme sistemi ile sürdürülebilir şekilde ateşlenmesi sağlanamamıştır. Bu nedenle, ateşlemeyi başlatıcı arayüz olarak ZPP piroteknik bileşeni kullanılmıştır. ZPP'nin ateşlenmesi sonucu açığa çıkan yüksek sıcaklıkta ve basınçtaki gazlar sayesinde ZPP ile temas halinde bulunan HMX'te sürdürülebilir yanma tepkimelerinin başlaması sağlanmıştır.

Ateşleyici gövdesindeki PMMA plaka üzerine PEEK (polieter eter keton) yalıtım haznesi yerleştirilmiştir. Bu hazne içine pnömatik pres ile 91 kg yük uygulanarak, 15 mg ZPP basılmıştır. ZPP üzerine 50 mg HMX iki farklı yük, 26 kg veya 91 kg, uygulanarak preslenmiştir. Böylelikle farklı yoğunluklarda HMX'in sistem performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ateşleyici gövdesi içindeki ZPP yoğunluğu deneysel çalışmalarda $2,65 \text{ g/cm}^3$ olmak üzere sabit tutulmuş, HMX yoğunlukları $1,32 \text{ g/cm}^3$ ve $1,48 \text{ g/cm}^3$ olacak şekilde değiştirilmiştir.

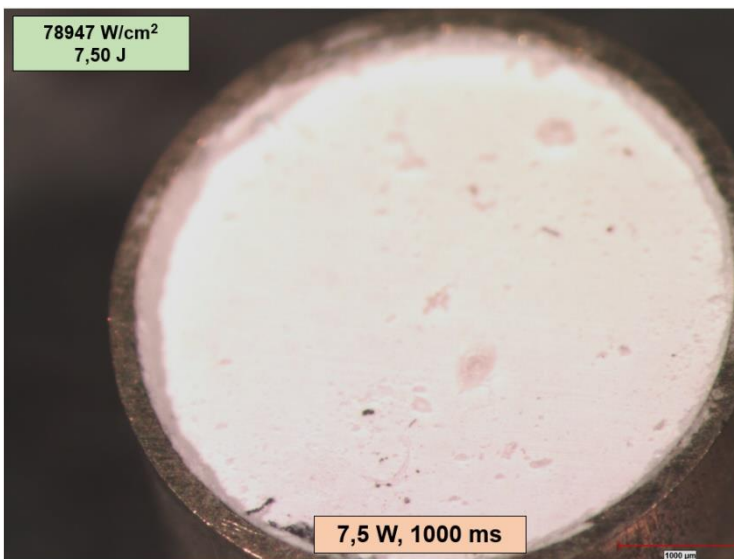
524 mW gücünde lazer ışını ZPP+HMX yüzeyine 50 ms süre ile gönderilmiştir. 10 cm^3 hacme sahip bir kapalı bombada gerçekleşen ateşleme olayında basıncın zamana bağlı değişimi ölçülmüştür.

5.5. Lazer Ateşleme Sonuçları

5.5.1. HMX

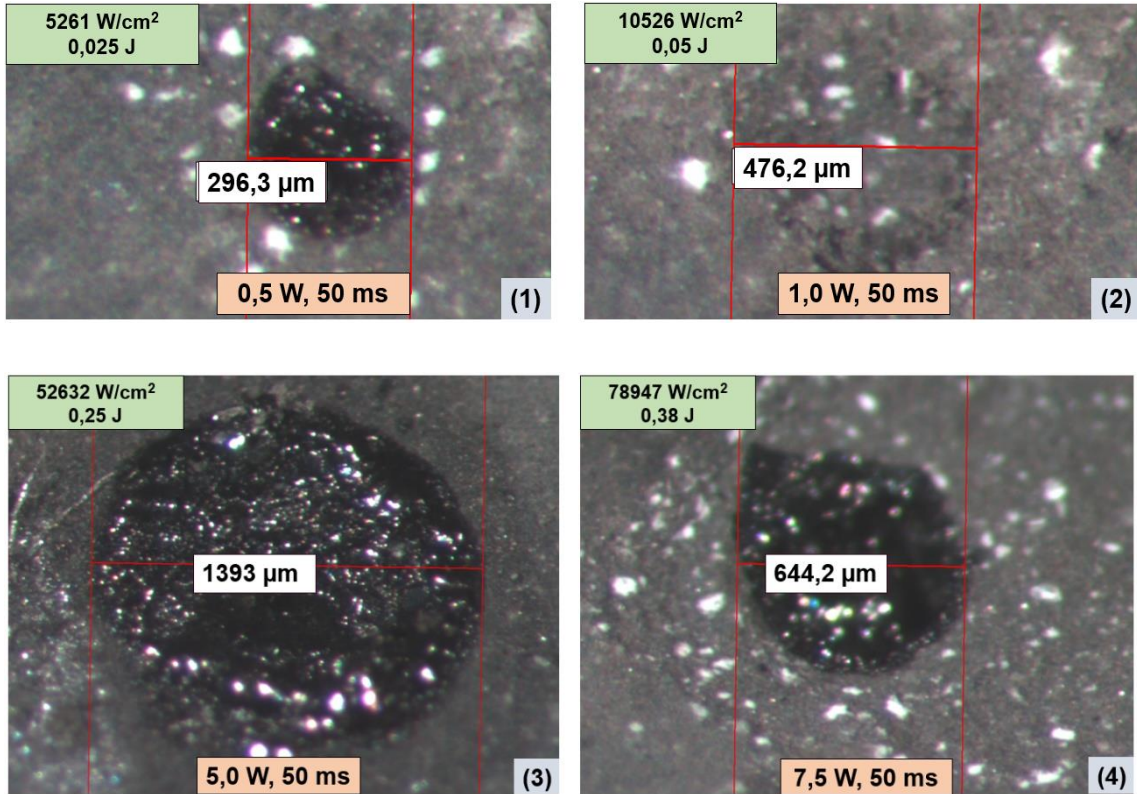
HMX numunelerinin bulunduğu haznelere lazer ışını, gücü ve süresi değiştirilerek gönderilmiştir. Lazer ışının çapı $110 \text{ }\mu\text{m}$ ve patlayıcı yüzeyinde uygulandığı alan $9,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 'dir.

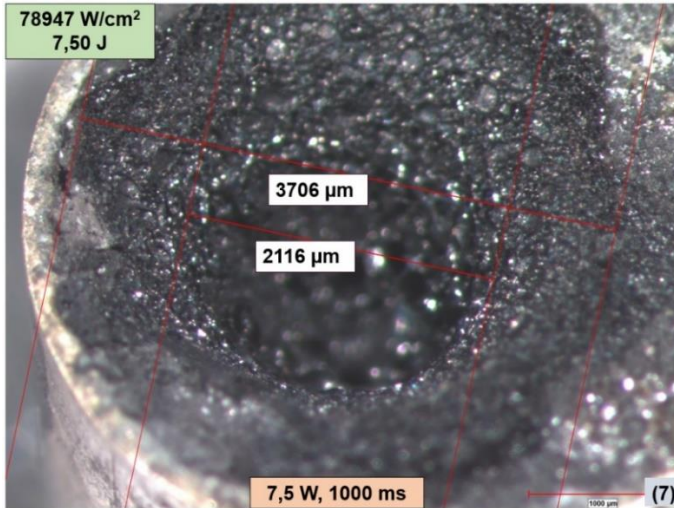
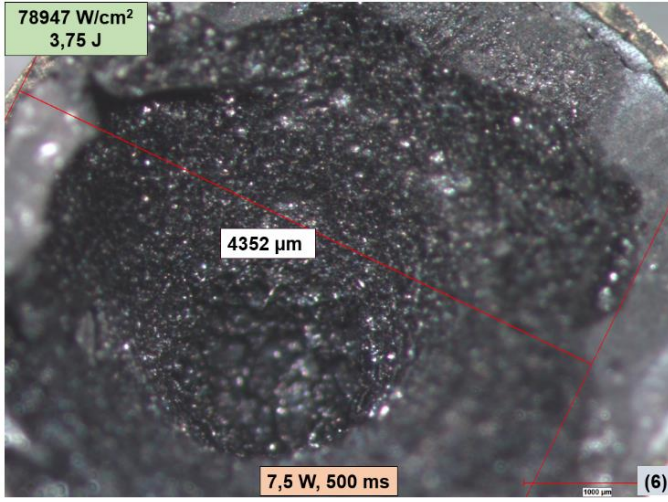
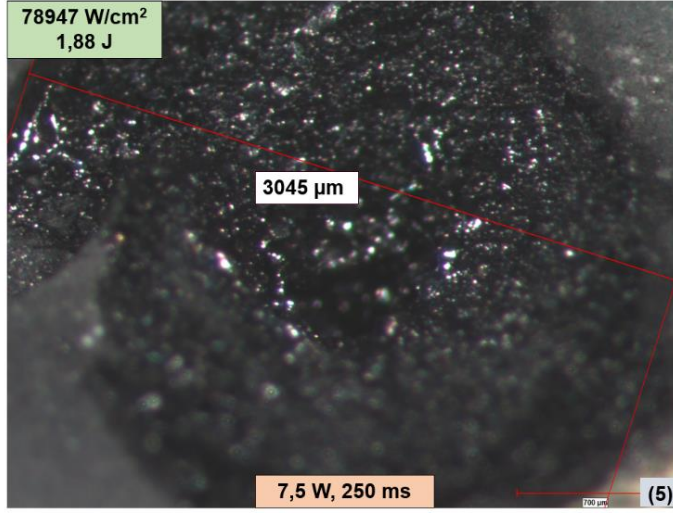
Saf HMX, lazer ışını absorpsiyon katsayısı çok düşük olduğu için yüzeyine düşen ışını yüksek miktarını yansıtmaktadır. Bu sebeple Şekil 5.12'de görüldüğü üzere, 7,50 J kadar yüksek bir enerjiye sahip ışının saf HMX yüzeyine etkisi olmamıştır.



Şekil 5.12. Lazer uygulanan HMX numunesinin yüzeyinin mikroskop görüntüsü

Şekil 5.13'te karbon siyahı içeren HMX numunesi yüzeyine gönderilen farklı enerjideki ışınların numune yüzeyinde kimyasal tepkimeleri başlatabildiği görülmektedir. Numunelerin yüzeyinde tepkimeye giren bölgeler optik mikroskop ile incelenerek bu alanların çapı ölçülmüştür. HMX yüzeyine gönderilen ışın enerjisi arttıkça, tepkimeye giren bölgelerin alanı, başka bir deyişle tepkimeye giren HMX miktarı artmıştır; ancak HMX yüzeyinde başlayan tepkime, sürdürülebilir ateşlenmenin (ign. sustainable ignition) gerçekleşmesi için yeterli olmamıştır. Sadece HMX içeren ve karbon siyahı ile karıştırılmış HMX içeren numunelerin yüzeyine 7,5 J enerjiye sahip ışın gönderildikten sonra yüzeyleri kıyaslanmıştır. Karbon siyahı içeren HMX numunesinin yüzeyinde oluşan kütle kaybının, ayrışma tepkimelerinin başladığına işaret ettiği sonucuna varılmıştır. Saf HMX numunesine gönderilen aynı enerjiye sahip ışın numune yüzeyinde ayrışma tepkimeleri başlatamamıştır.

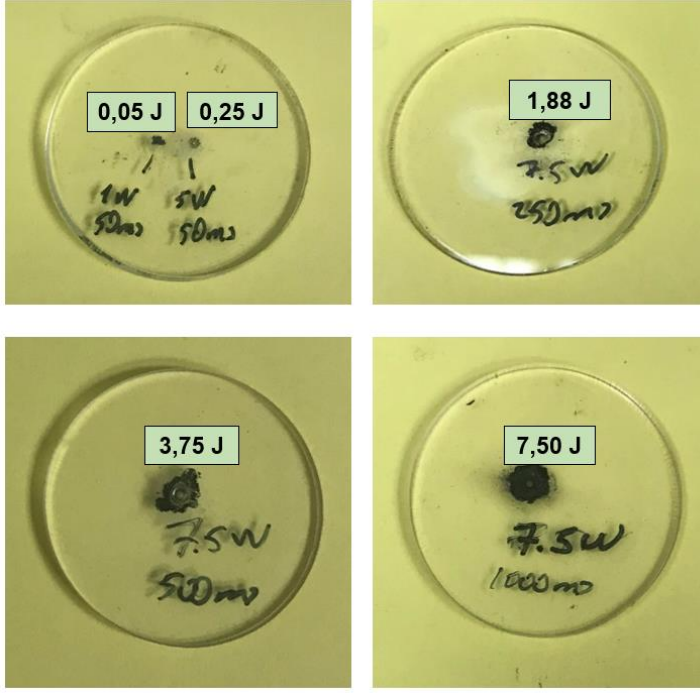




Şekil 5.13. Karbon siyahı ile kaplanmış HMX lazer ateşleme sonrası mikroskop görüntüleri

HMX'in karbon siyahı ile karıştırılması, numunenin ışın absorpsiyonunu arttırmıştır; ancak gönderilen ışın yüzey alanının çok küçük olması sebebi ile karışımda sürdürülebilir ateşlenme gerçekleşmemiştir. 110 µm çapında bir lazer ışını patlayıcı numune yüzeyinde $9,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 'lik bir alana gönderildiğinde bu yüzeyde çok yüksek bir enerji yoğunluğu meydana gelmektedir. Işının temas ettiği alanda oluşan ısı ile bu alan yüksek sıcaklıklara çıkmakta ve yüzeyde krater oluşumu gözlenmektedir. Patlayıcıda sürdürülebilir bir ateşlemenin gerçekleşmesi için oluşan ısının patlayıcı yüzeyinde dağılması gerekmektedir ve bunun için yüzeye daha büyük çaplı bir ışın gönderilmelidir (Fang ve Ahmad, 2018). Lazer ışınının çapı küçük olduğunda patlayıcı yüzeyinde radyal yönde oluşan ısı kayıpları daha fazladır. Bu sebeple patlayıcı ateşlemek için gerekli olan lazer enerjisi eşik değeri artmaktadır. Lazer ışın çapı büyük olduğunda açığa çıkan ısının patlayıcı yüzeyinde daha kolay ilerleyebilmesi ile yüzeydeki ısı kayıpları düşük olmakta ve böylece patlayıcı ateşlenme eşik değeri düşmektedir (Duginov ve Khanef, 2011). Literatür çalışmalarında, karbon siyahı içeren HMX numunelerinin, lazer ışın çapı 400 µm ve enerji yoğunluğu yaklaşık 3000 W/cm^2 olduğu durumda sürdürülebilir şekilde ateşlenebildiği belirlenmiştir (Ali, Son, Asay ve ark., 2003, Ahmad ve Russell, 2009, Fang ve Ahmad, 2018). Bu çalışmada 110 µm çapında ve 78947 W/cm^2 gibi yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını kullanılmasına rağmen karbon siyahı içeren HMX numunelerinin sürdürülebilir şekilde ateşlenmesi gerçekleşmemiştir.

Karbon siyahı içeren HMX numunelerini lazer ile ateşleme çalışmalarında, patlayıcının basıldığı haznenin önüne 2 mm kalınlığında PMMA plakalar yerleştirilmiştir. Böylelikle ateşlenme sırasında açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki yanma ürünlerinden lazer merceği sisteminin korunması amaçlanmıştır. Şekil 5.14, lazer ışınının enerjisi arttıkça PMMA plakalarda ışının gönderildiği bölgede hasar meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle 7,5 W gücünde lazer ışını uygulandığında açığa çıkan ısının PMMA yüzeyinde delinmelere yol açtığı belirlenmiştir. Bu nedenle tezin ileriki bölümlerini kapsayan ve kapalı sistem olması gereken uçan plaka geliştirme çalışmalarında kullanılan lazer ışınları ile 1 W lazer ışın gücünün üzerine çıkılmamıştır.



Şekil 5.14. Lazer ile ateşleme sonrası PMMA plakaların görüntüleri

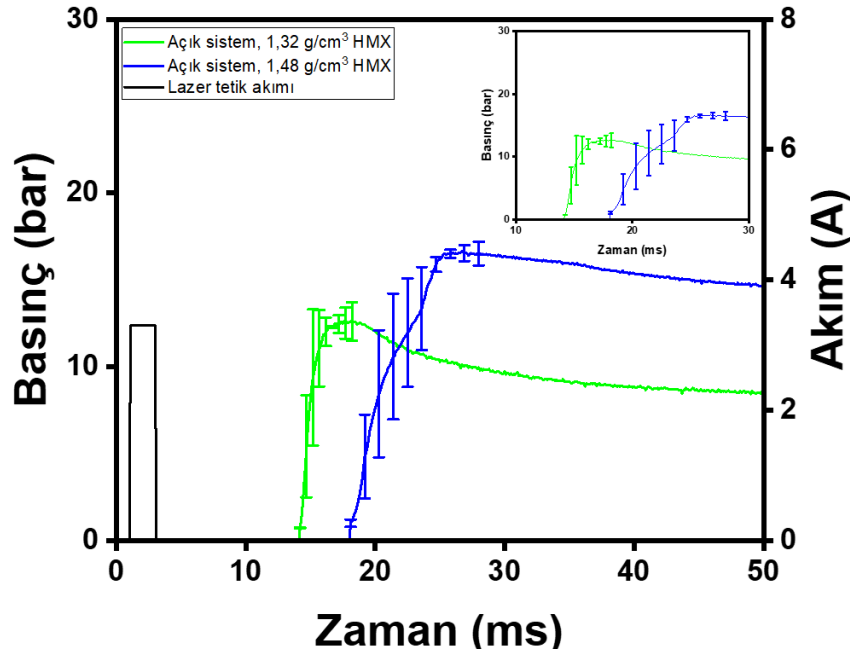
5.5.2. ZPP

ZPP bir piroteknik bileşen olduğundan ateşlenme eşik değeri duyarsız bir patlayıcı olan HMX'e kıyasla daha düşüktür, yani ateşlenme hassasiyeti daha yüksektir. ZPP'nin lazer ile ateşlenme seviyesinin belirlenmesi için Bruceton testi uygulanmıştır. Bruceton testi, bileşenin ateşlenme eşğine ilişkin güvenilirlik ve kesinlik seviyelerinin belirlendiği istatistiksel bir yöntemdir (Lee ve Hsua, 2001; Kızılırmak, 2019). Bruceton testi ve Neyer yazılımı analizine göre ZPP pirotekniğinin 270 mW gücünde bir lazer ışını ile 20 ms'de %95 güvenilirlikte ve %99 kesinlikte ateşlenebildiği belirlenmiştir.

5.5.3. ZPP + HMX

Şekil 5.15, 1,32 ve 1,48 g/cm³ HMX içeren ZPP+HMX numunelerinde 524 mW güce sahip lazer ışını uygulandığında sürdürülebilir ateşlenme gerçekleştiğini göstermektedir. Çizelge 5.3'te verildiği üzere yüksek HMX yoğunluğunda yanma hızı, düşük HMX yoğunluğuna sahip sisteme göre daha yüksektir. Bu sonuç ile uyumlu olarak yüksek HMX yoğunluğu için daha yüksek tepe basıncına ulaşılmıştır. HMX yoğunluğu arttıkça numune içindeki boşluk oranı azalmaktadır. Buna bağlı olarak yüksek HMX yoğunluğuna sahip numune, kapalı sistem (sınırlandırılmış yapı) davranışına yaklaşmış

ve Bölüm 6.2.2.1’de verilen sonuçlar ile uyumlu olarak daha yüksek basınç çıktısı elde edilmiştir.



Şekil 5.15. Lazer ile ateşlenen ZPP+HMX’de basıncın zaman ile değişimi

Çizelge 5.3. ZPP+HMX’in lazer ile ateşlenme verileri

HMX Yoğunluğu (g/cm ³)	Ateşlenme Enerjisi (mJ)	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)	Yanma Hızı (mm/ms)
1,32	9,3±4,6	17,7±8,8	13,8±0,2	2,9±1,6	1,0±0,5
1,48	10,7±1,9	23,0±2,2	18,6±1,9	6,0±2,3	0,6±0,4

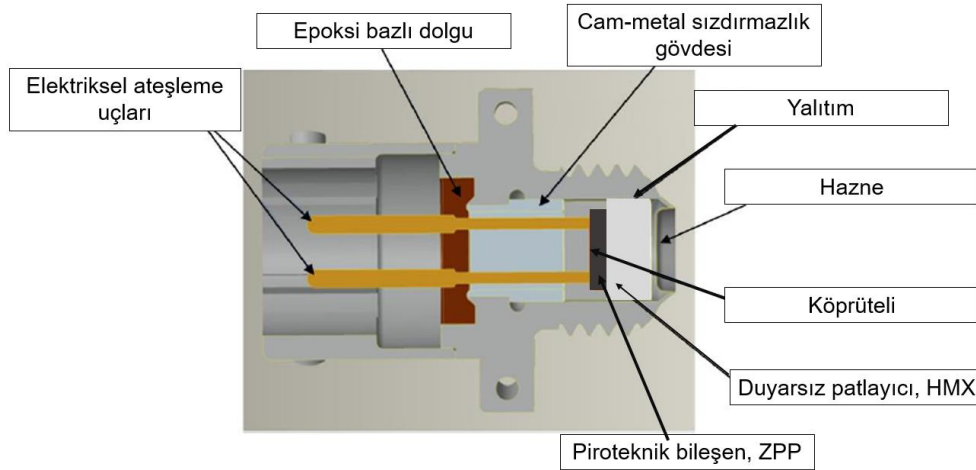
6. ZPP + HMX’i ATEŞLEMEDE ELEKTRİK ve LAZER YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Elektriksel Yöntemle Ateşleme

6.1.1. Numune Hazırlama ve Test Yöntemi

NASA standart ateşleyici (Varghese, 1988; Moore, Roberson, Morgan ve ark., 2016) tasarımına uygun olarak üretilen bir elektriksel ateşleyici sistem (Şekil 6.1) ile ZPP+HMX elektriksel yöntemle ateşlenmiştir.

Şekil 6.1’de (Moore, Roberson, Morgan ve ark., 2016) şematik gösterimi verilen NASA standart ateşleyici (ing. NASA standard initiator, NSI), 50 ms boyunca 3,5 A doğru akımın gönderilmesi ile ateşlenmiştir. Ateşleyicide köprüteli üzerinden akım geçirilmesi sonucu ilk olarak köprüteli ile temas halindeki ZPP ateşlenmesi gerçekleşmiştir. Isınan köprütelinden kondüksiyon ısı aktarım mekanizması ile başlayan ZPP yanma tepkimeleri, ZPP’de radyal ve eksenel yönde hem kondüksiyon hem de ZPP peleti boşluklarında konveksiyon ısı aktarım mekanizması ile ilerlemiştir. ZPP ateşlenmesi ile kapalı ve sızdırmaz sistemde oluşan yüksek sıcaklık ve basınçtaki gazlar HMX ateşlenme tepkimelerini başlatmıştır.



Şekil 6.1. NASA standardına uygun ZPP+HMX elektriksel ateşleme sisteminin şematik gösterimi (Moore, Roberson, Morgan ve ark., 2016)

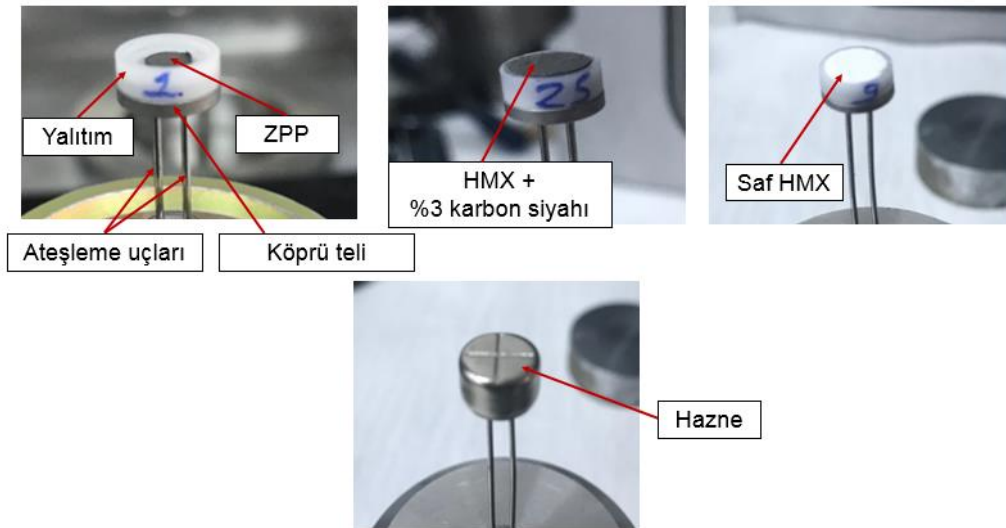
Ateşleyicide ZPP, ateşlenme arayüzünü oluşturmaktadır. Ateşleyicide basınç HMX'in yanması sonucu elde edilmektedir. Bu sebeple ateşleyicide ZPP miktarı, HMX miktarından daha azdır. Elektriksel ateşleyici üretiminde 15 mg ZPP, 50 mg HMX kullanılmıştır. Ateşleyicideki ZPP yoğunluğu $2,65 \text{ g/cm}^3$ değerinde sabit tutulmuştur.

MIL-SDT-1751A askeri standardında (2001), presleme basıncına karşılık elde edilecek HMX yoğunlukları ve teorik maksimum yoğunluk yüzdeleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. HMX pres basıncına karşılık yoğunluk değerleri

Patlayıcı	Presleme Basıncı (psi x 10^3)	Yoğunluk (g/cm^3)	Teorik Maksimum Yoğunluk %
HMX	8	1,517	79,7
	16	1,627	85,5
	32	1,718	90,3
	64	1,814	95,3

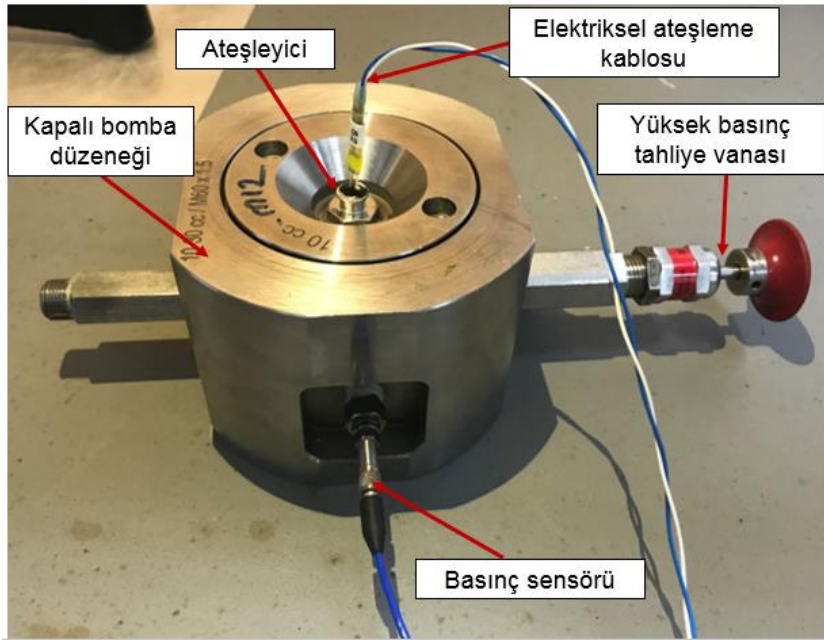
Neminden arındırmak amacıyla 70°C sıcaklıkta 3 saat süre ile kurutulan HMX tozu standartta verilen presleme basıncı ile sıkıştırılmıştır. Preslenen HMX miktarı, çapı ve yüksekliği ile HMX yoğunlukları deneysel olarak hesaplanmış ve standart verileri doğrulanmıştır. $1,32 \text{ g/cm}^3$, $1,48 \text{ g/cm}^3$ ve $1,58 \text{ g/cm}^3$ yoğunluklarında saf HMX ve %3 karbon siyahı içeren ateşleyiciler üretilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. NASA standardında ateşleyici tasarımına göre üretilen, ZPP, $1,32 \text{ g/cm}^3$, $1,48 \text{ g/cm}^3$ ve $1,58 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğunda saf HMX ve %3 karbon siyahı içeren HMX yerleştirildikten sonra kapatılan elektriksel ateşleyici

Ateşleme uçlarına sahip ateşleyici gövdeleri, cam-metal sızdırmazlık yöntemi ile üretilmiştir. Ateşleme uçlarına elektriksel devreyi tamamlamak amacıyla köprüteli eklenmiştir. PEEK yalıtım malzemesi geçirilen ateşleyici gövdesindeki köprüteli üzerine ZPP piroteknik tozu pnömatik pres ile 50 kg yük uygulanarak basılmıştır. ZPP üzerine saf HMX veya ağırlıkça %3 karbon siyahı içeren HMX tozu preslenmiştir. HMX tozu 50 kg, 150 kg ve 300 kg farklı yüklerde preslenerek farklı yoğunluklar elde edilmiştir. Piroteknik toz ve patlayıcıdan oluşan ateşleyici gövdesini kapalı ve sızdırmaz hale getirmek için gövdeye hazne yerleştirilmiştir. Gövde-hazne arayüzüne ise mekanik dayanımı yüksek dolgu malzemesi uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalarda her ateşleyici konfigürasyonunda ateşlenme akımı, akım süresi, ZPP yoğunluğu ve miktarı ile HMX miktarı sabit tutulmuştur. HMX yoğunlukları değiştirilerek, saf HMX ve karbon siyahı içeren HMX numunelerinin ateşlenme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 6.3'te verilen kapalı bomba düzeneği ile ateşleyicilerin basınç-zaman verileri toplanmıştır.

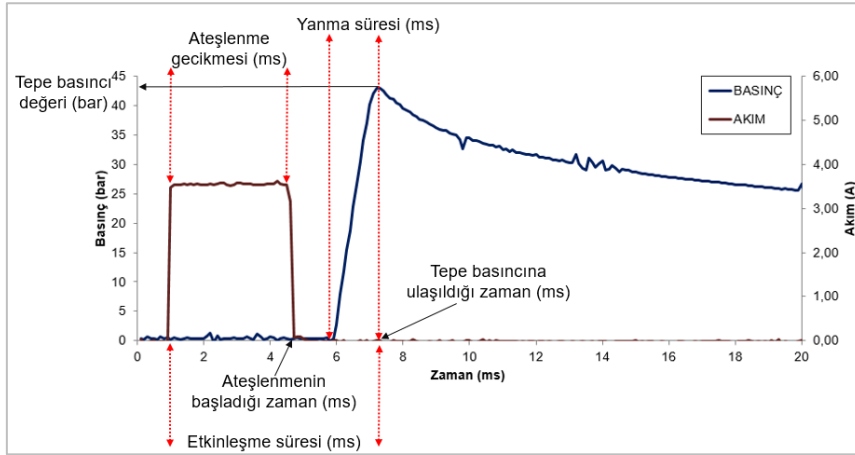


Şekil 6.3. Kapalı bomba düzeneği

Hacmi 10 cm³ olan kapalı bombaya entegre edilen ateşleyici, 50 ms süre ile 3,5 A akım verilerek ateşlenmiştir. Ateşleyici kablosundaki akımın zaman ile değişimi, akımölçer (80i-110s, Fluke, Fransa) ile belirlenmiş ve böylelikle ateşlenme gecikmesi hesaplanmıştır. Kapalı bombada yer alan veri toplama sistemine bağlı basınç sensörü

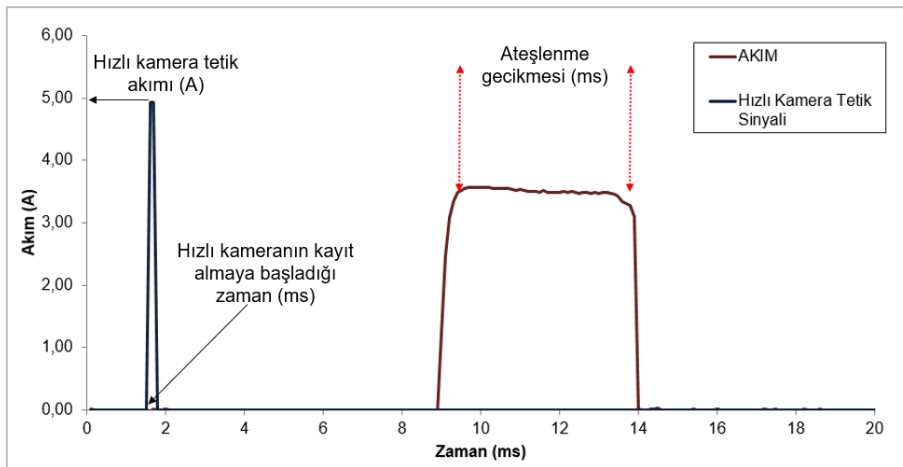
(113B22, PCB Piezotronics, ABD) ile yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan basıncın zaman ile değişimi, 0,1 ms aralıklarla ölçülmüştür. Kapalı bomba deneylerine ek olarak, ateşleyicilerin ateşlenme görüntüleri hızlı kamera ile kayıt altına alınmıştır.

Kapalı bombada ateşleme çalışmaları ile elde edilen akım-zaman ve basınç-zaman grafikleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Kapalı bomba deneylerinde zamana bağlı basınç ve akım değişimi

Hızlı kamera görüntüleri 30000 fps hızında alınmıştır. Hızlı kamera ve akım ölçerden veri toplama sistemi ile zamana karşı alınan akım verileri ile ZPP'nin ateşlenmeye başladığı süre hesaplanmıştır. Şekil 6.5'te hızlı kamera tetik akım sinyali ile ateşleyici köprüteline gönderilen akımın zamana karşı değişimi ve bu grafikten elde edilen bilgiler gösterilmiştir.

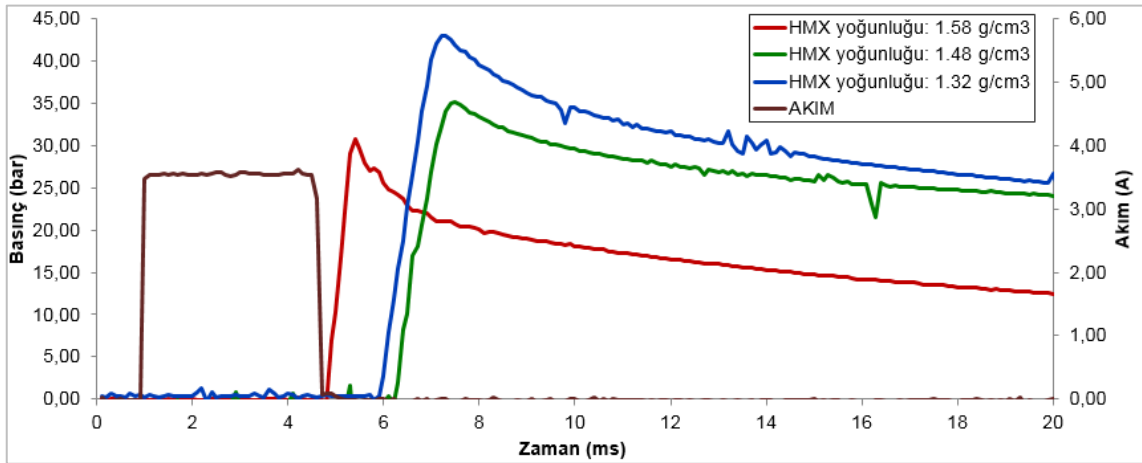


Şekil 6.5. Hızlı kamera tetik akımı ve ateşleyici köprüteline gönderilen akımın zamana karşı değişimi

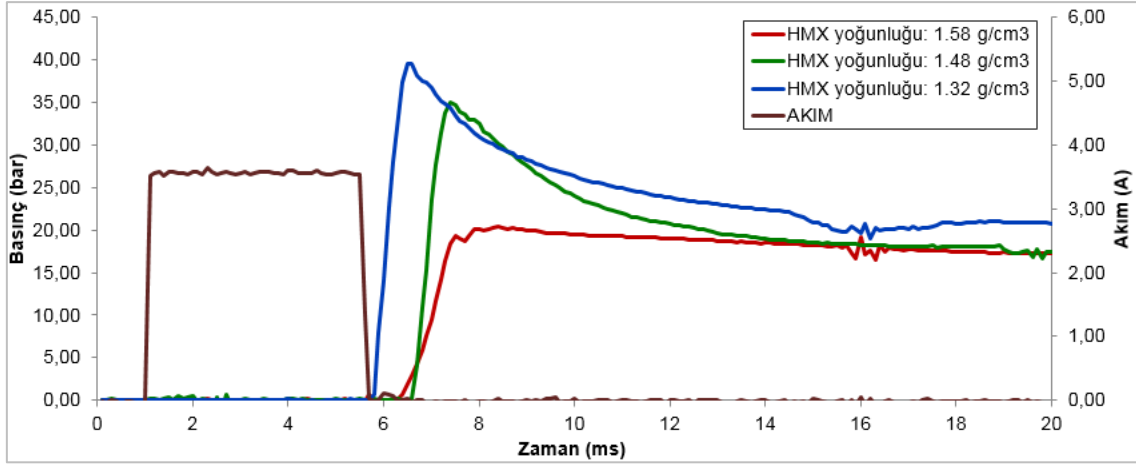
Hızlı kameranın kayıda başladığı zaman, hızlı kamerada tetik akım sinyalinin toplandığı milisaniyedir. Bu zaman 1,7 milisaniye olarak belirlenmiştir ve hızlı kameranın tetik gecikmesine eşittir. Hızlı kamera görüntüleri ile ateşlenme akımının başladığı zaman, ateşlenme akımının başlama anından itibaren geçen süreden 1,7 milisaniye çıkarılarak eşleştirilmiştir.

6.1.2. Sonuçlar

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de köprüteline verilen akımın sıfırlandığı an, ateşleyicide açık devre oluştuğuna, başka bir deyişle ateşleyici köprütelinin koptuğuna işaret etmektedir. Bu milisaniye, ZPP piroteknik malzemesinde yanma tepkimelerinin başladığı anı, akım süresi ise ZPP ateşlenme gecikmesini göstermektedir. Bütün konfigürasyonlarda ateşleyiciye gönderilen akım, köprüteli-ZPP arayüzey alanı ve ZPP yoğunluğu, başka bir deyişle ZPP malzemesinin porozitesi, sabit tutulmuştur. Her konfigürasyonda, akım verildikten yaklaşık 4 milisaniye sonra ZPP ateşlenme tepkimeleri başlamıştır.



Şekil 6.6. Farklı yoğunlukta HMX ve ZPP için elektriksel ateşlenme sonucu oluşan basıncın ve akımın zaman ile değişimi



Şekil 6.7. Farklı yoğunlukta HMX ve %3 karbon siyahı karışımı ve ZPP için elektriksel ateşlenme sonucu oluşan basıncın ve akımın zaman ile değişimi

Şekil 5.8 ve Şekil 5.11’de DSC termogramlarından , HMX tutuşma sıcaklığı 284 °C, ZPP tutuşma sıcaklığı ise 428 °C olarak belirlenmiştir. Bu nedenle ZPP ateşlenme tepkimelerinin başladığı milisaniyede köprüteli sıcaklığının ZPP tutuşma sıcaklığı olan 428°C olduğu kabul edilmiştir. HMX tutuşma sıcaklığının ZPP’ye kıyasla daha düşük olması nedeni ile ZPP’nin tutuşmaya başlaması ile HMX ateşlenme tepkimeleri de başlamaktadır. Bu verilerden yola çıkılarak, sisteme akım verildikten 4 milisaniye sonra ZPP ve ZPP ile temas halinde olan HMX tutuşmasının gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Sistemdeki ateşlenme gecikmesi 4 milisaniye olarak belirlenmiştir.

Ateşleyici köprüteline akımın verilmeye başlandığı süre ile tepe basıncının ulaştığı süre arasındaki fark ateşleyicinin etkinleşme süresini vermektedir. Kapalı bombada ilk basıncın oluştuğu süre ile tepe basıncına ulaşma süresi arasındaki fark ise yanma süresini vermektedir.

HMX’in ihtiva ettiği kimyasal enerjinin büyük kısmı ikinci dereceden gaz fazı tepkimelerinde açığa çıkmaktadır (Tarver, 2004). Bu nedenle HMX’teki ayrışma tepkimelerinin hızını baskın olan gaz fazı belirlemektedir (Behrens, Margolis, Hobbs, 1998; Liau, Lyman, 2002). Buna bağlı olarak Çizelge 6.2’de verildiği üzere saf HMX ve karbon siyahı içeren HMX yoğunluğunun azalması, başka bir deyişle tepkime ortamında porozitenin artması, ile tepe basıncı artmaktadır.

Yoğunluğu düşürüldükçe HMX etkinleşme süresi ve yanma süresi artmaktadır. Yanma süresinin artmasının başlıca nedeni kapalı sistemde oluşan ısının pelet boşluklarında

ilerleyerek konveksiyon aktarımı ile çevreye kaybedilmesidir. Saf HMX yoğunluğu arttıkça azalan pelet boşluk oranından dolayı yanma tepkime hızını kontrol eden gaz fazı sıkışmaktadır. Yüksek yoğunluktaki HMX'te konveksiyon yoluyla ısı kaybının daha az olmasına bağlı olarak açığa çıkan ısı çevreye daha geç kaybedilmektedir. Saf HMX ile kıyaslandığında karbon siyahı içeren HMX'te tam tersi bir etki gözlenmiştir. Tepkime ortamında bulunan yüksek ısıl absorpsiyon özelliği bulunan karbon siyahı, gaz fazın tepkime ortamından kaybına engel olmaktadır. Yüksek boşluk oranına sahip karışımda konveksiyon yolu ile dağılan ısı, karbon siyahı tarafından absorplanarak kondüksiyon yolu ile HMX'e iletilmektedir. Böylelikle yoğunluğun azalması ile yanma hızı ve etkinleşme süresi düşmektedir. Çizelge 6.2'de, 1,48 g/cm³ ile 1,32 g/cm³ yoğunluklarındaki saf HMX'in ve karbon siyahı içeren HMX'in yanma sürelerinin aynı, etkinleşme sürelerinin de birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Yanma ve etkinleşme süreleri açısından değerlendirildiğinde bu sürelerin belli bir yoğunluk değeri üzerinde değişmediği görülmüştür.

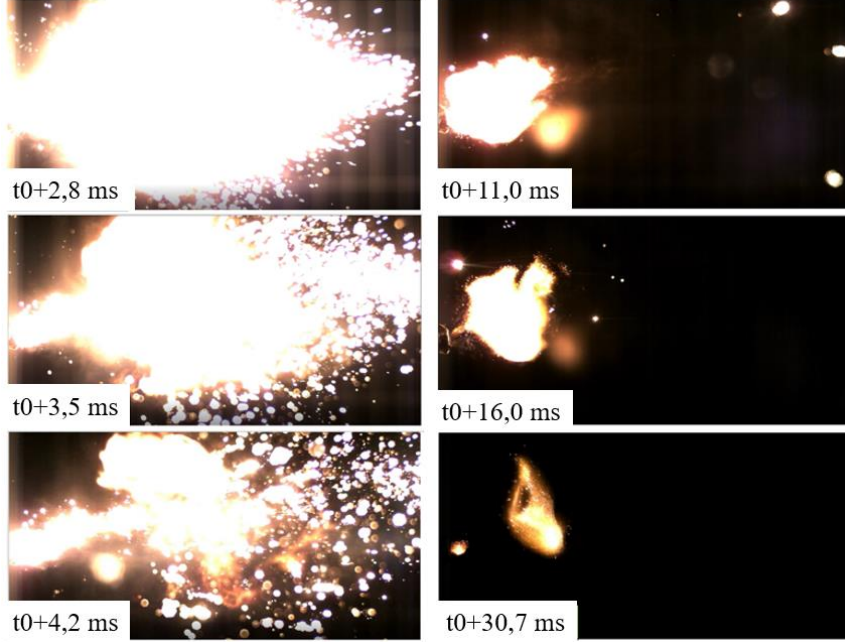
Çizelge 6.2. ZPP+HMX elektriksel ateşleme sonuçları

Patlayıcı	Miktar (mg)	HMX Yoğunluğu (g/cm ³)	HMX Porozite Değeri	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)
Saf HMX	50	1,58	0,21	4,4	30,66	0,5
		1,48	0,29	6,4	34,86	1,3
		1,32	0,44	6,2	42,95	1,3
%3 karbon siyahı içeren HMX	50	1,58	0,21	7,1	20,04	1,2
		1,48	0,29	6,3	34,65	0,7
		1,32	0,44	5,3	39,53	0,7

Çizelge 6.2'de verilen konfigürasyonlardaki ateşleyicilerin hızlı kamera tetik sinyali ve akım-zaman verilerinden hesaplanan ateşlenme gecikmeleri ile hızlı kamera görüntüleri eşleştirilmiştir. Ateşleyicilerin hızlı kamera görüntüleri incelenerek, elektriksel ateşlenmenin başladığı zaman ile ateşleyici haznesinin açıldığı zaman belirlenmiştir.

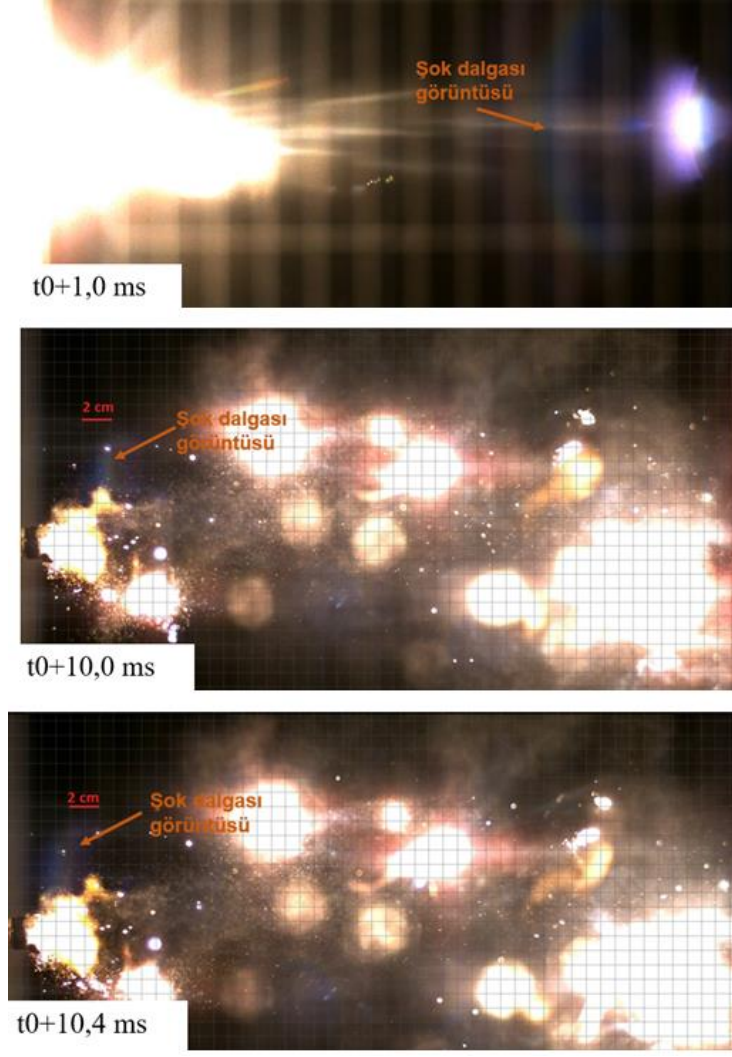
Şekil 6.8'de görüldüğü üzere ateşlenmenin gerçekleştiği andan itibaren 4,2 ms'de yanma ürünleri ateşlenme ortamına yayılmıştır. t₀ değeri, ZPP ile temas halinde bulunan ateşleyici köprütelinin koptuğu, başka bir deyişle ZPP ateşlenme tepkimelerinin başladığı milisaniyedir. Buna göre ateşleyici köprüteli koptuktan 2,8 milisaniye sonra ateşleyici haznesi açılmış ve yanma ürünleri ortama yayılmıştır. Ateşlenmenin ilerleyen zamanlarında ortamda oluşan vakum nedeni ile gaz fazı yaklaşık 20 milisaniye süresince

ateşlenme ortamında asılı kalmıştır. Benzer bir sonuç, yanma süresinin yüksek olduğu, düşük yoğunluktaki saf HMX konfigürasyonundaki ateşleyiciye ait hızlı kamera görüntülerinden de elde edilmiştir.



Şekil 6.8. ZPP+karbon siyahı ile kaplı HMX konfigürasyonu hızlı kamera görüntüleri, HMX yoğunluğu= 1,58 g/cm³

Saf HMX yoğunluğunun 1,58 g/cm³ olduğu ateşleyici konfigürasyonunda, ateşleyici haznesindeki yüksek yoğunluktaki HMX nedeni ile porozite düşüktür. Yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan gaz, ateşleyici haznesinde düşük boşluk oranına sahip ortamda sıkışmıştır. Kapalı ve sızdırmaz ortamda sıkışan yüksek sıcaklıkta ve basınçtaki gazların ateşlenme ortamında şok dalgası meydana getirdiği gözlenmiştir (Şekil 6.9). Şok dalgası yapısında gözlenen bu görüntünün hızlı kamera lensinde meydana gelen ve yanma ürünlerinin lensteki yansımından kaynaklı olabileceği değerlendirilmiştir. Bu yapının şok dalgası olup olmadığına ilişkin ileri ölçüm yöntemlerini içeren ayrı bir test yapılmamıştır.

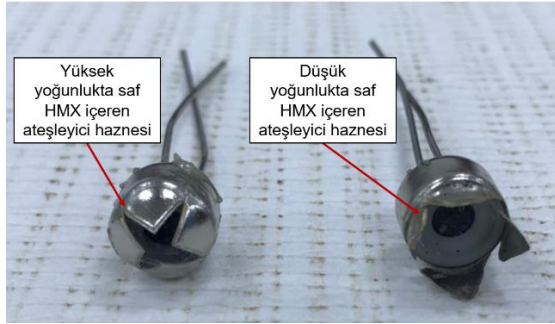


Şekil 6.9. ZPP+saf HMX içeren elektriksek ateşleme sırasında elde edilen şok dalgası görüntüleri (saf HMX yoğunluğu: $1,58 \text{ g/cm}^3$)

Ateşleyici köprütelili koptuktan 1 milisaniye sonra ateşleyici haznesinin açılması ile haznede sıkışan gaz açığa çıkmıştır. Ateşlenme, PMMA koruyucu plakalar ile sınırlandırılmış ortamda gerçekleşmektedir. Ateşlenme ortamının arka planı 2 cm uzunluğundaki çizgiler ile ölçeklendirilmiştir. Bu ölçek ve hızlı kamera görüntülerindeki süreler göz önüne alınarak ateşleyici haznesinin açıldığı anda gözlenen dalganın hızı hesaplanmıştır. Hızlı kameranın t0+1 ms'deki görüntüsü incelendiğinde, haznenin açılması ile açığa çıkan şok dalgası 20 cm mesafeyi 1 ms'de katetmiştir. Buna göre dalga hızı $\sim 200 \text{ m/s}$ olarak belirlenmiştir. Bu dalga, ateşlenme ortamındaki PMMA koruyucu plakaya çarparak hızı sönümlenmiştir. Çarpmanın etkisi ile yön değiştirerek ateşlenme ortamına geri dönen dalga hızı hesaplanmıştır. Hızlı kamera ile t0+10 ms ile t0+10,4 ms'de elde edilen görüntülerde, dalganın 2 cm uzunluğundaki mesafeyi 0,4 ms'de

katettiği gözlenmiştir. Buna göre dalga hızı ~50 m/s olarak belirlenmiştir. Bu görüntülerin ateşleyiciden açığa çıkan şok dalgası olarak değerlendirilmesi durumunda, bu dalganın patlayıcıda çok hızlı yanma fenomeni olarak adlandırılan deflagrasyon mekanizmasının gerçekleşmesinden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Elektriksel ateşleme sonrası ateşleyicilere yapılan fiziksel/görsel incelemede yanma süresinden bağımsız olarak, düşük tepe basıncının elde edildiği yüksek yoğunluktaki saf HMX ve karbon siyahı içeren düşük yoğunluktaki HMX ile hazırlanan ateşleyicilerin haznelerinin tamamen açılmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Düşük ve yüksek tepe basıncının elde edildiği elektriksel ateşleme sonrası ateşleyici görüntüleri

6.2. Lazer ile Ateşleme

6.2.1. Numune Hazırlama ve Test Yöntemi

Lazer ile ateşleme çalışmalarında, elektriksel yöntemle ateşleme çalışmalarındaki ZPP miktarı ve yoğunluğu ile saf HMX miktarı ve yoğunlukları sabit tutulmuştur. Çizelge 6.3'te ZPP+HMX'in lazer ile ateşlenme çalışmalarına ait sistem parametreleri verilmiştir.

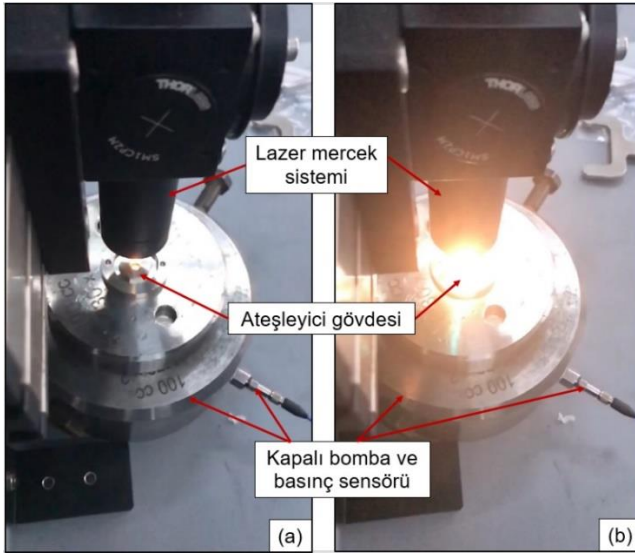
Çizelge 6.3. Lazer Tetikli Ateşleyici Sistem Parametreleri

ZPP Miktarı (mg)	ZPP Yoğunluğu (g/cm ³)	HMX Miktarı (mg)	HMX Yoğunluğu (g/cm ³)
15	2,65	50	1,32
			1,48

ZPP+HMX'in lazer ile ateşlenmesi sonucu sistem çıktısının incelenmesi amacıyla kapalı bomba deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.11). Çalışmalarda 10 cm³ iç hacimli kapalı bombaya yerleştirilen ateşleyiciler lazer ışını ile ateşlenmiştir. Ateşleyicide yer alan ZPP, lazer ışını

odak mesafesine konumlandırılmış, böylelikle PMMA plakadan geçerek ZPP yüzeyine temas eden lazer ışın çapının 110 µm olması sağlanmıştır.

Şekil 6.11’de görüldüğü üzere, lazer ışını mercek sistemi ile odaklanarak kapalı bomba düzeneğine yerleştirilen ateşleyici gövdesine gönderilmiştir. Odaklanan lazer ışını, ateşleyici gövdesine yerleştirilen PMMA plakadan geçerek plaka ile temas halinde olan ZPP’nin ateşlenmesini sağlamıştır. ZPP’nin ateşlenmesi ile ZPP ile temas halinde olan HMX ateşlenmesi gerçekleşmiştir. Şekil 6.11’de, ZPP’nin yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan ve PMMA plakadan yansıyan şiddetli bir parlama görülmektedir. Kapalı bombaya yerleştirilen veri toplama sistemine bağlı basınç sensörü (113B22, PCB Piezotronics, ABD) ile ZPP ve HMX yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan basıncın zaman ile değişimi, 0,1 ms aralıklarla ölçülmüştür. Lazer ışınının ateşleyiciye gönderildiği zamanın belirlenmesi amacıyla, lazer güç ünitesinde, tetik sinyal çıkışı bulunmaktadır. Lazer tetik sinyali dijital ekran üzerinde bulunan lazer ışını gönderme komutu ile eş zamanlı olarak 3,5 Volt’luk tetik sinyali üretmektedir. Bu sinyal veri toplama sistemi ile kaydedilmektedir. Böylelikle lazer ışını gönderildikten sonra ateşleyicinin ateşlenme gecikmesi belirlenmiştir.



Şekil 6.11. Kapalı bomba deneylerinde lazer ile ZPP+HMX ateşleme sürecinde (a) ZPP yanma tepkimelerinin başladığı ve (b) yanma tepkimelerinin ilerlediği anın görüntüsü

Kapalı bomba deneylerinde lazer ile ateşleme sonucu toplanan veriler, Şekil 6.4’teki grafikler kullanılarak verildiği üzere analiz edilmiştir. Ateşleyicilerin farklı sistem

parametreleri için etkinleşme ve yanma süreleri, yanma hızları ve tepe basınçları bulunmuştur. Elde edilen veriler, en yüksek uçan plaka hızını veren optimum sistem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla değerlendirilmiştir. Çizelge 6.4'te lazer ateşleme çalışma parametreleri verilmiştir. Lazer güç ünitesinde ayarlanan ve güç ünitesindeki lazer diyot tarafından üretilen ışın gücünün bir kısmı, ışının fiber optik kablo, mercek sistemi ve PMMA boyunca ilerleyişi sırasında kaybedilmektedir. Bu nedenle PMMA ile temas halindeki ZPP üzerine ulaşan ışın gücü değişmektedir. ZPP yüzeyine düşen lazer ışınının gücü Şekil 3.14'te verilen grafikten bulunmuştur. Tezin ilerleyen kısımlarında tanımlanan lazer ışın gücü, sistem içindeki kayıplar göz önünde bulundurularak belirlenmiş, ZPP yüzeyine ulaşan ışın gücüdür.

Çizelge 6.4. Lazer Ateşleme Çalışma Parametreleri

Lazer ışını dalgaboyu (nm)	Lazer ışın çapı (µm)	Lazer ışın süresi (ms)	Lazer güç ünitesi ışın gücü (mW)	ZPP yüzeyindeki ışın gücü (mW)	ZPP yüzeyindeki ışın yoğunluğu (W/cm ²)
915	110	50	700	524	5516

Lazer ile ZPP+HMX ateşleme çalışmalarında ZPP yüzeyinin lazer ışınına maruz kalma süresi 50 ms'de sabit tutulmuştur. Kapalı bomba deneysel sonuçlarının analizi ile lazer tetik akımının verilmeye başlandığı başka bir deyişle lazer ışınının ZPP yüzeyine gönderilmeye başlandığı zaman belirlenmiştir. Kapalı bomba basınç sensörü ile ZPP+HMX lazer ile yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan basıncın zamana bağlı değişimi kaydedilmiştir. HMX patlayıcı sınıfına girdiği için, HMX yanma tepkimeleri ZPP'ye kıyasla çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu nedenle lazer ışınının gönderildiği zaman ile ZPP+HMX basınç verisinin alındığı zaman arasındaki fark ZPP'nin lazer ışını etkisi ile tutuşmaya başladığı zaman (ateşlenme gecikmesi) olarak kabul edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda lazer ışın gücü (Joule/s) ile ZPP ateşlenme gecikmesinden (ms), ZPP'de sürdürülebilir (ing. sustainable) tutuşmanın gerçekleşmesi için ZPP yüzeyine gönderilmesi gereken enerji (Joule) belirlenmiştir.

Sınırlandırılmış yapı, HMX yoğunluğu ve lazer ışın gücü etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilen kapalı bomba deneysel çalışmaları üç tekrarlı olarak yürütülmüş, elde edilen verilerin standart hataları hesaplanmıştır.

6.2.2. Sonuçlar

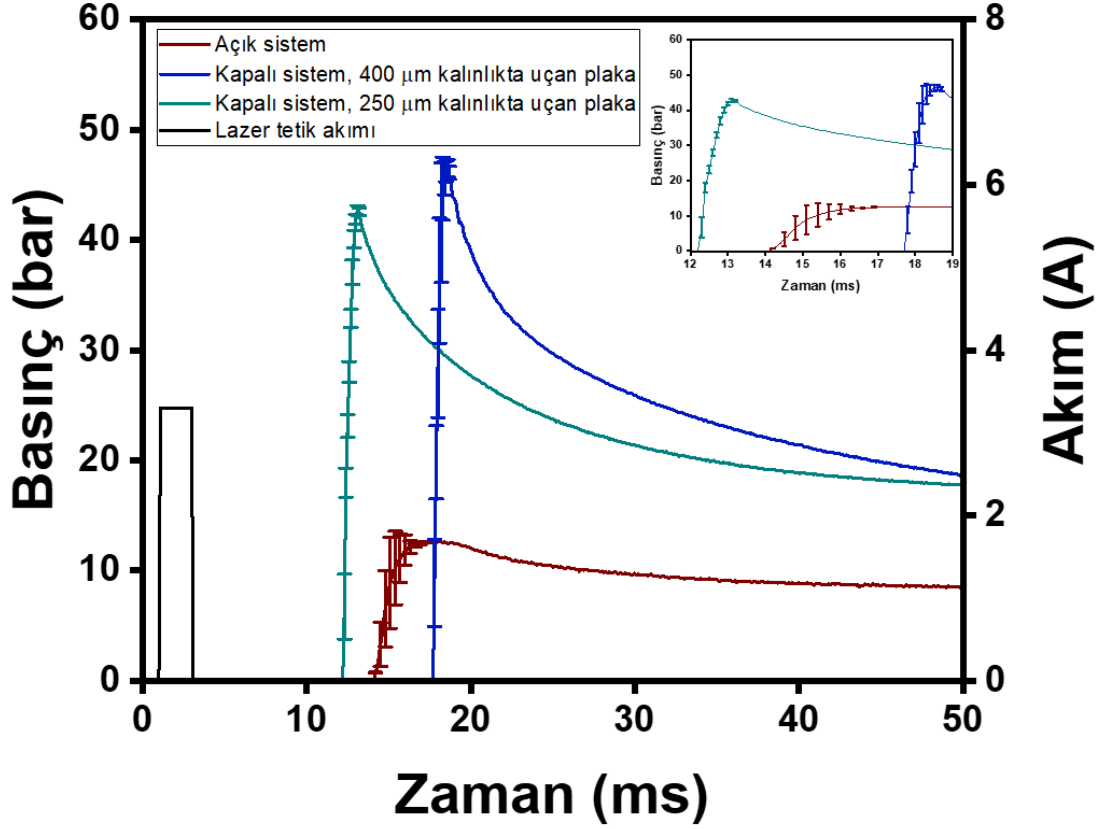
6.2.2.1. Sınırlandırılmış Yapının Etkisi

Patlayıcı içeren sistemlerin sınırlandırılmış (ing. confined) yapıda olması, başka bir deyişle sistemin kapalı ve sızdırmaz olması ateşlenme tepkimelerinin ilerleyişini doğrudan etkilemektedir. Patlayıcı tepkime hızına bağlı olarak sistemin basınç çıktısı, sistemin açık ya da kapalı olmasına göre değişiklik göstermektedir. Özellikle duyarsız patlayıcılar ile çalışıldığı durumlarda, patlayıcının ateşlenebilmesi için patlayıcının kapalı sistem içinde hapsolması gerekmektedir (Ewick, 1993). Kapalı sistemde patlayıcının yanma tepkimelerinin başlaması ile açığa çıkan yüksek sıcaklıkta gaz, sistem içinde sıkışmaktadır. Sistemin dışına çıkamayan ve sistem içinde biriken basınç, patlayıcı boyunca yanma tepkimelerinin ilerlemesini hızlandırmaktadır. Böylelikle, sistemde sıcaklık ve basıncın yükselmesi ile yanma tepkimeleri daha kolay ve hızlı bir şekilde ilerlemekte, patlayıcı ateşlenme eşiği düşmektedir (Ostmark ve Grans, 1990; Goveas, Drake ve Field, 1999; Ahmad ve Russel, 2008; Ahmad ve Cartwright, 2015).

Lazer ışını ile enerjik malzeme ateşleme çalışmalarında, kapalı ve açık sistem yapısının, lazer ateşleme performansına etkisinin incelenmesi amacıyla yürütülen kapalı bomba deneylerinde lazer tetikli uçan plaka sistemi kullanılmıştır. ZPP ve HMX içeren ateşleyici gövdesi yanma yüzeyi mekanik olarak sınırlandırılmadığı için açık sistem olarak kabul edilmiştir. Ateşleyici gövdesi, içine 250 µm ve 400 µm kalınlığındaki Al plaka yerleştirilmiş uçan plaka gövdesi ile bütünlenmiştir. Böylelikle yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan gaz ürünlerinin sistemde farklı miktarlarda sıkışması sağlanmıştır. Plaka ile sınırlandırılmış lazer tetikli uçan plaka sistemi, kapalı sistem olarak kabul edilmiştir.

Şekil 6.12’de verildiği üzere açık ve kapalı sistemde aynı miktarda enerjik malzeme kullanılmasına rağmen kapalı sistemde ulaşılan tepe basıncı açık sisteme kıyasla daha yüksektir. Bu sonucun başlıca nedeni kapalı sistem içinde gaz basıncının daha yüksek olmasıdır. Bu basıncın etkisi ile enerjik malzeme tepkime hızı artmaktadır. Açık sistemde ise yanma tepkimeleri atmosferik ortamda gerçekleşmekte ve sistemden dış ortama ısı kaybı daha fazla olmaktadır. Buna bağlı olarak açık sistemde ulaşılan tepe basıncı daha düşüktür. Sınırlandırılmış yapı etkisi 400 µm kalınlıktaki plaka kullanıldığı durumda, 250 µm kalınlıktaki plaka kullanıldığı duruma kıyasla daha belirgindir. Bu nedenle 400 µm kalınlıktaki plaka kullanıldığı durumda sistemdeki basınç çıktısı en yüksek değerine

ulaşmıştır. Bu değerlendirmeyi destekler şekilde Çizelge 6.5'te de verildiği üzere enerjik malzeme yanma süresi açık sistemde daha yüksek, yanma hızı ise daha düşüktür. Yanma hızı kapalı sistemde ~3 mm/s'ye ulaşırken, açık sistemde yanma hızı ~1 mm/s'dir.



Şekil 6.12. Kapalı ve açık sistem yapısının ZPP+1,32 g/cm³ HMX lazer ateşlenme performansına etkisi

Etkinleşme süresinin, yanma hızının yüksek olduğu 400 µm kalınlığındaki plaka ile sınırlandırılmış kapalı sistemde diğer sistemlere kıyasla daha düşük olması beklenmektedir. Lazer ışını odaklama mesafesindeki sapmalar nedeni ile sistemlerin ateşlenme başlangıcının saptığı, bu nedenle de etkinleşme sürelerinin sapmalı olarak elde edildiği değerlendirilmiştir.

PMMA plakadan geçen lazer ışını, plaka yüzeyine pnömatik pres ile sıkıştırılan 0,3 mm kalınlığındaki ZPP yüzeyine ulaşmaktadır. Deneysel çalışmalarda, PMMA kalınlığı, lazer ışın gücü, ışın çapı ve ZPP yoğunluğu aynı olması sebebi ile ateşlenme enerjisi her sistem için benzer olması gerekmektedir. Çizelge 6.5'te görüldüğü üzere sistemlerin ateşlenme enerjileri birbirlerine çok yakın olup, literatürde ZPP için verilen lazer ateşlenme enerji verileri ile uyumludur (Yong ve Valenta, 1990; Blachowski, 1992; Callaghan ve Tindol,

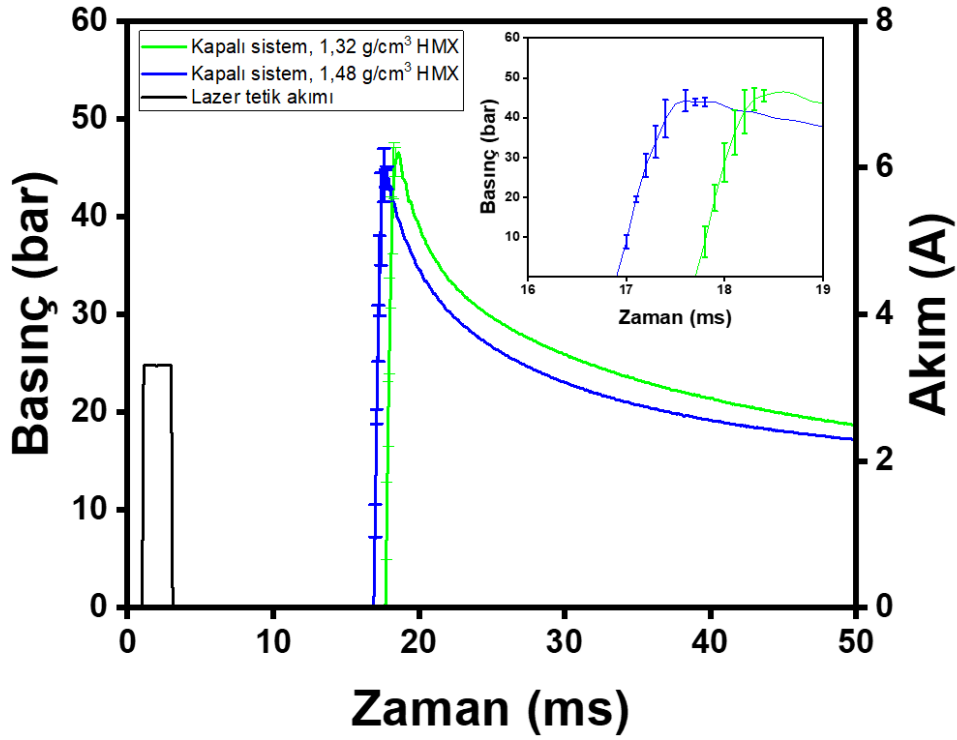
1993; Holy ve Girman, 1998). Ateşlenme enerjileri arasındaki farkların lazer ışını odaklama hatasından kaynaklandığı değerlendirilmiş olup, sapma deneysel hata olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 6.5. Kapalı bomba ortamında kapalı ve açık sistemde lazerle ZPP+1,32 g/cm³ HMX ateşleme deneylerinin sonuçları

Lazer Ateşleme Sistemi	Ateşlenme Enerjisi (mJ)	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)	Yanma Hızı (mm/ms)
Açık Sistem	9,3±4,6	17,7±8,8	13,8±0,2	2,9±1,6	1,0±0,5
Kapalı Sistem (250 µm kalınlıkta uçan plaka)	6,4±1,1	12,1±2,1	42,6±0,4	0,9±0	2,2±0
Kapalı Sistem (400 µm kalınlıkta uçan plaka)	9,2±0,4	17,4±0,9	48,4±1,6	0,7±0,1	3,3±0,8

6.2.2.2. HMX Yoğunluğunun Etkisi

Lazer tetikli uçan plaka sistemi 400 µm kalınlıktaki plaka ile sınırlandırılmış ve HMX yoğunluğunun sistem performansına etkisi incelenmiştir. Şekil 6.13 ve Çizelge 6.6'da verildiği üzere sistemin sınırlandırılmış yapıda olması sebebi ile HMX yoğunluğunun yanma hızına etkisi bulunmamaktadır. Her iki yoğunlukta sistemin basınç çıktısı benzerdir. Ateşlenme enerjileri ve etkinleşme sürelerindeki farkların lazer ışınının hedeflenen odak uzaklıkta sisteme gönderilememesinden, bu nedenle ZPP yüzeyinde homojen ışın dağılımının elde edilememesinden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.



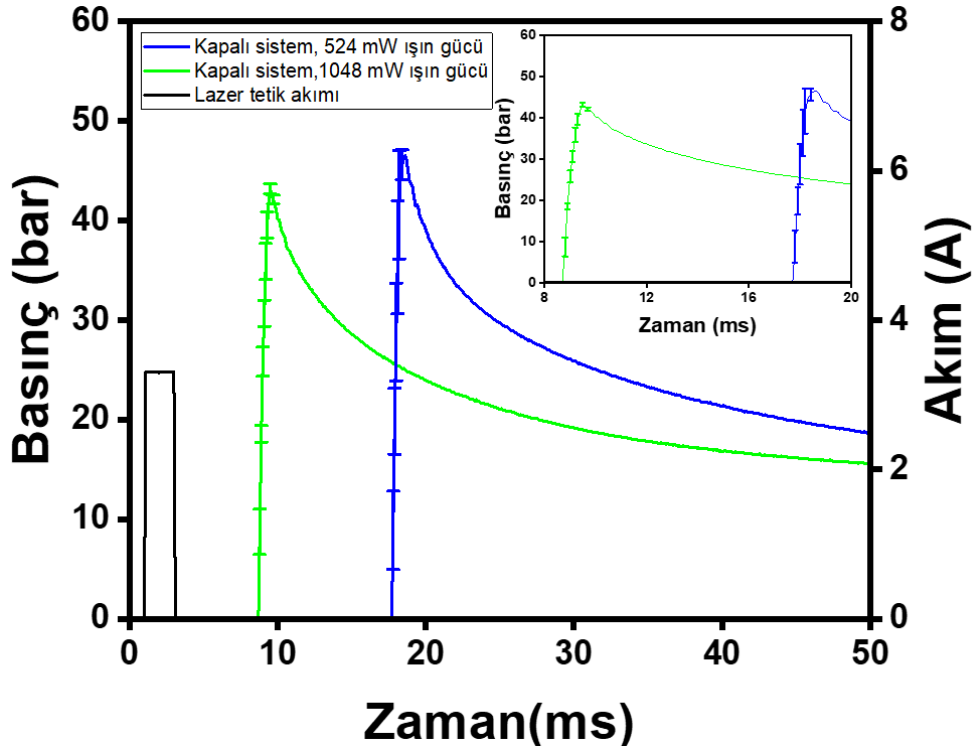
Şekil 6.13. HMX yoğunluğunun ZPP+HMX lazer ateşlenme performansına etkisi

Çizelge 6.6. Farklı HMX yoğunluklarında ZPP+HMX lazer ateşleme kapalı bomba deneysel verilerinin analizi

Lazer Ateşleme Sistemi	HMX Yoğunluğu (g/cm ³)	Ateşlenme Enerjisi (mJ)	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)	Yanma Hızı (mm/ms)
Kapalı Sistem (400 µm kalınlıkta uçan plaka)	1,32	9,2±0,4	17,4±0,9	48,4±1,6	0,7±0,1	3,3±0,8
	1,48	8,8±2,4	16,6±4,4	46,0±3,2	0,7±0,1	2,9±0,6

6.2.2.3. Lazer Işın Gücünün Etkisi

Enerjik malzeme üzerine gönderilen lazer ışın enerjisinin artırılması ile enerjik malzeme ateşlenme gecikmesi kısalmaktadır (Yong ve Valenta, 1990; Ewick, Graham, Hawley, 1993; Ali, Son, Sander ve ark., 1999; Bourne, 2001; Ahmed ve Russell, 2005). Lazer ışın gücünün etkisinin belirlendiği bu çalışma, HMX yoğunluğunun 1,32 g/cm³ olduğu, 400 µm Al plaka ile sınırlandırılmış sistem ile 18 cm³ iç hacmine sahip kapalı bombada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14. Lazer ışın gücünün ZPP+HMX ateşlenme performansına etkisi

ZPP yüzeyine gönderilen lazer ışın enerjisinin iki katına çıkarılması ile ZPP+HMX ateşlenme gecikmesi yaklaşık iki kat azalmış ve buna bağlı olarak etkinleşme süresi de iki kat kısalmıştır. İlk olarak lazer ışının gönderildiği ZPP yüzeyinde ($9,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 'lik alanda) başlayan yanma tepkimeleri sonucu açığa çıkan ısı, ZPP yüzeyinde radyal ve ZPP peleti boyunca aksel yönde ilerleyerek sürdürülebilir yanmanın gerçekleşmesini sağlamıştır. Yüksek enerjideki ışın, ZPP tutuşma sıcaklığına daha kısa sürede ulaşılmasını sağlamakta, böylelikle etkinleşme süresinin kısılmasına sebep olmaktadır. Ateşlenme enerjisi, tepe basıncı ve yanma hızı ile süresi, tutuşan ZPP özellikleri aynı olduğu için beklenildiği üzere benzerdir.

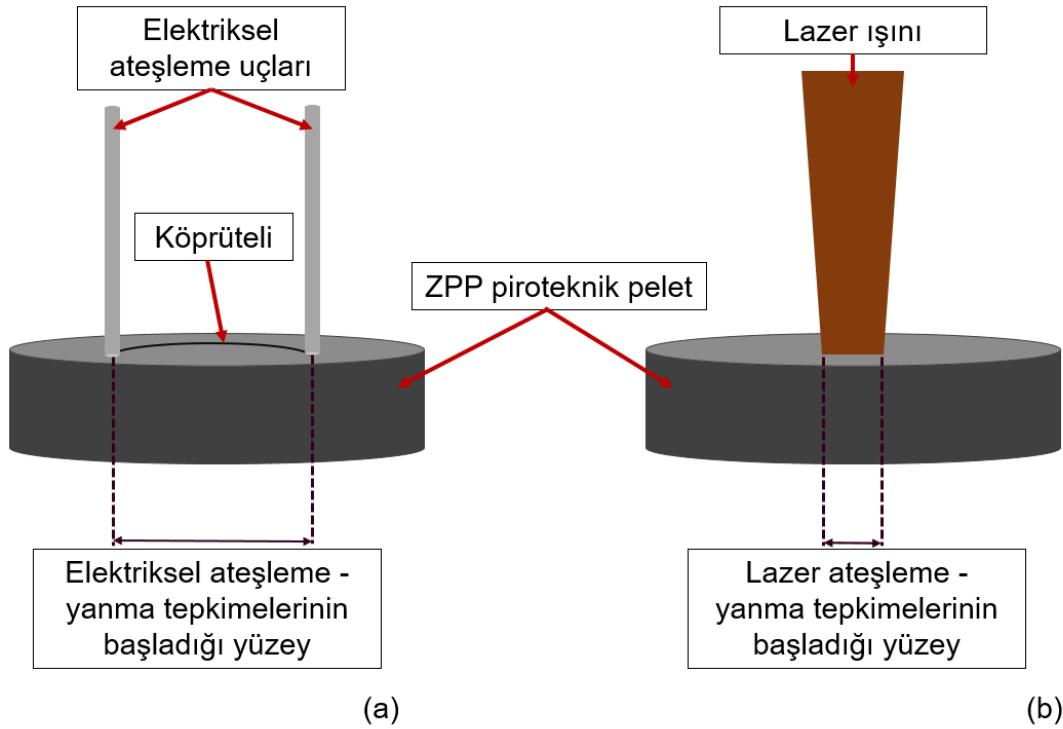
Çizelge 6.7. Farklı lazer ışın güçlerinde ZPP+HMX lazer ateşleme kapalı bomba deney sonuçları

Lazer Işın Gücü (mW)	Ateşlenme Enerjisi (mJ)	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)	Yanma Hızı (mm/ms)
524	$9,2 \pm 0,4$	$17,4 \pm 0,9$	$48,4 \pm 1,6$	$0,7 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,8$
1048	$9,2 \pm 0,9$	$8,5 \pm 0,8$	$43,4 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,3$

Lazer ışın yoğunluk (W/cm^2) etkisi bu çalışma kapsamında incelenmemiştir. Işın yoğunluğu, ışın enerjisi, ışın süresi ve ışın çapı ile birlikte değerlendirilmesi gereken bir değişkendir. Lazer ışın çapı veya süresi değiştirilerek aynı ışın yoğunluğunun elde edilmesi durumunda sistem çıktıları farklılık göstermektedir (Hagan ve Chaudhri, 1981; Hagan ve Chaudhri, 1983; Renlund, Stanton ve Trott, 1989; Kurokawa, Tasaki, Hattori ve ark., 1991; Goveas, Drake ve Field, 1999). Bu nedenle her bir değişken birbirlerinden bağımsız olarak incelenmelidir.

6.3. Karşılaştırma

Şekil 6.15'te şematik gösterimi verilen elektriksel ve lazer ile ateşleme yöntemlerinde ateşlenme arayüzü ZPP'dir.



Şekil 6.15. (a) Elektriksel ve (b) lazer ateşleme yöntemlerinin şematik gösterimi

Elektriksel ateşleme yönteminde, direnci $1,0 \Omega$ olan köprüteli üzerine $3,5 A$ 'lık akım gönderilmiştir. Köprütelinin ısınması ile köprüteli ile temas halinde bulunan ZPP üzerine iletilen ısı W , köprüteli direnci R ve akım I değerleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$W = I^2 \cdot R \quad (1)$$

Eşitlik 1 kullanılarak $W = (3,5A)^2 \cdot (1\Omega) = 12,3 \text{ J/s}$ elde edilmiştir.

ZPP yüzeyinde oluşan $12,3 \text{ J/s}$ değerindeki ısı, köprütelinin ZPP ile temas ettiği yanal alanından iletilmektedir. Köprütelinin ısı aktarım alanı A , telin yarıçapı r ve uzunluğu L kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (2)$$

Eşitlik 2 ile köprüteli ısı aktarım yüzey alanı $4,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ bulunmuştur. ZPP yüzeyine ateşlenme için sağlanan ısı yoğunluğu, ısı aktarım hızı (J/s) ve aktarımın gerçekleştiği yüzey alan (cm^2) kullanılarak hesaplanmış ve 2617 W/cm^2 olarak bulunmuştur.

Köprütelinin çok kısa sürede yüksek sıcaklıklarda ısınması sonucu köprütelden ısı aktarımı, kondüksiyon yanında radyasyon ile de gerçekleşmektedir. Köprütelinin ısınması sonucu radyasyon ile iletilen ısı Q_{rad} , Stefan-Boltzmann yasası kullanılarak türetilmiştir: (Eş. 3).

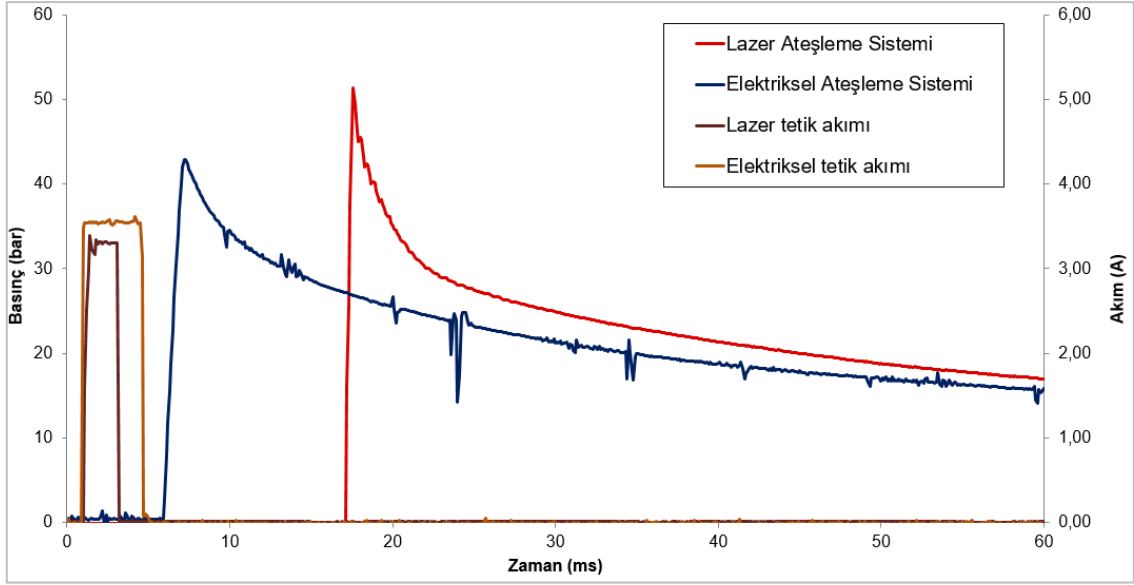
$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{tel}}^4 - T_0^4) \quad (3)$$

Eş.3'te A köprüteli yüzey alanı, σ Stefan-Boltzmann katsayısı, ϵ ise yayınlık katsayısıdır. Hesaplama ZPP pirotekniğinin kara cisim (ing. black body) davranışı sergilediği varsayılmıştır. Bir nikel-krom alaşımı olan köprütelinin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değeri, alaşımın erime sıcaklığı olan $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Eşitlik 3'e değerler yerleştirilerek $Q_{\text{rad}} = (1) \cdot (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) \cdot (4,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2) \cdot (1973^4 - 298^4) \text{ K}^4$ işlemi sonucu köprütelden ZPP pirotekniğine radyasyon ile iletimi en fazla $0,4 \text{ W}$ 'dır. Köprütelden kondüksiyon ile yayılan $12,3 \text{ W}$ ile kıyaslandığında, radyasyon ile ısı iletimin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu değerlendirilmiştir (Varghase, 1989). Köprü teli ile ısı aktarımında kondüksiyon baskındır.

Lazer ateşleme sisteminde ZPP yüzeyine gönderilen ışın gücü $0,524 \text{ W}$ 'dır. Mercek sistemi ile odaklanarak ZPP yüzeyine gönderilen ışın çapı $110 \text{ }\mu\text{m}$ 'dur. ZPP yüzeyine gönderilen ışın yoğunluğu, lazer ışın gücü (J/s) ve ışın aktarım alanı $9,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ kullanılarak 5516 W/cm^2 olarak bulunmuştur. Lazer ışını ile ısı iletimi, elektrik yoluyla ısı iletiminden farklı olarak, fotonlar ile gerçekleşmektedir ve ısı aktarımını kontrol eden mekanizma radyasyondur.

Elektriksel ve lazer ateşleme sonuçlarının kıyaslandığı deneylerde ZPP+HMX numunesinde ZPP arayüzünün kütlesi ve yoğunluğu sırasıyla 15 mg ve $2,65 \text{ g/cm}^3$ olacak şekilde sabit tutulmuştur. ZPP ile temas halinde bulunan HMX kütlesi ve yoğunluğu ise 50 mg ve $1,32 \text{ g/cm}^3$ olacak şekilde sabit tutulmuştur. Elektriksel ateşleyicide, ateşleyici gövdesi bronz hazne ile lazer tetikli uçan plaka sisteminde ise ateşleyici gövdesi önü PMMA ve arkası Al plaka ile sınırlandırılmış olup, her iki sistemde kapalı sistem davranışındadır. Elektriksel ateşleyici ve lazer tetikli uçan plaka sistemi 10 cm^3 iç hacmindeki kapalı bomba düzenğinde ateşlenmiştir.

Şekil 6.16 ve Çizelge 6.8 birlikte değerlendirildiğinde, elektriksel ateşlemede etkinleşme süresinin, lazer ile ateşleme etkinleşme süresine göre daha kısa olduğu görülmektedir. Elektriksel ateşleme yönteminde ZPP yüzeyinde 2617 W/cm^2 'lik ısı yoğunluğu oluşurken, lazer ateşleme yönteminde ısı yoğunluğu 5516 W/cm^2 'dir. Lazer ateşlemede ısı yoğunluğunun daha yüksek olmasına karşın etkinleşme süresinin daha uzun olması, başka bir deyişle yanma tepkimelerinin elektriksel sisteme kıyasla daha geç başlamasının temel nedeni ısı aktarım yüzey alanı ile ilgilidir. ZPP yüzeyindeki $110 \mu\text{m}$ çapındaki lazer ışını, yüzeyin $9,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ alanının radyasyon ile ısınmasını sağlamaktadır. Bu alan dışındaki radyal yönde sıcaklık farkı nedeni ile ısı aktarımı, kondüksiyon ile gerçekleşmektedir. Elektriksel yöntemde ise ZPP yüzeyinin $4,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 'lik alanı köprü telinden ısı aktarımına maruz kalmaktadır. Benzer şekilde köprü teli ile temas etmeyen bölgelerde ısı iletimi kondüksiyon ile gerçekleşmektedir. Isınan ZPP yüzey alanı daha fazla olduğu için elektriksel yöntemde radyal yöndeki ısı aktarım hızı, lazer yöntemine kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle elektriksel yöntem ile ateşlemede etkinleşme süresi daha kısadır.



Şekil 6.16. ZPP+HMX numunesine elektrik ve lazer uygulanarak ateşleme yapılan deneylerde zamana karşı basınç ve akımın değışimi

Çizelge 6.8. ZPP+HMX numunesinin elektrik ve lazer ile ateşleme deney sonuçları

Ateşleme Sistemi	Ateşlenme Enerjisi (mJ)	Ateşlenme Yoğunluğu (J/cm^2)	Ateşlenme Yüzey Alanı (cm^2)	Etkinleşme Süresi (ms)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)
Elektriksel Sistem	61,5	13,1	$4,7 \times 10^{-3}$	6,2	42,95	1,30
Lazer Sistemi	9,2	97,2	$9,5 \times 10^{-5}$	17,4	48,4	0,70

Her iki yöntem için, enerji girdisi olan W/cm^2 değeri ve bir deney çıktısı olan ateşlenme gecikmesi değeri kullanılarak ateşlenme enerjileri ve yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu değerler, ZPP'nin ateşlenme tepkimeleri başlamadan önceki ZPP yüzeyinde oluşan değerlerdir. Çizelge 6.8'de de görüldüğü üzere ZPP'nin elektriksel yöntemle ateşlenme enerjisi, lazer yöntemiyle ateşlenme enerjisine kıyasla oldukça yüksektir. Bu enerjinin ZPP yüzeyinin geniş alanına verilmesine bağlı olarak elektriksel yöntemle ateşlenme yoğunluğu lazer yöntemiyle ateşlenme yoğunluğuna göre daha düşüktür. Elektriksel yöntem ile ateşlemedeki yüzey alanına sahip bölgeye lazer yöntemiyle ateşlenmesi durumunda radyasyon ile ısı aktarımı gerçekleşecektir. Bu durumda etkinleşme süresinin ve ateşlenme gecikmesinin, lazer yöntemi ile ateşlemede daha kısa olacağı sonucuna

varılmıştır. Bunun için lazer ışın iletim yüzey alanının en az $4,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, ışın çapının da $800 \text{ }\mu\text{m}$ olması gerekmektedir.

Çalışmadan elde edilen ateşlenme enerji değerlerinden yola çıkılarak ZPP yüzey sıcaklığının kendiliğinden tutuşma sıcaklığına ulaştığı sırada kütlece ne kadar ZPP'nin tepkimeye girdiği hesaplanmıştır şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q_{\text{sistem}} = m_{\text{ZPP}} \cdot C_p \cdot (T_{\text{ateş.}} - T_0) \quad (4)$$

Eş. 4'te Q_{sistem} ateşleyici sisteminden sağlanan ısı enerjisi (J), m_{zpp} ZPP kütlesi (mg), C_p ZPP kalorifik enerjisi (J/mg), $T_{\text{ateş.}}$ ZPP'nin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (K) ve T_0 ateşleyici başlangıç sıcaklığıdır (K). Hesaplama sistemdeki ısı kayıpları ihmal edilmiş ve ZPP siyah cisim olarak kabul edilmiştir. Bununla beraber sistem yatışkın durumda kabul edilmiş, başka bir deyişle ısı aktarımının zamanla değişimi sabit varsayılmıştır.

Çizelge 6.8'de sırasıyla 61,5 mJ ve 9,2 mJ olarak hesaplanan elektriksel ve lazer yöntemlerindeki ateşlenme enerjileri Eş. 4'te Q_{sistem} olarak alınmıştır. Eş. 4, elektriksel ve lazer yöntemleri için kıyaslandığında, elektriksel yöntemde kendiliğinden tutuşma sıcaklığına ulaşan ZPP kütlesinin, lazer yöntemindeki ZPP kütlesinin yaklaşık olarak 7 katı olduğu belirlenmiştir. Buna göre lazer yöntemi için etkinleşme süresinin elektriksel yöntemle kıyasla daha uzun olması teorik olarak kanıtlanmıştır.

Elektriksel yöntemde, ZPP yüzeyinin tamamı HMX ile temas etmemektedir. Bu nedenle ateşleyici haznesi içinde eser miktarda kalıntılara rastlanmıştır. Lazer sisteminde ise ZPP yüzeyinin tamamı HMX ile temas etmektedir. ZPP yanma tepkimeleri ve ZPP-HMX temas yüzeyi sayesinde, lazer ateşleyicide HMX'in tamamının ateşlendiği görülmüştür. Her iki yöntemin tepe basınçları arasındaki yaklaşık 10 bar'lık farkın, elektriksel yöntemde kütlece daha az HMX'in ateşlenmesinden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Elektriksel ve lazer yöntemleri için yanma hızları kıyaslandığında, Çizelge 6.8'de elektriksel yöntemde yanma hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Ateşleyici tasarımında, her iki ateşleyicinin sınırlandırma koşulları farklıdır. Elektriksel yöntemde, sınırlandırılmış yapı bronz haznedeki sağlanmaktadır. Bronz hazne kopma dayanımı (ing. tensile strength) 8 bar'dır. Lazer yönteminde ise sınırlandırılmış yapı PMMA ve Al plakadan sağlanmaktadır. Al plaka kopma dayanımı, Bölüm 4.2.1'de açıklandığı üzere

PMMA plakadan daha düşük olup, 1980 bar'dır. Bu nedenle lazer yönteminde, Al plaka kopmadan önce, HMX yanma tepkimeleri en fazla 1980 bar altında gerçekleşmekte iken, elektriksel yöntemde HMX yanma tepkimeleri, ateşleyici haznesi açılmadan önce en fazla 8 bar altında gerçekleşmektedir. Lazer yönteminde, ateşleyici içindeki ortam basıncının daha yüksek olması sebebi ile yanma tepkimeleri daha hızlı gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak HMX yanma hızı elektriksel yönteme göre daha yüksektir. Her iki yöntem için, yanma ortamının sabit tutulması durumunda ateşleyici yanma hızının da sabit olması beklenmektedir. Yanma hızının ateşleme yönteminden bağımsız olup, sistem tasarımı ile doğrudan ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Elektriksel ve lazer ateşleme yöntemlerinin karşılaştırmasının tutarlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ateşleyici-ateşleme arayüzünün sabit tutulması gerekmektedir. Çalışmada ise ZPP'nin lazer ve elektriksel arayüz ile temas alanı farklıdır. Benzer şekilde ZPP'ye iletilen lazer ışın gücü ve elektriksel güç farklılık göstermektedir. Lazer ışın gücü tarafından sağlanan ısı, ışının geçtiği PMMA plakada soğurulmaktadır. Çalışmada ZPP siyah cisim olarak kabul edilmesine rağmen, ZPP ışının bir kısmını yansıtılmaktadır. Ayrıca, ZPP kendiliğinden ateşlenme sıcaklığına ulaştığı sırada lazer ışını ZPP yüzeyinde açığa çıkan yanma ürünleri tarafından da absorplanmaktadır (Sivan ve Haas, 2015). Bu nedenlerle ZPP yüzeyine ulaşan ışın enerjisinin, çalışmada belirtilen ışın enerjisinden daha düşük olacağı öngörülmüştür.

Hi-Shear Teknoloji tarafından yürütülen çalışmada, 3,5 A akım altında ZPP'nin en az 1 ms, en fazla 6 ms'de elektriksel yöntem ile ateşlenebildiği belirtilmiştir (Callaghan ve Tindlol, 1993). Aynı zamanda bu çalışmada ZPP'nin, 8,7 mJ enerji ile en az 0,39 ms, en fazla 2,5 ms'de lazer ışını ile ateşlenebildiği gösterilmiştir. Söz konusu çalışmada ZPP yüzeyine gönderilen ışın çapı, başka bir deyişle ışın enerjisi yüzey alanından bahsedilmemiştir, ancak enerji yoğunluğunun $15,72 \text{ J/cm}^2$ olduğu açıklanmıştır. Çalışmada verilen ışın enerjisi ve yoğunluğundan yola çıkılarak, ZPP yüzeyine gönderilen ışın çapının 300 μm olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu literatür araştırması sonuçları, tezin bu bölümünde elde edilen sonuçları ve lazer ışın çapı ile ateşlenme gecikmesi ile ilgili yapılan yorumları destekler niteliktedir. Bir başka çalışmada ise 10 mJ lazer ışın enerjisi ile ZPP'nin 6 ms'de ateşlendiği bilgisine yer verilmiştir, ancak çalışmada enerji yoğunluğundan veya ışın çapından bahsedilmemiştir (Chunqiang, Haoyu, Aifeng ve ark., 2017).

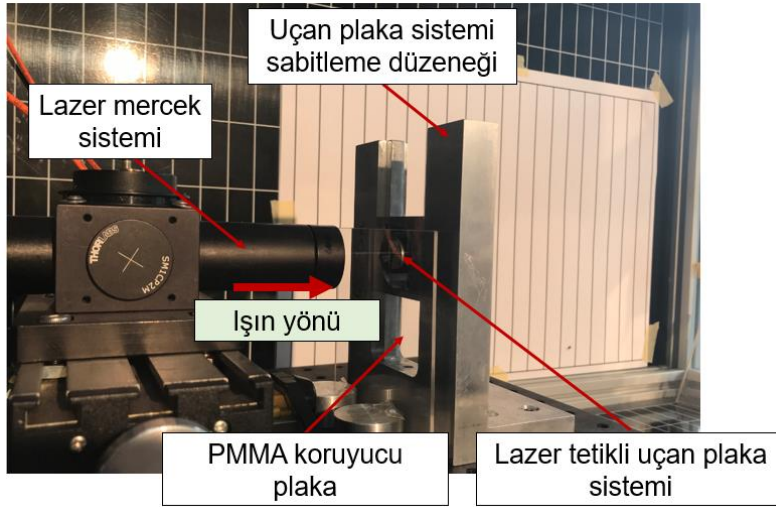
7. LAZER TETİKLİ UÇAN PLAKA PERFORMANS ÇALIŞMALARI

7.1. Uçan Plaka Hızının Belirlenmesi

7.1.1. Deneysel Yöntem

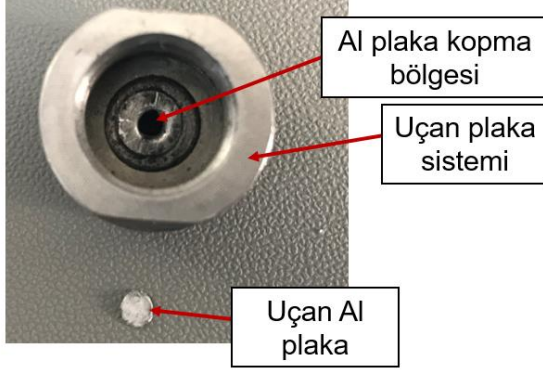
Lazer tetikli uçan plaka sistemi ile gerçekleştirilen ZPP+HMX ateşleme çalışmalarından elde edilen veriler ile en yüksek tepe basıncına ulaşılan ve bu nedenle en yüksek plaka hızının elde edileceği optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir.

6.2.2.2 ve 6.2.2.3 Bölümlerinde deneysel olarak doğrulandığı üzere, Al plakanın hızına doğrudan etki eden sistem tepe basıncı değişmediği için, plaka hızı HMX yoğunluğu ve lazer ışın gücü ile değişmemektedir. 400 µm kalınlıkta Al plaka kullanılan sistemde, 1,32 g/cm³ HMX yoğunluğunda ve 524 mW lazer ışın süresinde, sistemden kopan plaka hızı Şekil 7.1’de verilen düzenek ile hızlı kamera kullanılarak belirlenmiştir.

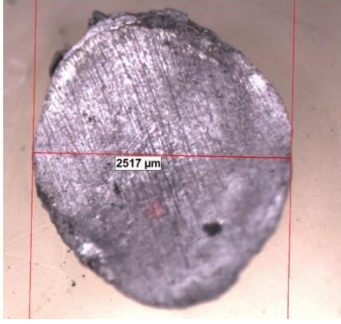


Şekil 7.1. Uçan plaka hızının tayin edildiği sistem

Uçan plaka sistemi çıkışına duyarsız patlayıcı yerleştirilmemiştir. Plakanın sistemden koparak düzlemsel olarak ilerlemesi ve plaka hızının belirlenebilmesi için görüntü elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 7.2’de lazer ile ateşleme sonrası sistemden kopan Al plaka ve uçan plaka gövdesindeki plaka kopma bölgesi verilmiştir. Şekil 7.3’te ise kopan plakanın mikroskop görüntüsü ve 2,5 mm’lik kopma çapı görülmektedir



Şekil 7.2. Lazer ile ateşleme sonrası uçan plaka sistemi görüntüsü



Şekil 7.3. Uçan Al plaka mikroskop görüntüsü

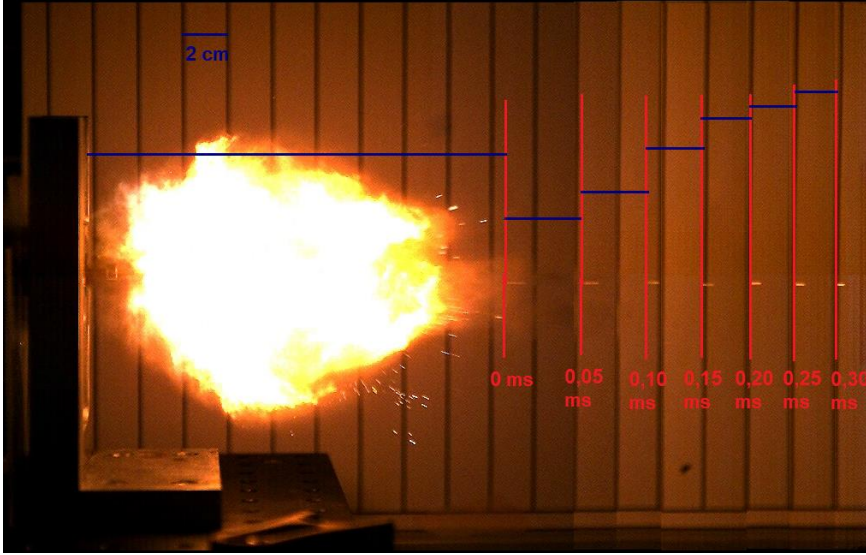
Şekil 7.4'te lazer tetikli uçan plaka sisteminde, kopan plakanın 20000 fps hızındaki hızlı kamera görüntülerine yer verilmiştir. Şekil 7.4'te her bir görüntü 0,05 ms aralıklar ile elde edilmiş olup, plaka uçuş yönüne yerleştirilen 2 cm aralıklı ölçek ile Al plaka hızı hesaplanmıştır. Plaka hızı, aynı sistem parametreleri ile gerçekleştirilen üç tekrarlı testler ile sistemin çıkışından sonra ölçülmüş ve elde edilen hızlı kamera görüntüleri incelenerek zamana karşı plaka hızları belirlenmiştir.





Şekil 7.4. Lazer tetikli uçan plaka hızlı kamera görüntüleri

Şekil 7.5'te tek bir deneysel veriye ait hızlı kamera görüntülerinin birleştirilmiş (üst üste eklenmiş) örnek görseli verilmiştir. Plaka hızının zamana karşı değişimi bu görüntülerden elde edilmiştir (Çizelge 7.1).



Şekil 7.5. Plaka konumunun zamana karşı değişimi

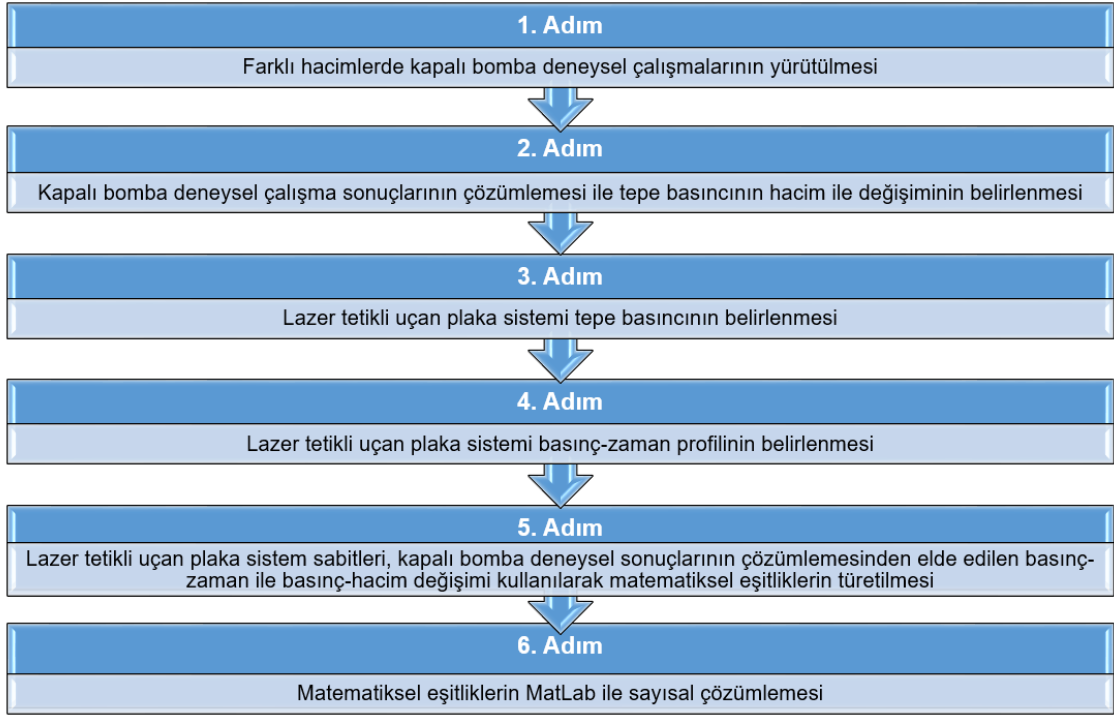
Çizelge 7.1’de, 0,10 ms’ye kadar olan plaka hızları düşük standart hata değerleri ile birbirlerine yakın olarak hesaplanmıştır. 0,10 ms ve sonrasında plaka hızı belirgin bir şekilde düşmüştür. Plaka çıkışından itibaren 0,10 ms’ye kadar olan süreçte plakanın maruz kaldığı sürtünme kuvveti ile sürtünme kuvvetine ters yönde plakaya etki eden basıncın meydana getirdiği itici kuvvetin birbirlerini dengelediği sonucuna varılmıştır. 0,15 ms sonrasında sürtünme kuvvetinin, ortamda genişleyen basıncın etki ettiği kuvvete kıyasla daha baskın olduğu ve bu nedenle plaka hızının düştüğü değerlendirilmiştir. Lazer tetikli uçan plaka hızının sistem çıkışından itibaren 0,10 ms boyunca değişmediği, başka bir deyişle aerodinamik etkilerin dengelendiği sonucuna varılmıştır. Sistem çıkışındaki plaka hızı, 0-0,10 ms zaman aralığında birbirinden bağımsız şekilde alınan üç ölçüm sonucunda elde edilen en düşük ve en yüksek plaka hızlarını kapsayacak şekilde 620 ± 58 m/s olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.1. Plaka hızın zamana karşı değişimi

Zaman (ms)	Plaka Hızı (m/s)
0,00	592 ± 30
0,05	665 ± 12
0,10	630 ± 30
0,15	597 ± 41
0,25	530 ± 58
0,30	488 ± 119

7.1.2. Matematiksel Yöntem

Uçan plaka hızının matematiksel olarak belirlenmesi için Şekil 7.6’da adımları verilen yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 7.6. Uçan plaka hızının matematiksel olarak belirlenmesine yönelik geliştirilen yöntem adımları

Lazer tetikli uçan plaka sistemindeki uçan plaka hızı aşağıda verilen varsayımların kabulü ile belirlenmiştir.

- Plakanın koptuğu basınç statik durum için teorik olarak belirlenmiştir. Plakanın koptuğu basıncın belirlenmesinde sistem içindeki anlık yüksek basınçtan kaynaklanan dinamik etkiler ihmal edilmiştir.
- Lazer tetikli uçan plaka sistemindeki sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir.

1. Adım:

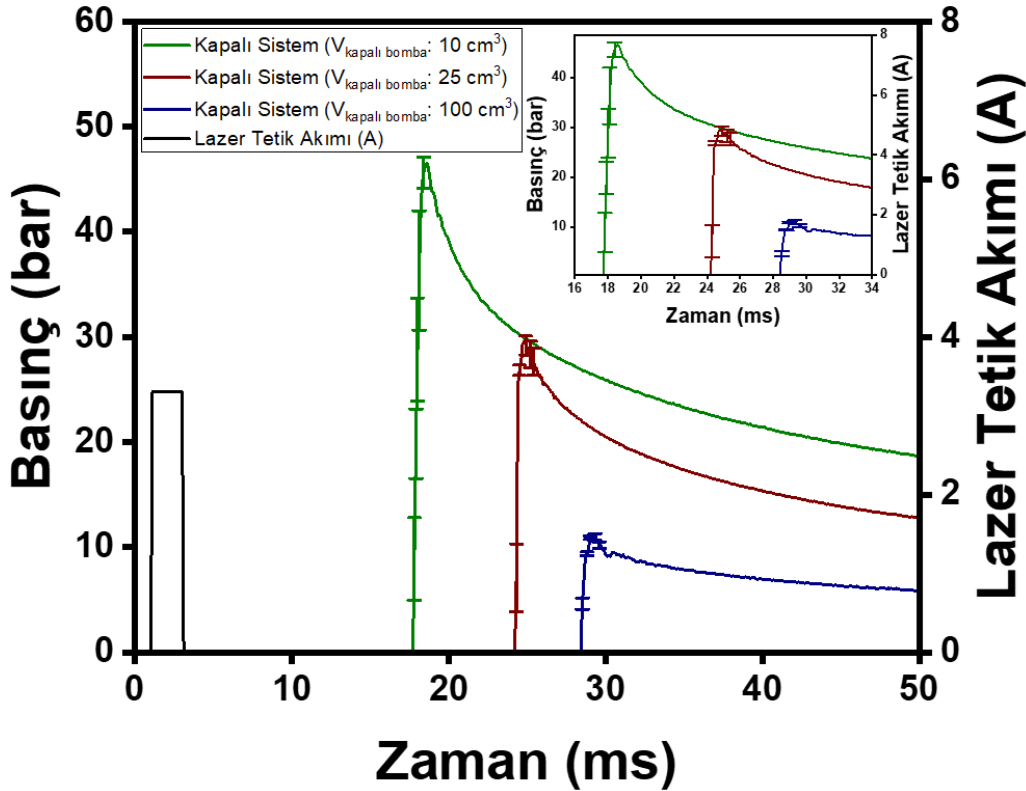
Kapalı bomba deneylerinde Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’te verilen sistem parametreleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada Bölüm 7.1.1’de deneysel olarak uçan plaka hızının belirlendiği HMX yoğunluğu ($1,32 \text{ g/cm}^3$), Al plaka kalınlığı ($400 \text{ }\mu\text{m}$) ve lazer ışın gücü

(524 mW) sabit tutulmuştur. Deneyler, üretilen lazer tetikli uçan plaka sistemi ile farklı iç hacimli kapalı bombalar ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. Kapalı Bomba Deney Parametreleri

Kapalı Bomba Hacmi (cm ³)	HMX Yoğunluğu (g/cm ³)	Uçan Plaka Kalınlığı (μm)	Lazer Işın Gücü (mW)
10	1,32	400	524
25			
100			

Şekil 7.7’de kapalı bomba hacmi arttıkça tepe basıncının azaldığı görülmektedir. Lazer ateşleme parametrelerinin (lazer ışın gücü, süresi ve ışın çapı) aynı olmasına rağmen etkinleşme süresi kapalı bomba hacim artışı ile artmıştır. Bu doğrusal ilişkinin sebebi, yanma sonucu oluşan gazların kapalı bomba hacminde dağılması ve basınç sensörüne ulaşma süresine bağlı olarak değişmesidir.



Şekil 7.7. Kapalı bomba hacminin lazer tetikli uçan plaka sistemi basınç-zaman profiline etkisi

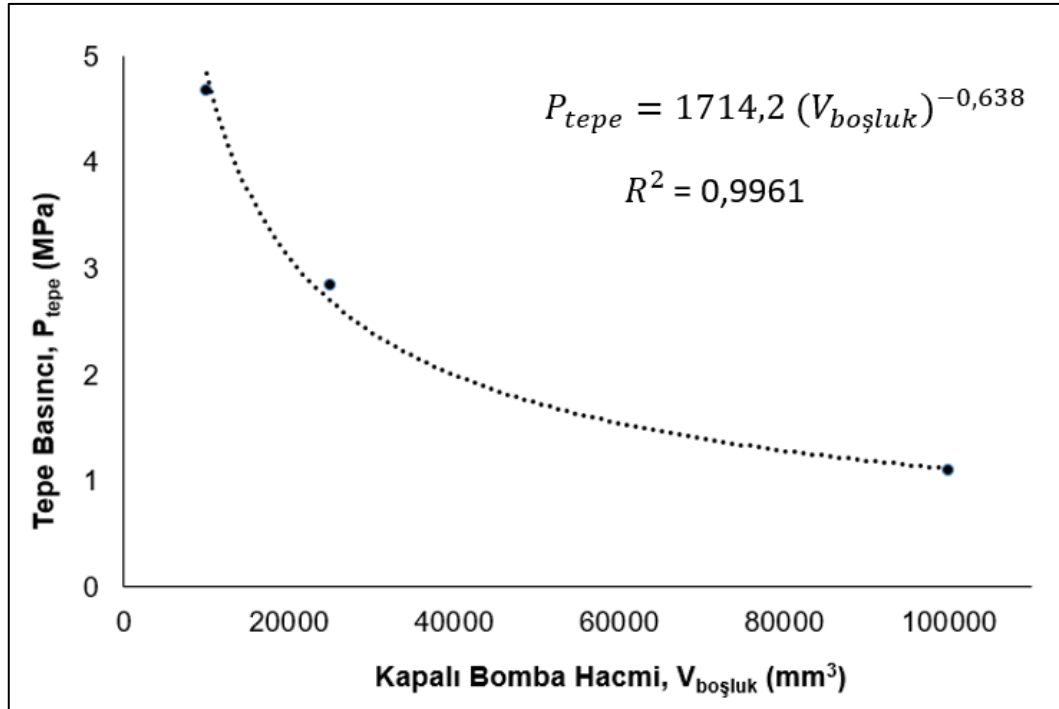
2. Adım:

Kapalı bomba deneysel çalışmalarından elde edilen veriler, Şekil 6.4'te verildiği üzere çözümlenmiş ve Çizelge 7.3'te verilmiştir. . Adım 1'de tepe basıncının, hacmin artması ile azaldığı ve ilişkinin doğrusal olmadığı görülmüştür. Bu adımda basınç-hacim ilişkisi sıcaklık düzeltme faktörü hesaplanarak bulunmuştur. Adiyabatik sistemlerde sıcaklık düzeltme faktörü, 1'dir. Bu sistem adiyabatik olmadığı için basınç-hacim ilişkisi kurulurken sıcaklık düzeltme faktörü de hesaba katılmalıdır.

Şekil 7.8'de ateşlenme sonucu elde edilen tepe basıncının hacim ile değişimi için uydurulan ve sıcaklık düzeltme faktörünü de içeren eğri ve eşitlik görülmektedir.

Çizelge 7.3. Kapalı Bomba Deney Verilerinin Çözümleme Sonuçları

Kapalı Bomba Hacmi (cm ³)	Tepe Basıncı (bar)	Yanma Süresi (ms)	Yanma Hızı (mm/ms)
10	48,4±1,6	0,7±0,1	3,3±0,8
25	29,6±1,2	0,6±0	3,6±0,2
100	11,1±0,2	0,7±0,1	3,2±0,5



Şekil 7.8. Lazer tetikli uçan plaka sistemi tepe basıncının kapalı bomba hacmi ile değişimi

3. Adım:

Lazer tetikli uçan plaka sisteminde Çizelge 6.3'te verilen miktarda enerjik malzeme (ZPP ve HMX) bulunmaktadır. Uçan plaka hızının deneysel olarak belirlendiği sistemde HMX yoğunluğu $1,32 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu sistemde ateşlenme öncesi boşluk hacmi (enerjik malzeme ile Al plaka arasında kalan boşluk, (Şekil 4.1) $12,7 \text{ mm}^3$ 'tür. Al plaka ile sınırlandırılmış bu sistemde, Al plakanın kopmadığı ve sistemin tamamen kapalı olduğu durum için, yani Al plakanın Bölüm 4.2.1'de anlatılan 198 MPa basınçta kopmadığı durum için bu boşluk hacminde ulaşılabilecek tepe basıncı değeri Şekil 7.8'de elde edilen eğri eşitliği ile belirlenmiştir. Buna göre lazer tetikli uçan plaka sisteminde, Al plakanın kopmadığı durumda elde edilebilecek tepe basıncı 338,7 MPa'dır.

4. Adım:

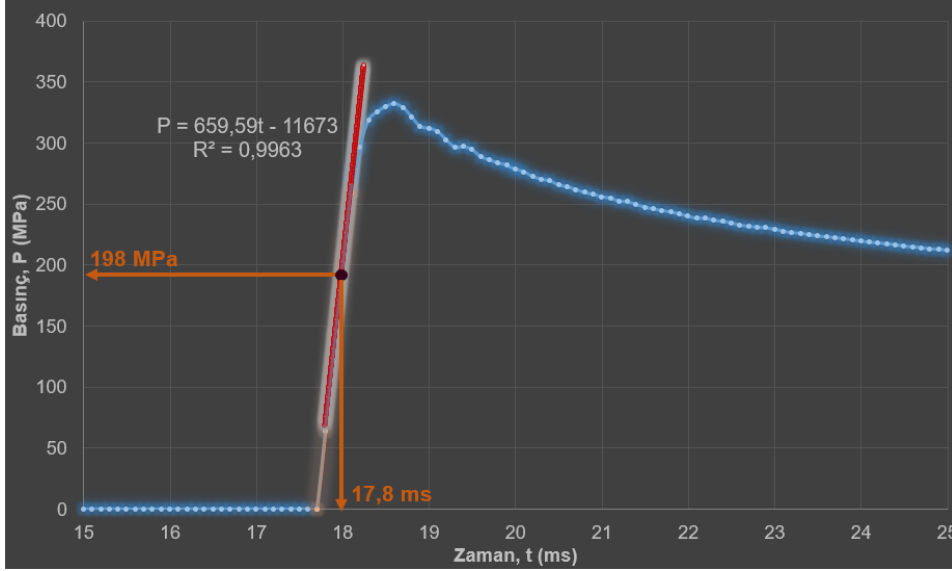
Şekil 4.1'de katı modeli verilen lazer tetikli uçan plaka sistemi ateşlenme sırasındaki basınç-zaman profili, mekanik dayanım kısıtlaması ve uygun sensör bulunamaması sebebi ile deneysel olarak elde edilememiştir. Bu sebeple basınç-zaman profili 1., 2. ve 3. adımlarda elde edilen veriler ve geliştirilen yaklaşımlar kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir.

1. ve 2. adımlarda verilen farklı kapalı bomba hacimleri için elde edilen lazer tetikli uçan plaka sistemi basınç-zaman profilleri (Şekil 7.7) ve bu veriler ile elde edilen sonuçlar (Çizelge 7.3) incelendiğinde sistemdeki yanma süresi ve hızının kapalı bomba hacminden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. Lazer tetikli uçan plaka sistemindeki boşluk hacmi, ateşlenme sonucu tepe basıncına ulaşma eğimini etkilememektedir. Bu nedenle lazer tetikli uçan plaka sistemine ait basınç-zaman profilinde tepe basıncına ulaşma eğiminin (yanma hızı ve süresi), kapalı bomba deneylerinden elde edilen eğim ile aynı olduğu kabulü yapılmıştır. Lazer tetikli uçan plaka sisteminde tepe basıncı, Al plakanın kopmadığı durum için 3. adımda belirlenen 338,7 MPa olarak kabul edilmiştir.

10 cm^3 hacmindeki kapalı bomba sisteminde elde edilen basınç değişimi sonuçlarından tepe basıncı 338,7 MPa ve yanma süresi ile hızı Çizelge 7.3'te verildiği üzere 0,7 ms ve 3,3 mm/ms kullanılarak bir korelasyonu yapılarak lazer tetikli uçan plaka sistemi basınç-zaman profili elde edilmiştir (Şekil 7.9).

Şekil 7.9'da verilen basınç-zaman profilinden ilk basıncın görüldüğü zaman (17,8 ms) ile tepe basıncına ulaşılan zaman (18,6 ms) boyunca basınç artışının doğrusal olduğu

görülmektedir. Bu doğrusal ilişkidenden yararlanılarak lazer tetikli uçan plaka sistemi için basıncın zaman ile değişim eşitliği elde edilmiştir. Tepe basıncına ulaştıktan sonraki basınç-zaman profili uçan plaka hızını belirlemede kullanılmayacağı için tepe basıncına ulaştıktan sonraki profil dikkate alınmamıştır. Bölüm 4.2.1’de belirlenen 400 µm kalınlıktaki Al plakasının koptuğu basınç olan 198 MPa ve bu basınca karşılık gelen zaman, 18,0 ms, Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Lazer tetikli uçan plaka sistemi için teorik olarak elde edilen basınç-zaman profili

5. Adım:

Lazer tetikli uçan plaka sistemine ait sabitler Çizelge 7.4’te, bu sabitlerden hesaplanan sistem parametreleri Çizelge 7.5’te verilmiştir. Sayısal çözümlemede bu sistem sabitleri ve parametreleri Matlab sayısal çözümleme programına girdi olarak tanımlanmıştır. Çizelge 7.6’da verilen değişkenlerin zamana bağlı değişimini veren matematiksel eşitlikler türetilmiştir. Çözümlemede "Adım 2" ile belirlenen tepe basıncının boşluk hacmi ile değişimi ve "Adım 4" ile türetilen lazer tetikli uçan plaka sistem basıncının zaman bağlı değişim eşitlikleri kullanılmıştır.

Şekil 7.10’daki çözümleme algoritmasından görüldüğü üzere, çözümleme 0,001 ms’lik zaman aralıkları ile toplam 250 adım için gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sabitlerin ve değişkenlerin açıklamaları ve birimleri Çizelge 7.4, Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6’da verilmiştir. Ateşleme sonrası sistem içindeki basınç, 400 µm kalınlıktaki Al plakasının

koptuğu basınç değeri olan 198 MPa'a ulaşıncaya kadar plaka hızı ve ivmesi sıfırdır. Sistem içindeki basınç, plakanın koptuğu basınç değerine ulaştıktan sonra plaka ivmesi, hızı, konumu ile sistemdeki boşluk hacmi ve sistem basıncı her bir adım için 0,001 ms zaman aralıklarında hesaplanmıştır. Plaka konumunun, sistem ivmelendirme kanalı olan 7 mm'ye ulaşması sonrası, plaka sistemden çıktığı için sistem değişkenleri sıfır olarak kabul edilmiş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

Çizelge 7.4. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistem Sabitleri

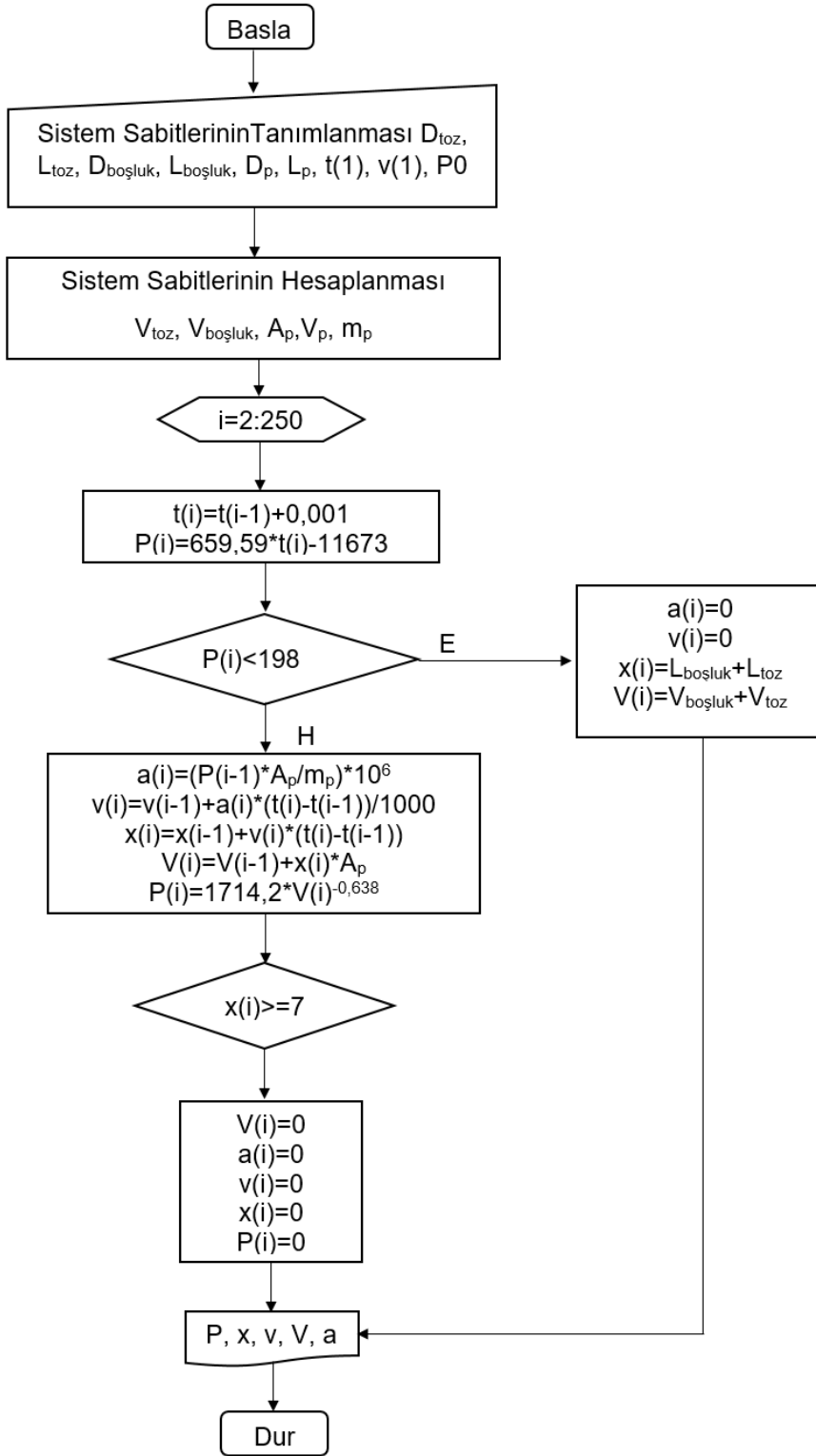
Sistem Sabiti		Açıklama
D_{toz}	4,95 mm	enerjik malzeme çapı
L_{toz}	2,70 mm	enerjik malzeme uzunluğu
$D_{boşluk}$	4,95 mm	ateşlenme öncesi boşluk çapı
$L_{boşluk}$	0,66 mm	ateşlenme öncesi boşluk uzunluğu
d_p	2,7 g/cm ³	uçan plaka (Al T6061) yoğunluğu (Rajkumar et al., 2014)
D_p	2,5 mm	uçan plaka çapı
L_p	0,400 mm	uçan plaka kalınlığı
$t(1)$	17,8 ms	ilk basıncın görüldüğü zaman
$V(1)$	0 m/s	ateşlenme öncesi uçan plaka hızı
P_0	0 MPa	ateşlenme öncesi basınç

Çizelge 7.5. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistemi Hesaplanan Sistem Parametreleri

Hesaplanan Sistem Parametreleri		Açıklama	
V_{toz}	$(\pi * D_{toz}^2 / 4) * L_{toz}$	51,96 mm ³	ateşlenme sonrası enerjik bileşenin olduğu boşluk hacmi
$V_{boşluk}$	$(\pi * D_{boşluk}^2 / 4) * L_{boşluk}$	12,70 mm ³	ateşlenme öncesi boşluk hacmi
A_p	$\pi * D_p^2 / 4$	4,91 mm ²	uçan plaka yüzey alanı
V_p	$A_p * L_p$	1,96 mm ³	uçan plaka hacmi
m_p	$d_p * V_p$	5,30 mg	uçan plaka kütlesi

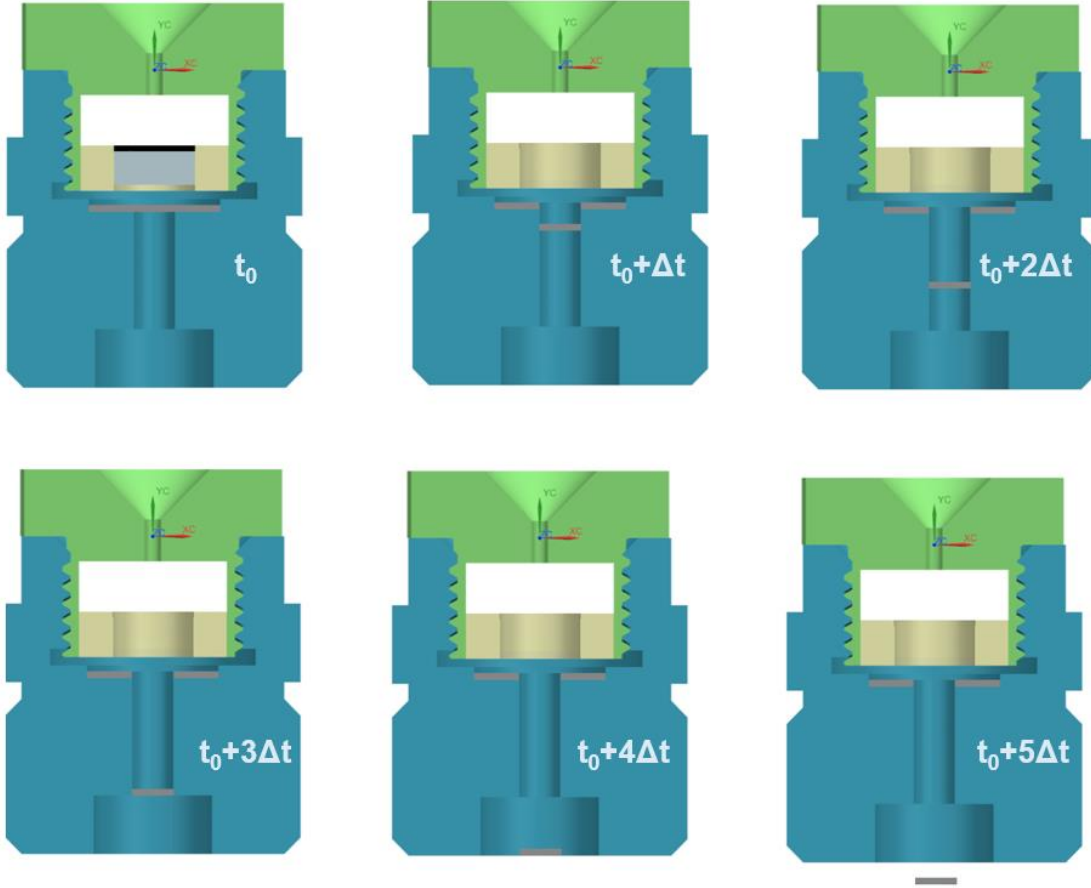
Çizelge 7.6. Lazer Tetikli Uçan Plaka Sistemi Değişkenleri

Sistem Değişkenleri	Açıklama
a (m/s ²)	uçan plaka ivmesi
v (m/s)	uçan plaka hızı
x (mm)	uçan plaka konumu
V (mm ³)	sistemdeki boşluk hacmi
P (MPa)	sistem basıncı



Şekil 7.10. Uçan plaka hızını belirlemeye yönelik oluşturulan ve Matlab ile çözümlenen algoritma

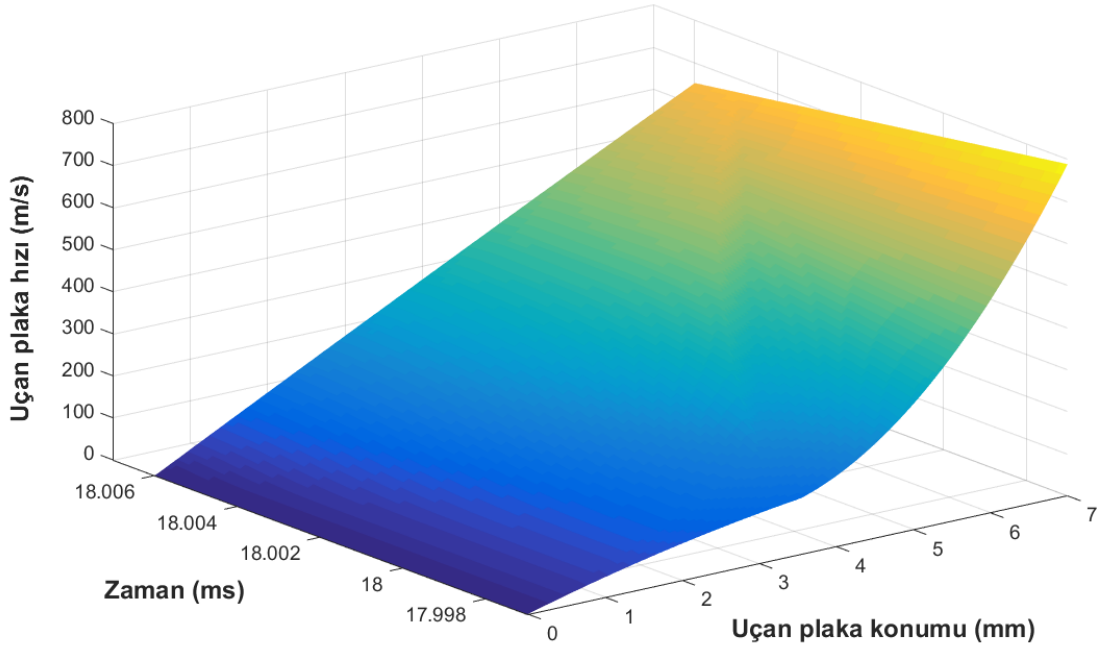
Şekil 7.11’de plakanın lazer tetikli uçan plaka sistemi içindeki konumunun zamana bağlı değişimi basitleştirilerek şematik olarak gösterilmiştir. Gösterimdeki bileşenler Şekil 4.1’de ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Burada t_0 ateşleme anını ifade etmektedir. Δt olarak verilen zaman aralıkları gösterimde temsili olarak verilmiştir.



Şekil 7.11. Plakanın lazer tetikli uçan plaka sistemi içindeki konumunun zamana bağlı basit şematik gösterimi

6. Adım:

1.-5. adımlarda üretilen matematiksel eşitliklerin çözümü ile Çizelge 7.6’da verilen sistem değişkenlerinin zamana karşı değişim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 7.12’de uçan plaka hızının, zaman ve plaka konumu ile değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 7.12. Plaka hızının zaman ve plaka konumuna bağlı değişimi

4. adımda verilen yaklaşıma göre lazer tetikli uçan plaka sisteminde, ateşlenme gecikmesi (lazer ışınının enerjik malzeme yüzeyine gönderilmesi ile ilk basıncın görülmesi arasındaki geçen süre) 17,8 ms'dir (Şekil 7.9). Deneyle elde edilen bu bilgi türetilen matematiksel eşitliklerde başlangıç zamanı olarak kullanılmıştır (Çizelge 7.4).

Şekil 7.12'de görüldüğü üzere 17,998. ms'de plaka, sistem içi basıncın etkisiyle kopmuş ve ivmelendirme kanalında hareket etmeye başlamıştır. 17,998. ms'de sistem içi basıncın 0,4 mm kalınlığındaki Al plaka kopma dayanımı olan 198 MPa'a ulaştığı sonucuna varılmıştır. Plaka, sistem içindeki basıncın etkisiyle 7 mm olan ivmelendirme kanalında Şekil 7.11'de gösterildiği gibi artan hız ile ilerlemiştir. Plaka hızı boşluk çıkışında 667,27 m/s'ye 0,2 ms'de ulaşmıştır. Plaka sistemden 18,005. ms'de ayrılmıştır. Plakanın sistemi terketmesi ile iterasyon sonlanlandırılmış ve Şekil 7.10'da verilen algoritmadan da görüldüğü üzere plaka hızı ile diğer sistem değişkenleri sıfır olarak kabul edilmiştir.

Plaka hızı Bölüm 7.1.1'de, birbirinden bağımsız olarak üç tekrarlı gerçekleştirilen deneysel çalışma ile 620 ± 58 m/s olarak belirlenmiştir. Bölüm 7.1.2'de verilen matematiksel yöntem ile uçan plak hızı 667,27 m/s olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen plaka hızı, deneysel olarak elde edilen plaka hızı toleransları içindedir ve geliştirilen matematiksel yöntemin doğruluğunu ortaya koymuştur. Teorik plaka hızı,

ortalama deneysel hızdan %8, en düşük deneysel hız olan 562 m/s'den %19 ve en yüksek deneysel hız olan 678 m/s'den %1,6 sapma göstermiştir.

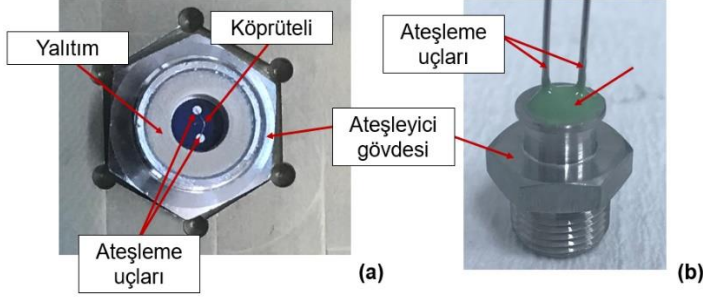
7.2. Duyarsız Patlayıcıların Şok Detonasyonunun İncelenmesi

7.2.1. Yöntem

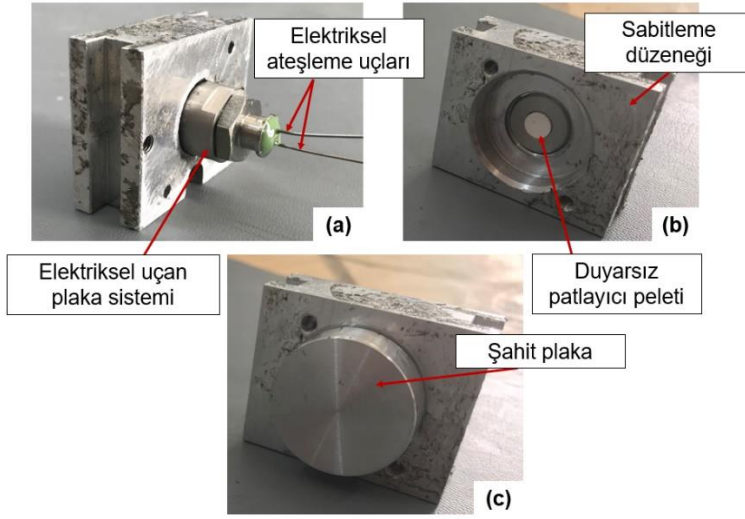
Nominal 620 m/s hıza ulaşan plakanın duyarsız patlayıcı yüzeyine çarpması ile patlayıcıda detonasyonun gerçekleşme durumunun incelenmesi amacıyla çukur testleri (ing. dent test) yürütülmüştür.

Çukur testleri MIL-STD-331-C askeri standardında verilen test 4'e göre gerçekleştirilmiştir (MIL-STD-331-C, 2005). Askeri standartta belirtildiği üzere, sistem çıkışına yerleştirilen ve şahit plaka (ing. witness plate) olarak adlandırılan alüminyum alaşım (T4) yüzeyinde çukur meydana gelmesi ile detonasyonun gerçekleştiğine işarettir. Birçok literatür çalışmasında söz konusu yöntem ile patlayıcı detonasyonu ve detonasyon performansı incelenmiştir (Pimbley, Bowman, Fox, Kershner ve ark., 1980; Cooper, 1994; Yang ve ark., 2006).

Tez çalışması kapsamında üretilen lazer ateşleme sistemi parametrik çalışmaya uygun olarak geliştirilmiş olup, sistem tek kullanımlık bir sistem değildir. Yüksek tahrip gücündeki detonasyonu sırasında lazer ateşleme sisteminin hasar görmesi olasılığı bulunmaktadır. Bu sebeple uçan plaka ile duyarsız patlayıcıların detonasyon performansının belirlenmesi amacıyla elektriksel ateşleyici ile ZPP+HMX ateşleme tepkimeleri başlatılmıştır. Elektriksel ateşleyicinin, lazer ateşleyici çıktısını simüle edebilmesi amacıyla elektriksel ateşleyici gövdesi ve uçan plaka sistemi boyutsal özellikleri, sistemdeki ZPP ve HMX miktarları ve yoğunlukları lazer tetikli uçan plaka sistemi ile aynı tutulmuştur. Tez çalışması kapsamında yürütülen ve Bölüm 6.3'te açıklanan elektriksel ve lazer tetikli ateşleyici karşılaştırma çalışmalarında her iki ateşleyici için benzer sistem çıktıları elde edilmesi, detonasyon çalışmasının elektriksel ateşleyici ile gerçekleştirme olanağını sağlamıştır. Şekil 7.13'te elektriksel ateşleyici gövdesi, Şekil 7.14'te ise elektriksel uçan plaka sistemi ile duyarsız patlayıcı detonasyonu inceleme düzeneği görülmektedir.

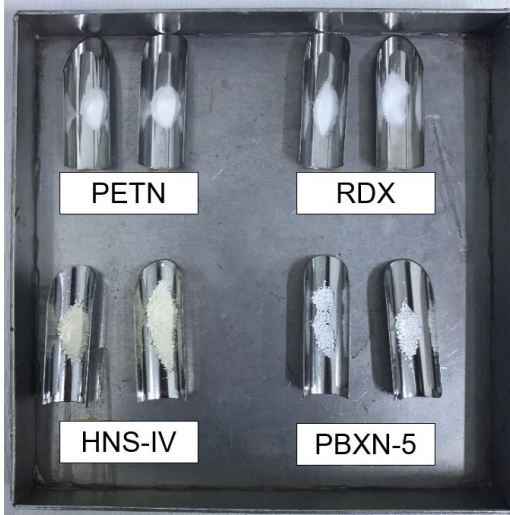


Şekil 7.13. Elektriksel ateşleyici gövdesinin (a) üstten ve (b) karşıdan görünüşü



Şekil 7.14. Elektriksel uçan plaka sistemi ile duyarsız patlayıcı detonasyon inceleme düzeneği, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş, (c) şahit plaka yerleştirilmiş görünüş

Çukur testlerinde Şekil 7.15'te toz numuneleri görülen patlayıcılar pelet haline getirilmiştir. Askeri uygulamalarda sıkça kullanılan PETN, RDX, PBXN-5 ve HNS-IV duyarsız patlayıcı peletleri elektriksel uçan plaka sistemine yerleştirilmiştir. ZPP+HMX'in ateşlenmesi sonucu açığa çıkan basınç ile sistem çıkışında nominal 620 m/s hıza ulaşan Al plaka bu hızda patlayıcı yüzeyine çarpmıştır. Çarpma sonucu patlayıcı yüzeyinde oluşan şok etkisi ile detonasyonun gerçekleşme durumu, patlayıcıya temas eden şahit plaka yüzeyinin incelenmesi ile belirlenmiştir.



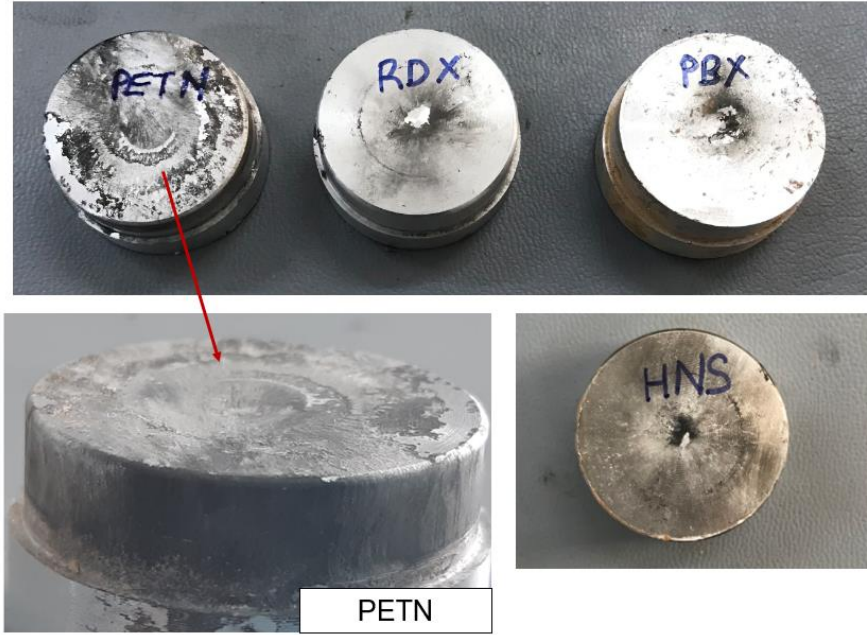
Şekil 7.15. Detonasyonu incelenen duyarsız patlayıcılar (presleme öncesi toz numuneler, 220 mg)

7.2.2. Sonuçlar

Duyarsız patlayıcıların detonasyon performansının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen testlerde patlayıcı etki yüzeyine yerleştirilen şahit plakaların test sonrası görüntüleri Şekil 7.16’da, test parametreleri ve test sonrası şahit plakada açılan çukur derinlikleri ise Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Duyarsız patlayıcılar ile şahit plaka test parametreleri ve çukur testi sonuçları

Duyarsız Patlayıcı	Presleme Basıncı (psi)	Presleme Yüğü (kg)	Pelet Çapı (mm)	Pelet Yüksekliği (mm)	Pelet Yoğunluğu (g/cm ³)	Çukur derinliği (mm)
PETN	8000	216	7	3,8	1,5	0,173
RDX	10000	270	7	3,8	1,5	0,013
PBXN-5	8000	216	7	3,8	1,5	0,026
HNS IV	14500	392	7	4,0	1,4	0,016



Şekil 7.16. Duyarsız patlayıcıların detonasyonu sonrası şahit plakaların görüntüsü

Şahit plakalarda deformasyon meydana gelmesi nedeni ile $1,5 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğundaki PETN, RDX, PBXN-5 ile $1,4 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğundaki HNS IV duyarsız patlayıcıların tez kapsamında geliştirilen uçan plaka sistemi ile detonasyonunun mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Patlayıcıların SDT (ing. shock to detonation transition) eşik değeri patlayıcı yoğunluğu, patlayıcıların uzunluk/çap oranı ve kritik çapı (ing. critical diameter) ile önemli ölçüde değişmektedir. Bu sebeple HNS IV gibi SDT hassasiyeti düşük olan veya çok yüksek yoğunluktaki duyarsız patlayıcıların detonasyonu için plakanın patlayıcı yüzeyine en az 1 km/s hız ile çarpması gerektiği değerlendirilmiştir (Dilhan ve Farfal, 2008).

Şahit plakalarda açılan çukur derinliğinin çok düşük olmasının, patlayıcı yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir. Patlayıcıda detonasyonun SDT yerine DDT mekanizması ile gerçekleşmiş olması durumunda da düşük çukur derinliği elde edilmektedir. Plakanın patlayıcıda şok etkisi ile detonasyonunu başlatacak kadar yeterli hıza ulaşmaması durumunda patlayıcıda deflagraşyon meydana geldiği ve patlayıcı boyunca ilerleyen deflagraşyonun DDT mekanizması ile patlayıcıda detonasyon meydana getirmiş olabileceği değerlendirilmiştir.

7.3. Sistem Parametrelerinin Performans Etkisinin Matematiksel Modelle İncelenmesi

Bölüm 7.1.2’de verilen uçan plaka hızının teorik olarak belirlendiği yöntem ile aşağıdaki parametrelerin:

- Al plaka kalınlığının,
- Uçan plaka malzemesinin,
- Ateşleme öncesi boşluk hacminin ve
- İvmelendirme boşluk uzunluğunun

uçan plaka hızına ve ateşleme sonrası plakanın sistemden çıkma süresine etkisi incelenmiştir.

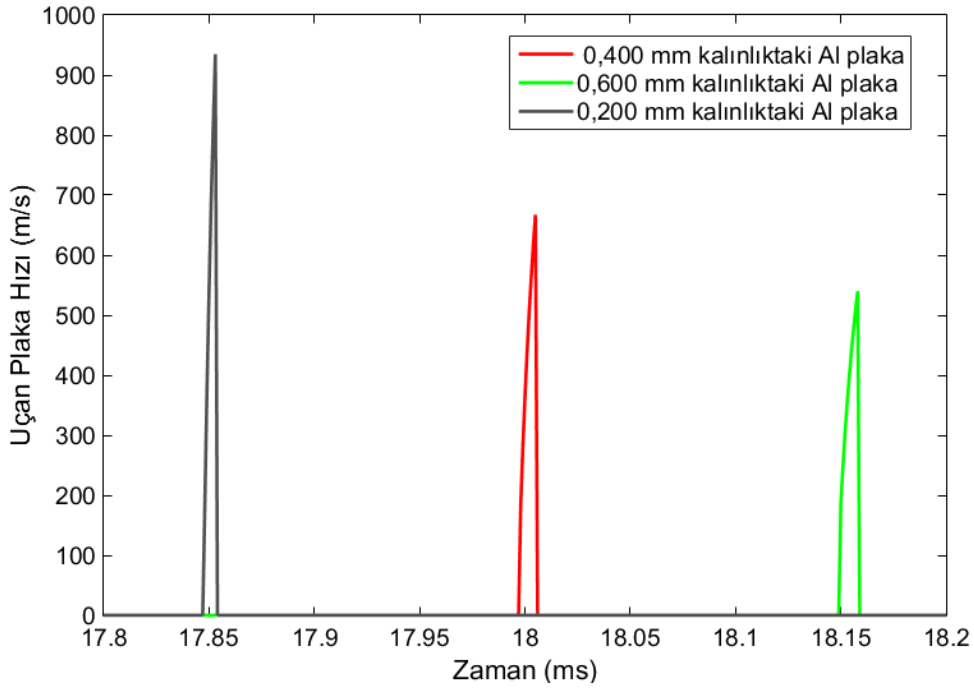
Model verilerinin sistem performansına etkisi değerlendirilirken Bölüm 7.1.2’de verilen varsayımlar kabul edilmiştir. Plaka kalınlığının ve malzemesinin sistem performansına etkisinin değerlendirilmesinde bu varsayımlara ek olarak, sınırlandırılmış yapının yanma hızına etkisi ihmal edilmiştir. Bu varsayımın Bölüm 6.2.2.1’de verildiği üzere farklı plaka kalınlıklarında yanma hızının etkisi çok düşük olduğu için kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

7.3.1. Plaka Kalınlığının Etkisi

Şekil 7.17’de lazer tetikli uçan plaka sisteminde uçan plaka olarak farklı kalınlıkta Al plaka kullanılması durumunda ivmelendirme kanalı çıkışındaki uçan plaka hızları verilmiştir. Şekil 7.17’den elde edilen veriler Çizelge 7.8’de özetlenmiştir.

Model girdisi olarak Çizelge 7.4’te verilen sistem sabitlerinden sadece Al plaka kalınlık girdisi değiştirilmiştir. Bununla beraber farklı kalınlıklardaki Al plakanın kopma basınçları Bölüm 4.2.1’deki gibi hesaplanmıştır. Sistem içindeki basınç 200 µm kalınlıktaki Al plakanın koptuğu basınç değeri olan 99,2 MPa’a, 400 µm kalınlıktaki Al plakanın koptuğu basınç değeri olan 198 MPa’a, 600 µm kalınlıktaki Al plakanın koptuğu basınç değeri olan 297,60 MPa’a ulaştığı anda plakanın koptuğu kabul edilmiş ve Şekil 7.10’da verilen algoritmaya göre çözümlene yapılmıştır.

Şekil 7.17 ve Çizelge 7.8’de görüldüğü üzere plaka kalınlığı azaldıkça lazer tetikli uçan plaka sisteminde ateşlenme sonucu oluşan basıncın etkisiyle 2,5 mm’lik sabit çapta kopan plakanın hacmi ve dolayısı ile kütlesi azalmaktadır. Buna göre kütlesi düşük olan plaka koptuktan sonra arkasında kalan basıncın etkisiyle 7 mm uzunluktaki ivmelendirme kanalı içinde kalınlığı yüksek olan plakaya kıyasla daha yüksek hıza ulaşmaktadır. Plakanın koptuktan sonra sistemden çıkma süresi (plakanın uçuş süresi) μ s mertebelerindedir. Plaka hızına bağlı olarak bu süre, plaka hızı arttıkça azalmaktadır. Sistem içindeki basıncın etkisiyle düşük kalınlıktaki plaka, ateşlenme sonrası basınç dayanımı daha az olduğu için, yüksek kalınlıktaki plakaya kıyasla daha erken kopmaktadır.



Şekil 7.17. Plaka kalınlığının uçan plaka hız-zaman profiline etkisi

Çizelge 7.8. Plaka kalınlığının plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi

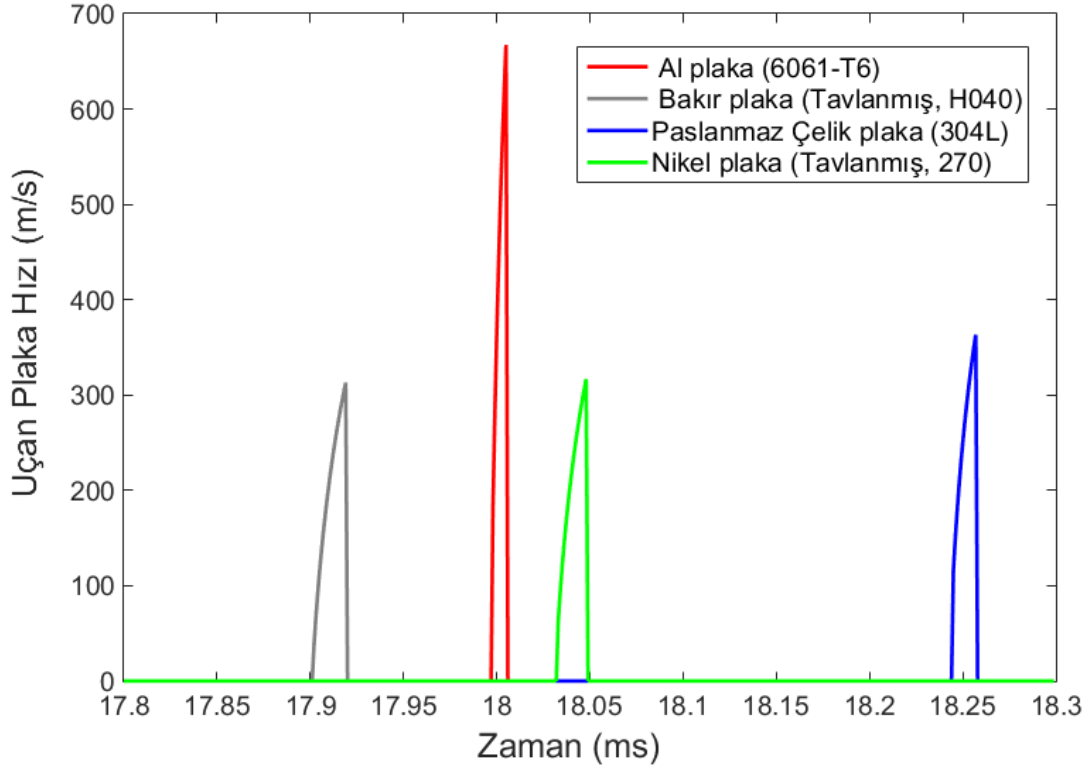
Plaka Kalınlığı (mm)	Kopan Parça Kütlesi (mg)	Plaka Kopma Basıncı (MPa)	Plakanın Sistemde Koptuğu Zaman (ms)	Plakanın Sistemden Çıktığı Zaman (ms)	Plakanın Uçuş Süresi (μ s)	Plakanın Sistem Çıkışındaki Hızı (m/s)
0,200	2,65	99,2	17,847	17,853	6	934,8
0,400	5,30	198,0	17,997	18,005	8	667,3
0,600	7,95	297,6	18,149	18,158	9	540,1

7.3.2. Plaka Malzemesinin Etkisi

Şekil 7.18’de lazer tetikli uçan plaka sisteminde 0,400 mm kalınlıkta farklı plaka malzemelerinin kullanılması durumunda ivmelendirme kanalı çıkışında elde edilecek uçan plaka hızları verilmiştir. Şekil 7.18’den elde edilen veriler Çizelge 7.9’da özetlenmiştir.

Model girdisi olarak Çizelge 7.4’te verilen sistem sabitlerinden sadece plaka yoğunluğu değiştirilmiştir. Bununla beraber farklı malzemelerdeki plakaların kopma basınçları da Bölüm 4.2.1’deki gibi hesaplanmıştır.

Şekil 7.18 ve Çizelge 7.9’da görüldüğü üzere farklı plaka yoğunlukları sebebi ile sistemde aynı hacimde kopan plakaların kütlesi değişmektedir. Buna göre kütlesi düşük olan plaka, kütlesi yüksek olan plakaya kıyasla, ivmelendirme kanalı boyunca daha yüksek hızlara ulaşmakta ve plakanın uçma süresi kısalmaktadır. Farklı malzeme özelliklerine sahip olan plakaların kopma basınçları da farklılık göstermektedir. Kopma basıncı daha düşük olan plakanın kullanıldığı sistemde, uçma hızı ve süresinden bağımsız olarak sistem etkinleşme süresi (lazer tetiğinin verilmesi ile plakanın sistemden çıkması arasında geçen süre) kısalmaktadır. Bu verilere göre etkinleşme süresinin kritik olduğu sistemlerde bakır plaka kullanılması daha uygun iken, plaka hızının kritik olduğu sistemlerde Al plaka tercih edilmesi gerekmektedir.



Şekil 7.18. Plaka malzemesinin uçan plaka hız-zaman profiline etkisi

Çizelge 7.9. Plaka malzemesinin plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi

Plaka Malzemesi	Kopan Parça Kütle (mg)	Plaka Kopma Basıncı (MPa)	Plakanın Sistemde Koptuğu Zaman (ms)	Plakanın Sistemden Çıktığı Zaman (ms)	Plakanın Uçma Süresi (µs)	Plakanın Çıkışındaki Hızı (m/s)
Al (6061-T6)	5,30	198,0	17,997	18,005	8	667,3
Paslanmaz Çelik (304L)	15,32	361,0	18,244	18,257	13	363,3
Nikel (Tavlanmış, 270)	17,46	220,8	18,032	18,048	16	316,8
Bakır (Tavlanmış, H040)	17,55	134,4	17,901	17,919	18	313,2

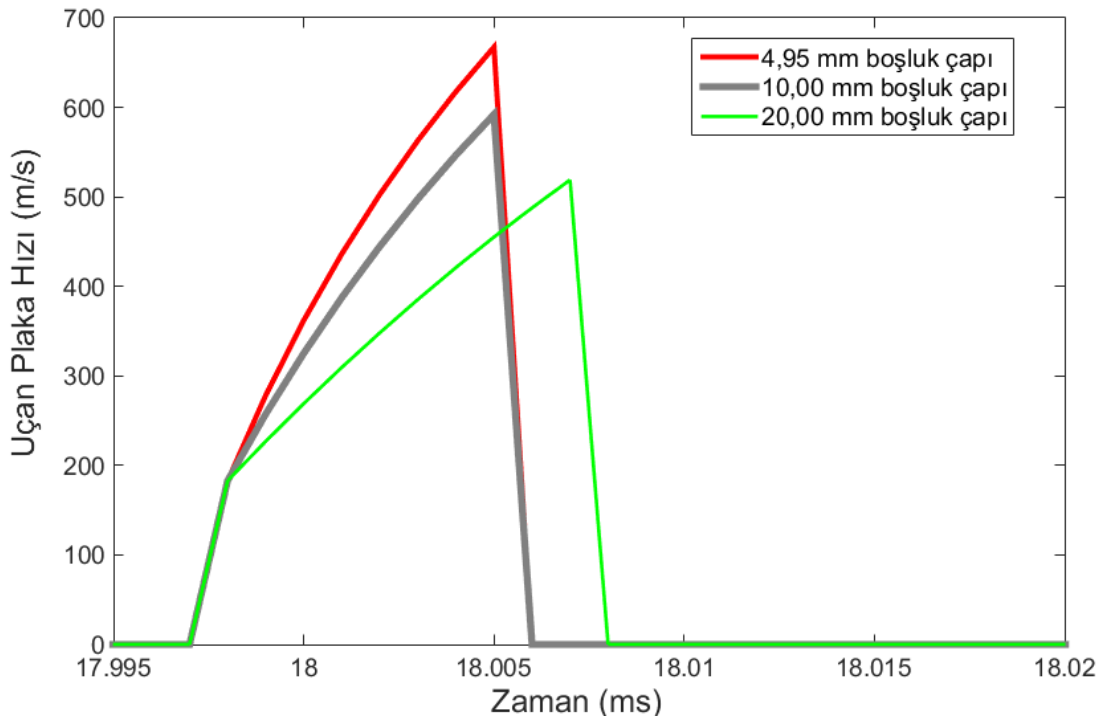
7.3.3. Ateşleme Öncesi Sistem Boşluk Çapının Etkisi

Şekil 7.19’da lazer tetikli uçan plaka sisteminde farklı ateşlenme öncesi boşluk çaplarına sahip ateşleyici gövdelerinin kullanılması durumunda ivmelendirme kanalı çıkışındaki uçan

plaka hızları verilmiştir. Şekil 7.19'dan elde edilen sonuçlar Çizelge 7.10'da özetlenmiştir.

Model girdisi olarak Çizelge 7.4'te verilen sistem sabitlerinden sadece ateşlenme öncesi boşluk çapı değiştirilmiştir.

Şekil 7.19 ve Çizelge 7.10'dan görüldüğü üzere plaka malzemesi veya kalınlığı değişmediği için sistemde plakanın koptuğu zaman değişmemiştir. Bununla beraber boşluk çapı artması ile boşluk hacmi de artmaktadır. Buna bağlı olarak ateşlenme ile sistemde oluşan basınç düşmektedir. Sistem içindeki basınç, ivmelendirme kanalında hızlanarak sistem çıkışına ilerleyen plakanın hızını ve plakanın sistemden çıkma süresini etkilemektedir. Boşluk çapının 4,95 mm'den 20,00 mm'ye artırılması ile plaka hızı düşmesine rağmen, uçuş süresindeki değişim ns mertebelerinde olup plaka uçuş süresinde μ s mertebelerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 7.19. Ateşleyici gövdesi boşluk çapının uçuş plaka hız-zaman profiline etkisi

Çizelge 7.10. Ateşleme öncesi boşluk çapının plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi

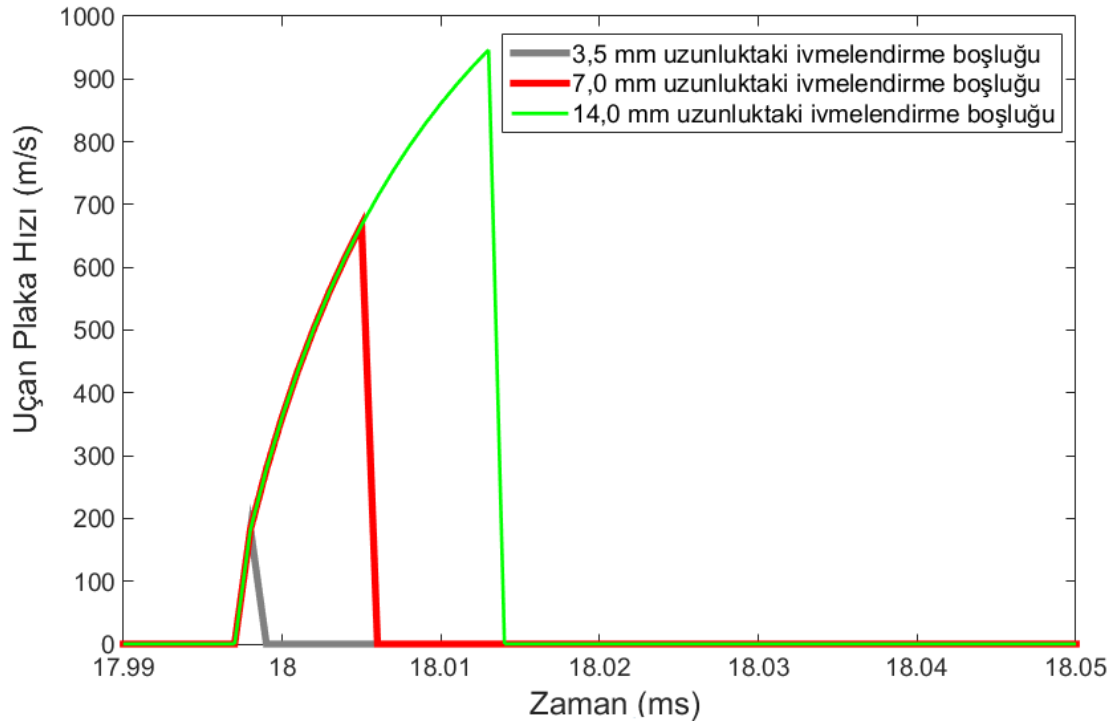
Ateşleme Öncesi Boşluk Çapı (mm)	Ateşleme Öncesi Boşluk Hacmi (mm ³)	Plakanın Sistemde Koptuğu Zaman (ms)	Plakanın Sistemden Çıktığı Zaman (ms)	Plakanın Uçma Süresi (µs)	Plakanın Sistem Çıkışındaki Hızı (m/s)
4,95	12,70	17,997	18,005	8	667,3
10,00	51,84	17,997	18,005	8	592,1
20,00	207,35	17,997	18,007	10	519,0

7.3.4. İvmelendirme Kanal Uzunluğunun Etkisi

Şekil 7.20’de lazer tetikli uçan plaka sisteminde farklı ivmelendirme kanal uzunlukları kullanılarak elde edilen ivmelendirme kanalı çıkışındaki uçan plaka hızları verilmiştir. Şekil 7.20’den elde edilen sonuçlar Çizelge 7.11’de özetlenmiştir.

Model girdisi olarak Çizelge 7.4’te verilen sistem sabitlerinden sadece ivmelendirme kanal uzunluğu değiştirilmiştir.

Şekil 7.20 ve Çizelge 7.11’den görüldüğü üzere plaka kalınlığı ve malzemesinde değişim olmadığı için plaka kopma zamanları değişmemiştir. İvmelendirme boşluk uzunluğundaki artış ile kopan plaka ivmelendirme kanalında daha uzun süre kalmış ve basıncın etkisiyle daha yüksek hıza ulaşarak sistemden çıkmıştır.



Şekil 7.20. Uçan plaka sisteminde ivmelendirme kanal uzunluğunun uçan plaka hız-zaman profiline etkisi

Çizelge 7.11. İvmelendirme boşluk uzunluğunun plaka çıkışına etkisine ilişkin model sonucunun değerlendirilmesi

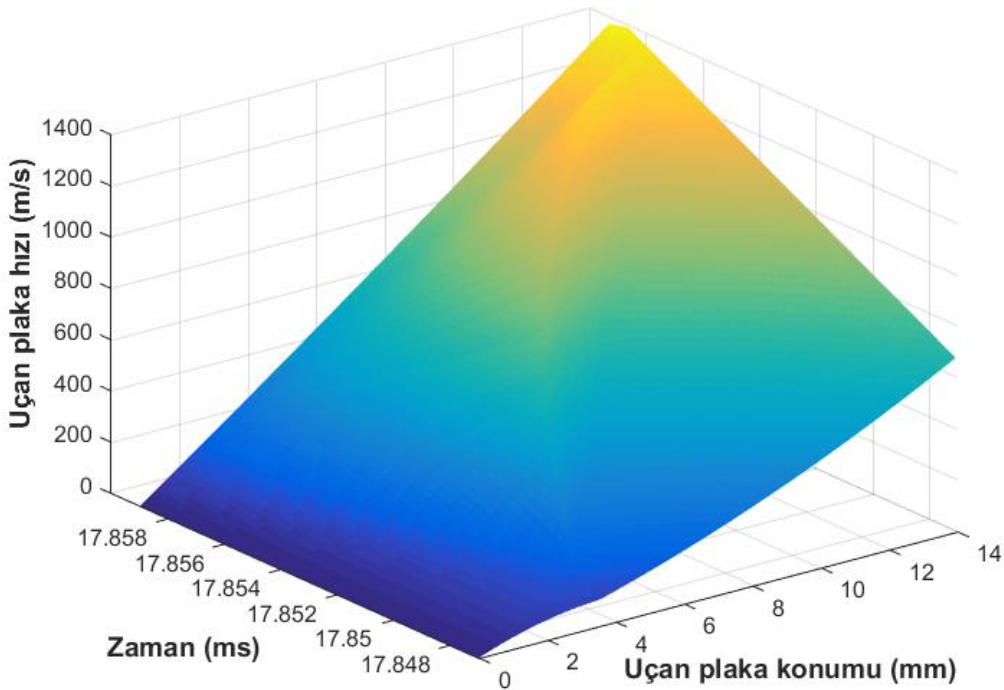
İvmelendirme Boşluk Uzunluğu (mm)	Plakanın Sistemde Koptuğu Zaman (ms)	Plakanın Sistemden Çıktığı Zaman (ms)	Plakanın Uçma Süresi (µs)	Plakanın Sistem Çıkışındaki Hızı (m/s)
3,5	17,997	17,998	1	183,0
7,0	17,997	18,005	8	667,3
14,0	17,997	18,013	16	946,6

7.3.5. Optimum Sistem Parametreleri

Geliştirilen matematiksel model ile lazer tetikli uçan plaka sistem parametrelerinin uçan plaka hızına etkisi belirlenmiştir. Uçan plaka hızının en az 1 km/s hıza ulaşması için sistem tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bölüm 7.2’de de açıklandığı üzere HNS IV gibi SDT hassasiyeti düşük olan veya çok yüksek yoğunluktaki duyarsız patlayıcıların detonasyonun elde edilebildiği sistemin özellikleri belirlenmiştir.

Kopan parçanın düşük ağırlıkta olmasına bağlı olarak yüksek plaka hızının eldesi için sistemde 0,200 mm kalınlıkta Al plakanın kullandığı durum simüle edilmiştir. Ayrıca sistemde alıkonma zamanının artırılması böylelikle basıncın etkisiyle plaka hızının artırılmasına yönelik ivmelendirme kanal uzunluğu 14,0 mm seçilmiştir. Ateşleme sonrası sistem içi basıncın yüksek olması ve plaka hızının artması amacıyla ateşlenme öncesi boşluk çapı 4,95 mm seçilmiştir. Bu veriler kullanılarak elde edilen simülasyon sonucu Şekil 7.21’de verilmiştir.

Şekil 7.21’de de verildiği üzere 0,200 mm kalınlıktaki plaka ateşlenme sonrası 17,847. milisaniyede (sistem içi basınç 99,2 MPa’a ulaştıktan sonra) kopmuştur. Plaka 14 mm uzunluktaki ivmelendirme kanalında artan hız ile hareket etmiş ve sistem çıkışında hızı yaklaşık 1,4 km/s’ye ulaşmıştır. Plaka ateşlenme sonrası 17,858. milisaniyede sistemi terketmiştir. Plakanın uçma süresi 11 μ s’dur.



Şekil 7.21. Optimum sistem parametrelerinde plaka hızının, zaman ve plaka konumu ile değişim grafiği

8. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında lazer tetikli uçan plaka sistemi geliştirilmiştir. Bu prototip sistem ile duyarsız patlayıcıların detonasyonu sağlanmıştır.

Prototip geliştirme çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 915 nm dalgaboyunda en fazla 10 W ışın gücüne sahip ve 50 mm odak mesafesinde 110 µm çapında ışın üreten lazer ateşleme sistemi kurulmuştur (Bölüm 3).
 - Sistemde üretilen ışın gücünün %25'inin sistem arayüzünde kaybolduğu tespit edilmiştir. Enerjik malzeme ateşleme ışını gereksiniminden yüksek enerjide bir lazer kullanılmalıdır.
 - Fokal mesafede lazer ışın şiddeti en yüksek değerindedir. Fokal uzaklıktan sapma durumunda ışın şiddeti azaldığı ve ışın dağılımı homojenliğini kaybettiği için enerjik malzemelerin ateşlenme güvenilirliği düşmektedir.
 - Lazerle ateşleme sisteminde yer alan ve ışını geçiren özellikteki BK-7 ve PMMA gibi bileşenlerin ışını kırdığı ve fokal mesafede sapmaya neden olduğu tespit edilmiştir. 2 mm ve 3 mm kalınlıkta PMMA plaka kullanıldığı durumda fokal mesafeden, sırasıyla +1,5 ve +1,6 mm sapma olmuştur.
- 7,1±0,3 gr ağırlığındaki ateşleyici ve 25,6±0,5 gr ağırlığındaki uçan plaka gövdelerinden oluşan lazer tetikli uçan plaka sistemi üretilmiştir (Bölüm 4).
 - Ateşleyici gövdesinde 3 mm kalınlıktaki PMMA plakanın kopma basıncı 420 MPa'dır. Uçan plaka gövdesinde 0,4 mm kalınlıkta Al plakanın kopma basıncı 198 MPa'dır.
 - Ateşleyici gövdesi sızdırmazlık değeri en fazla $3,7 \times 10^{-9}$ mbar.Lt hava/s'dir.
 - Gövdeler 900 bar basınca dayanıklıdır.
- Saf HMX, %3 karbon siyahı içeren HMX karışımı ve ZPP ile lazer ateşleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Bölüm 5).
 - Saf HMX 7,5 W lazer ışın gücünde ateşlenmemiştir.

- HMX'in karbon siyahı ile homojen karıştırılması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. HMX partiküllerinin tamamının karbon siyahı ile kaplanması için karışımın eleme tekrarının artırılması ve elek açıklığının kademeli olarak azaltılması gerekmektedir.
- Karbon siyahı içeren HMX pelet yüzeyinde 0,5 W güçte lazer ışınıyla ayrışma tepkimeleri başlamıştır. 7,5 W lazer ışın gücünde sürdürülebilir ateşlenme gerçekleşmemiştir. Sürdürülebilir ateşlenme için yüzeydeki lazer ışın çapının artması gerekmiştir.
- ZPP+HMX için 524 mW lazer ışın gücüyle ateşlenme gerçekleşmiştir. 10 cm³ kapalı bombada 1,32 g/cm³ HMX yoğunluğu için 13,8±0,2 bar ve 1,48 g/cm³ HMX yoğunluğu için 18,6±1,9 bar basınç elde edilmiştir.
- Koruyucu plaka olarak 2 mm kalınlıkta PMMA kullanıldığı durumda 1,88 J ve üzerinde enerjiye sahip lazer ışınları ısıl etkiler nedeni ile PMMA'nın deforme olmasına sebep olmuştur. 1,88 J ve üzeri enerjideki lazer ışın uygulamalarında koruyucu plaka olarak daha yüksek kalınlıkta PMMA veya ısıl dayanımı daha yüksek olan UV sınıflı kaynaşık silika, BK-7, safir gibi ışını geçiren malzemelerin kullanılması gerekmektedir.
- ZPP+HMX, elektrik ve lazer ile tetikleminin yapıldığı iki farklı yöntemle ateşlenmiştir. NSI tasarımına göre üretilen elektrikli ateşleyiciler kullanılarak köprü telinden 3,5 A doğru akımın 50 ms süreyle gönderilmesi ile ve lazer tetikli uçan plaka sistemi kullanılarak 524 mW güce sahip ışının 50 ms gönderilmesi ile ateşlenmiştir (Bölüm 6).
 - Elektriksel yöntemde ZPP+HMX'de saf HMX kullanıldığı durumda, düşük patlayıcı yoğunluğunda (1,32 g/cm³) tepe basıncı artmıştır. Aynı yoğunlukta HMX ile %3 karbon siyahı homojen olarak karıştırıldığında yanma süresi azalmıştır.
 - Lazer yönteminde aynı miktarda enerjik malzeme kullanıldığı durumda sınırlandırılmış yapının artırılması ile ulaşılan tepe basıncı ve yanma hızı artmıştır. HMX yoğunluğunun tepe basıncına etkisi bulunmamaktadır. Lazer ışın enerjisinin artışı ile doğru orantılı olarak ateşlenme gecikmesi azalmış ve etkinleşme süresi kısalmıştır.
 - Elektriksel yöntemde kendiliğinden tutuşma sıcaklığına ulaşan ZPP kütlesi, lazer yöntemindeki ZPP kütlesinin 7 katıdır. Bu nedenle

elektriksel yöntemde etkinleşme süresi, lazer yöntemine kıyasla daha kısadır.

- 400 µm kalınlıkta Al plaka kullanılan lazer tetikli uçan plaka sisteminde plaka hızı deneysel yöntemle 620 ± 58 m/s, geliştirilen matematiksel yöntemle 667,27 m/s olarak belirlenmiştir (Bölüm 7).
 - 1,5 g/cm³ yoğunluğundaki PETN, RDX, PBXN-5 ile 1,4 g/cm³ yoğunluğundaki HNS IV duyarsız patlayıcıların üretilen uçan plaka prototipi ile detonasyonu gerçekleştirilmiştir.
 - Geliştirilen matematiksel model ile HNS IV gibi SDT hassasiyeti düşük olan veya çok yüksek yoğunluktaki duyarsız patlayıcıların detonasyonun elde edilebildiği, uçan plaka hızının 1,4 km/s'ye ulaştığı sistem parametreleri belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, S.R. and Cartwright, M., Laser ignition of energetic materials, 1st Edition, John Wiley & Sons, USA, **2015**.
- Ahmad, S.R. and Russell, D.A., Laser Ignition of Pyrotechnics – Effects of Wavelength, Composition and Confinement, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 30 (**2005**) 131.
- Ahmad, S.R. and Russell, D.A., Laser-induced deflagration of unconfined HMX – the effect of energetic binders, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 34 (**2009**) 513.
- Ahmad, S.R. and Russell, D.A., Studies into laser ignition of confined pyrotechnics, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 33 (**2008**) 396.
- Akinci, A., Thomas, K., Munger, A., Nunn, L., Clarke, S., Johnson, M., Kennedy, J., Montoya, D., On the development of a laser detonator, Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing II, 5871 (**2005**) 9.
- Ali, A.N., Son, S.F., Asay, B.W., Decroix, M.E., Brewster, M.Q., High irradiance laser ignition of explosives, Combustion Science and Technology, 175 (**2003**) 1551.
- Ali, A.N., Son, S.F., Sander, R.K., Asay, B.W., Brewster, M.Q., Ignition Dynamics of high explosives, 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 11-14, Nevada, USA, **1999**.
- Assay, B.W., Strategies for understanding deflagration-to-detonation transition, Los Alamos National Laboratory Technical Report, LA-UR-92-1343, USA, **1992**.
- Baer, M.R., Nunziato, J.W., Two phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials, Int. J. Of Multiphase Flow, 12 (**1986**) 861.
- Behrens, J.R., Margolis, S.B., Hobbs, M.L., Eleventh International Detonation Symposium, Office of Naval Research ONR 33300-5, Aspen, **1998**.
- Berger, B., Characterization of the zirconium/potassium perchlorate/ nitrocellulose pyrotechnic system by simultaneous thermogravimetry differential thermal

- analysis-mass spectrometry, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 20 (1995) 266.
- Blachowski, T., Advanced development of the laser initiated transfer energy subsystem (LITES), Proceedings of the 18th International Pyrotechnics Seminar, Breckenridge, CO, USA, 1992.
- Bourne, N.K., *Materials in mechanical extremes, Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, USA, 2013.
- Bourne, N.K., On the laser ignition and initiation of explosives, *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 457 (2001) 1401.
- Bowden, M., Development of a laser detonator, PhD Thesis, Cranfield University, England, 2014.
- Brish, A.A., Galeev, I.A., The mechanism of initiation of condensed explosives by laser radiation, US Army Foreign Science and Technology Center, Original Translation, FSTC-HT-23-1327-71, 4 (1969) 475.
- Brish, A.A., Galeev, I.A., Zaitsev, B.N., Sbitnev, E.A., Tatarintsev, I.V., Vzryva, F.G., Laser-excited detonation of condensed explosives, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2, 3 (1966) 132.
- Brown, J.A., Collins, M., Explosion phenomena intermediate between deflagration and detonation, Army Research Office Scientific and Technical Applications Forecast, Esso Research and Engineering Company, New Jersey, USA, 1976.
- Callaghan, J. and Tindl, S., Laser diode ignition characteristics of zirconium potassium perchlorate (ZPP), Technical Report, N93-20145, Hi-Shear Technology Corp., California, USA, 1993.
- Chunqiang, C., Haoyu, W., Aifeng, H., Bo, J., Yue, M., Design of integrated laser initiator, Proc. of SPIE 10710, Young Scientists Forum, Shanghai, China, 2017.
- Crimea, Russia September 9, 2016 A thermobaric bomb explosion during the Caucasus 2016 strategic drill, <https://www.imago-images.com/st/0073306038> (Erişim tarihi: 20.06.2022).

- Cooper, P.W., Comments on TNT Equivalence, Technical Report, 87185-1156, S.N., Sandia National Laboratories, USA, **1994**.
- Davies, N., Pyrotechnics Handbook, Cranfield University, Defence Colleague, England, **2013**.
- Dilhan, D. and D. Farfal, Overview of Recent Developments of Optopyrotechnics in Space Applications, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit., Hartford, CT, **2008**.
- Dinegar, R.H., All-Secondary Explosive Flying-Plate Detonators, Technical Report, LA-9443-MS, Los Alamos National Laboratory, New Mexica, USA, **1982**.
- Dosser, L.R. and Kramer, D.P., Processing and testing of hermetic optical connectors, feedthroughs and laser initiated energetic components, Laser Institute of America-ICALEO, 1102 (**1995**) 1102.
- DRDC's experimental proving ground supports CAF, allied readiness, <https://www.canada.ca/en/defence-research-development/news/articles/drdc-experimental-proving-ground-supports-allied-readiness.html> (Erişim tarihi: 20.06.2022).
- Duginov, E. V. and Khaneft, A. V., Effect of the temperature dependence of the absorption coefficient on the critical energy of ignition of condensed substances by a laser pulse, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 47 (**2011**) 490.
- Ewick, D.W., Graham, J.A. and Hawley, J.D., Laser diode initiated detonators for space applications, NASA Technical Report N93-20147, USA, **1993**.
- Fang, X. and Ahmad, S.R., Laser ignition of an optically sensitised secondary explosive by a diode laser, Central European Journal of Energetic Materials, 13 (**2016**) 103.
- Fang, X. and Ahmad, S.R., Laser ignitability of insensitive propellants, Advanced Materials Science, 3 (**2018**) 1.
- Gottfried, J.L., Chase, A., Colburn, J., Beyer, R.A., Initial Testing of a Prototype Laser Ignition Chamber, Technical Report, ARL-TR-6862, Army Research Laboratory, USA, **2014**.

- Goveas, S.G., Drake, R.C., Field, J.E., A study of the laser ignition of HMX/carbon black compositions, 30th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 29–July 2, **1999**, p. 22.
- Hagan, J.T., Chaudhri, M.M., Low energy laser initiation of b-lead azide, *Journal of Materials Science*, 16 (**1981**) 2457.
- Hagan, J.T., Chaudhri, M.M., Low energy laser initiation of single crystals of b-lead azide, In Proc. 7th Symp. on Detonation, Dahlgren, VA: Naval Surface Weapons Center, USA, **1983**.
- Harkoma, M., Confinement in the diode laser ignition of energetic materials, PhD Thesis, Tampere University of Technology, Finland, **2010**.
- He, H., Kobayashi, T., Sekine, T., Time-resolved measurement on ablative acceleration of foil plates driven by pulsed laser beam, *Review of Scientific Instruments*, 72, 4 (**2001**) 2032.
- Held, M., Flying plate detonator, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 21, 3, (**1996**), 134.
- Hennings, G.N., Teschke, D.K., Reynolds, R.K., Energetic material initiation device utilizing exploding foil initiated ignition system with secondary explosive material, US6923122B2, US Patent, **2002**.
- Holy, J., Girman, T., The effects of pressure on laser ignition of TiHx/KClO₄ and other pyrotechnics, Proceedings of the 13th International Pyrotechnics Seminar, Grand Junction, CO, USA, **1998**.
- Joas, M., Klapötke, T. M., Stierstorfer, J., Preparation and crystal structure of diaqua(μ -5,5'-bistetrazolato- κ 4N1,N2,N5,N6) copper(II), *Crystals*, 2, (**2012**), 958.
- Joas, M., Investigations concerning the laser ignition of energetic coordination compounds, PhD Thesis, LMU, Munich, 2014.
- Joas, M., Klapötke, T. M., Polynuclear chlorido metal(II) complexes with 1,2-Di(1H-tetrazol-1-yl) ethane as ligand forming one and two dimensional structures, *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 640, (**2014**), 1886.

- Joas, M., Klapötke, T. M., Szimhardt, N., Photosensitive metal(II) perchlorates with 1,2-Bis[5-(1-methylhydrazinyl)tetrazol-1-yl] ethane as ligand: synthesis, characterization and laser ignition, *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2014, **(2014)** 493.
- Johnson, O.H., HMX as a military explosive, Navord Report No: 4371, USA, **1956**.
- Johnston, L.H., Electric initiator with exploding bridge wire, US3040660A, US Patent, 1962.
- Kennedy, J.E., Motivations for laser detonator and firing Ssystem developments, *Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing II*, 6287 **(2006)** 8.
- Khan, A., Malik, A.Q., Lodhi, Z.H., Development and study of high energy igniter/booster pyrotechnic compositions for impulse cartridges, *Central European Journal of Energetic Materials*, 14 **(2017)** 933.
- Kızılırmak, İ., Bor Potasyum Nitrat Piroteknik Üretimi ve Lazer ile Ateşlenme Karakteristiğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
- Kurokawa, K., Tasaki, Y., Hattori, K., Sato, T., Mijajima, T., Takano, M., Experimental study of laser-initiated detonator, *Kogyo Kayaku* 52 **(1991)** 181.
- Lee, J.S., Hsua, C.K., The effect of different zirconium on thermal behaviors for Zr/KClO₄ priming composition, *Thermochimica Acta*, 367 **(2001)** 375.
- Li, Y., Wierzbicki, T., Sutton, A.A., Yan, J., Deng, X., Mixed mode stable tearing of thin sheet AI 6061-T6 specimens: Experimental measurements and finite element simulations using a modified MohrCoulomb fracture criterion, *International Journal of Fracture*, 168 **(2011)** 53.
- Liau, Y.C., Lyman, J.L., Modeling laser-induced ignition of nitramine propellants with condensed and gas-phase absorption, *Combustion Science and Technology*, 174 **(2002)** 171.

- Merson, J.A., Salas, F.J., Safety analysis of optically ignited explosive and pyrotechnic materials, Sandia National Laboratories, Technical Report, SAND94-0295C, **1994**.
- Merson, J.A., Salas, F.J. Harlan, J.G., The development of laser ignited deflagration-to detonation transition (DDT) detonators and pyrotechnic actuators, Joint USA-Russia Energetic Material Technology Symposium Livermore, California, **1994**.
- MIL-STD-331-C, Department of defense test method standard: fuze and fuze components, environmental and performance tests for, **2005**.
- MIL-DTL-45444C, Detail specification HMX (cyclotetramethylene tetranitramine), 26 Kasım, USA, **1996**.
- MIL-STD-1751A, Department of defense test method standard safety and performance tests for the qualification of explosives (high explosives, propellants, and pyrotechnics), 11 Aralık, USA, **2001**.
- Moore, C.J., Roberson, L.B., Morgan, J.G., Carney, J.N., Whittaker, J.T., Glass, J.D., Thermal-mechanical characterization of bridgewires and surrounding materials utilizing thermal transient testing, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 25-27 Temmuz, 2016, Salt Lake City, USA, **2016**.
- Opdebeck, F. and Gillard, P., Optimization of interface conditions in the case of laser diode ignition of pyrotechnic mixtures, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 26 (**2001**) 196.
- Ostmark, H., Grans, R., Laser ignition of explosives: effects of gas pressure on the threshold ignition energy, Journal of Energetic Materials, 8 (**1990**) 308.
- Oyler, K.D., Mehta, N., Cheng, G., Overview of explosive initiators, U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center, Technical Report, NARMET-TR-15017, New Jersey, USA, **2015**.
- Paisley, D.L., Prompt detonation of secondary explosives by laser, 9. International Symposium on Detonation, Conference, Portland, USA, 1989.

- Paisley, D.L., Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives, *Shock Compression of Condensed Matter*, 1989.
- Pawluczyk, R., , Preliminary study on laser-driven flyer-plate generation for shock initiation of secondary explosives, Technical Report, INO 95-1208 RFI N/A, Canada, **1995**.
- Pimbley, G.H., Bowman, A.L., Fox, W.P., Kershner, J.D. Mader, C.L. Urizar, M.J., Investigating explosive and material properties by use of the plate dent test, Los Alamos Scientific Laboratory, Technical Report, LA-8591-MS, **1980**.
- Proud, W.G., Ignition and detonation in energetic materials: an introduction, Technical Report, STO-EN-AVT-214, S&T Organization, 2013.
- Rajkumar, K., Santosh, S., Ibrahim, J.S., Gnanavelbabu, A., Effect of Electrical discharge machining parameters on microwave heat treated Aluminium-Boron carbide-Graphite composites, *Procedia Engineering* 97 (**2014**) 1543.
- Renlund, A.M., Stanton, P.L., Trott, W.M., Laser initiation of secondary explosives, In Proc. 9th Symp. (Int.) on Detonation, Arlington, VA: Office of the Chief of Naval Research, USA, **1989**.
- Sheffield, S.A., Fisk G.A., Particle velocity measurements in laser irradiated foils using Orvis, *Shock Waves in Condensed Matter* (**1983**) 243.
- Shen, R., Wu, L., Zhang, W., Zhang, H., Laser ablation-from fundamentals to applications, Itina, T.E. (Ed.), Vol. 1, IntechOpen, Croatia, Chapter 13, 2017.
- Sketchell, R.E., Trott, W.M., Prompt laser ignition and transition to detonation in secondary explosives", Sandia National Laboratories, Technical Report, SAND94-0774, USA, **1995**.
- Sivan, J., Haas, Y., Laser ignition of various pyrotechnic mixtures – an experimental study, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 40 (**2015**) 755.
- Spring, C.C, Spark gap isolated, RF safe, primary explosive detonator for downhole applications, US 0186476, US Patent, **2012**.

- Steven W.D, Frank, C.L., Gottfried, J.L., Characterization of laser driven flyer plates, in New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, **2016**.
- Tang, X., Prakash, V., Lewandowski, J., Dynamic Tensile Deformation of Aluminum Alloy 6061-T6 and 6061-OA, Research Gate Publication, No:229004194, **2006**.
- Tarver, C.M., Chemical kinetic modeling of HMX and TATB laser ignition tests, Journal of Energetic Materials, 22 (**2004**) 93.
- Varesh, R., Electric detonators: EBW and EFI, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 21, 3 (1996) 150.
- Varghese, P.L., Investigation of energy transfer in the ignition mechanism of a nasa standard initiator, Texas University Technical Report, No: NAG9 – 201, USA, **1988**.
- Varghese, P.L., Investigation of heat transfer in zirconium potassium perchlorate at low temperature: a study of the failure mechanism of the NASA standard initiator, Texas University Technical Report, No: NAG9 – 301, USA, **1989**.
- Wahab, A.A., Ataya, S., Silberschmidt, V.V., Temperature-dependent mechanical behaviour of PMMA: Experimental analysis and modelling, Polymer Testing, 58 (**2017**) 86.
- Watson, S., Field, J.E., Measurement of the ablated thickness of films in the launch of laser-driven flyer plates, Journal of Physics, Applied Physics, 2 (**2000**)170.
- Weinheimer, R., Properties of selected high explosives, 27th International Pyrotechnics Seminar, 16-21 Temmuz, USA, **2002**.
- Yang, L.C., et al., Methods for Correction of Factors Affecting Dent Depth Measurement in Witness Plates, in 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit., California **2006**.
- Yang, L.C., Menichelli, V.J., Initiation of insensitive explosives by laser energy, Jet Propulsion Laboratory, Technical Report, 32-1557, USA, **1972**.

Yong, L., Nguyen, T., Waschl, J., Laser ignition of explosives, pyrotechnics and propellants: a review, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Technical Report, , DSTO-TR-0068, Australia, **1995**.

Yong, L. and Valenta, F., A study of radiant ignition of a range of pyrotechnic materials using a CO₂ laser, Technical Report, MRL-TR-90-20, Materials Research Laboratory, Australia, **1990**.

Zhang, W., Shen, R., Ye, Y., Wu, L., Zhu, P. and Hu, Y., Distribution and formation of particles produced by laser ablation of cyclotetramethylene tetranitramine, *Laser and Particle Beams*, 35 (**2017**).

