



**ALÜMİNYUM KATKILI YÜKSEK ENERJİLİ PATLAYICILARIN
DETONASYONU SONRASI DURUMUNUN SAYISAL VE DENEYSEL
OLARAK BELİRLENMESİ**

Sadık Samet BALKOCA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sadık Samet BALKOCA

21/07/2022

ALÜMİNYUMLU YÜKSEK ENERJİLİ PATLAYICILARIN DETONASYONU SONRASI DURUMUNUN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sadık Samet BALKOCA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Bu çalışmada, alüminyum katkılı yüksek enerjilik malzemelerin detonasyonu sonrası ortaya çıkan reaksiyon ürünlerinin genleşme durumu incelenmiş, JWL (Jones-Wilkins-Lee) hal denklemi parametrelerinin belirlenmesi için plaka hızlandırma ve silindir genleşme test yöntemleriyle deney düzenekleri kurulmuştur. Detonasyon sonrasında alüminyumun yanma oranı ve reaksiyon gazlarının genleşmesine katkısının bulunması için zamana bağlı JWL (TD-JWL) denklemi kullanılmıştır. Kurulan plaka hızlandırma düzeneğiyle testler yapılmış ancak bakır plaka yüzeyinde oluşan bölgesel erimeler nedeniyle plakanın yansıtıcılığı bozulduğundan dolayı veri alınamamıştır. Yapılan deneme testlerinde plaka ekseninin bozulmaması için ateşleme sisteminde düzlemsel dalga merceği ve empedans eşleştirme yöntemi gibi ek uygulamalar yapılmasına rağmen plaka hızlandırma test yöntemi başarılı olmamıştır. JWL parametrelerinin elde edilmesi için test çalışmalarına silindir genleşme test yöntemi ile devam edilmiştir. Bu test yönteminde özgün tasarım yapılarak testlerde başarılı sonuçlar alınmıştır. Testlerde JWL parametrelerinin bulunması için ideal davranış gösteren PBXN110 benzeri S110 ve ideal davranış göstermeyen alüminyum katkılı patlayıcı olarak PBXN109 benzeri S109 patlayıcıları kullanılmıştır. Alüminyumlu patlayıcı içindeki alüminyumun detonasyon enerjisine katkısının belirlenmesi için alüminyumla aynı kütleli oranda inert LiF malzemesi ile yeni bir patlayıcı üretilmiştir. Testler sonucunda veriler değerlendirilerek bu patlayıcıların deneysel JWL parametreleri elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen JWL parametreleri, literatürden bulunan ve EXTEC termokimyasal kodu ile hesaplanan JWL parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için SPEED hidrokodunda hazırlanan silindir genleşme test düzeneği modeli kullanılmıştır. Yapılan SPEED hidrokod analizleri sonucunda, patlayıcıların performansında önemli olan silindir duvarının hızlanmaya başladığı zamanların ve ulaştıkları en yüksek hız değerlerinin tüm patlayıcılar için aynı seviyelerde olduğu görülmüştür. S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcılarının silindir duvar hızları karşılaştırılarak S109 (LiF) patlayıcısının JWL modeline Miller modeli eklenerek SPEED analizleri S109 (Al) patlayıcısının hız eğrisi elde edilene kadar deneme yanılma yoluyla tekrarlanmıştır. Sonuç olarak Miller modelinin parametreleri bulunmuş, S109 (Al) patlayıcısı için TD-JWL denkleminin parametreleri elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91405

Anahtar Kelimeler : Balistik, plaka hızlandırma testi, silindir genleşme testi, JWL, detonasyon, Speed.

Sayfa Adedi : 166

Danışman : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STATE OF ALUMINIZED HIGH ENERGETIC EXPLOSIVES AFTER DETONATION

(M. Sc. Thesis)

Sadık Samet BALKOCA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

In this study, the expansion state of the reaction products after detonation of aluminized high-energetic materials was investigated, and experimental setups were set up by plate acceleration test and cylinder expansion test method to determine the JWL (Jones-Wilkins-Lee) equation of state parameters. Time dependent JWL (TD-JWL) equation was used to find aluminum combustion rate and its contribution to expansion state of the reaction gases after detonation. Tests were made with the plate acceleration test setup, but data could not be obtained because the reflectivity of the plate was impaired due to regional melting on the plate surface. Although additional applications such as a plane wave lens in the ignition system to prevent the plate axis from distorted and impedance matching method were applied in the trial tests with standard explosives, the plate acceleration test method could not be successful. In order to obtain the JWL parameters, the test studies were continued with the cylinder expansion test method. In this test method, successful results were obtained in the tests by making an original design. In the tests, explosive S110 like PBXN110, which exhibits ideal behavior, is used and S109 like PBXN109, which exhibits non-ideal behavior, were used to obtain their JWL parameters. In order to determine the contribution of aluminum in aluminized explosives to the detonation energy, a new explosive was produced by using inert LiF with the same mass ratio of aluminum. By evaluating the results of the tests, the experimental JWL parameters of the explosives were obtained. Experimentally obtained JWL parameters were compared with the JWL parameters found in the literature and calculated with the EXTEC thermochemical code. For comparison, the cylinder expansion test setup model prepared in the SPEED hydrocode was used. As a result of the SPEED hydrocode analyses, it has been seen that the times when the cylinder wall starts to accelerate and the highest velocity values that are important in the performance of the explosives are at the same levels for all explosives. By comparing the cylinder wall velocities of S109 (Al) and S109 (LiF) explosives, Miller model was added to the JWL model of S109 (LiF) and SPEED analyses were repeated until reaching the velocity curve of the S109 (Al) explosive by trial and error method. As a conclusion the parameters of the Miller model were found, and the parameters of the TD-JWL equation for the S109 (Al) explosive were obtained.

Science Code : 91405

Key Words : Ballistics, plate acceleration test, cylinder expansion test, JWL, detonation, Speed.

Page Number : 166

Supervisor : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca başta değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Sayın Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA 'ya teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasında teknik ve manevi destek veren Hedef Balistiği Birimi ve Tapa Birimi amirlerime, araştırmacı ve teknisyen arkadaşlarım başta olmak üzere tüm alt yapı, araç ve gereçlerin sağlanmasında destek olan TÜBİTAK SAGE kurumuna teşekkür ederim. Ayrıca sabır, cesaret ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim Özlem BALKOCA ve kızım Elif Ece BALKOCA'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
2.1. Plaka Hızlandırma Testi Çalışmaları.....	17
2.2. Düzlemsel Dalga Merceği Test Çalışmaları	20
2.3. Silindir Genleşme Testi Çalışmaları	23
2.4. Hız Ölçüm Çalışmaları.....	28
2.5. Literatür Özeti ve Tez Konusuyla İlişkisi	33
3. DENEY DÜZENEKLERİ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ	35
3.1. Testlerde Kullanılacak Patlayıcı Özellikleri	36
3.2. Testlerde Kullanılacak Ateşleme Sistemi	38
3.3. Hız Ölçüm Teknikleri.....	38
3.3.1. İletken tel	39
3.3.2. Streak kamera	39
3.3.3. Interferometre	40

	Sayfa
3.4. Plaka Hızlandırma Test Düzeneği	40
3.4.1. Hız ölçüm sistemi	41
3.4.2. Veri toplama sistemi	42
3.4.3. Ana test modeli ve bileşenleri	44
3.5. Silindir Genleşme Test Düzeneği	61
3.5.1. Hız ölçüm sistemi	63
3.5.2. Veri toplama sistemi	63
3.5.3. Ana test modeli ve bileşenleri	64
4. DENEYSEL VERİLERLE JWŁ PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ İÇİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYON	69
4.1. JWŁ Hal Denklemleri	69
4.1.1. JWŁ parametrelerinin deneysel verilerle hesabı için çözüm yaklaşımı ...	71
4.2. Miller Modeli: Alüminyum Yanma Derecesi Modeli	84
4.2.1. Alüminyum yanma derecesi parametrelerinin deneysel verilerle hesabı için çözüm yaklaşımı	84
4.3. Deneysel JWŁ Parametrelerinin Hesabı için Matematiksel İşlem Sınırları	86
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	89
5.1. JWŁ Parametreleri Belirlenecek Olan Patlayıcılar ve Test Matrisi	91
5.2. Plaka Hızlandırma Testleri	92
5.2.1. Empedans eşleştirme yönteminin uygulanması	101
5.2.2. Alternatif ölçüm tekniği: PDV (Photon Doppler Velocimeter)	107
5.3. Silindir Genleşme Testleri: Nihai ve Başarılı Deneysel Çalışma Sonuçları	107
6. SAYISAL ÇALIŞMALAR	119
6.1. Termokimyasal Kod (EXTEC) ile JWŁ Hesaplamaları	121
6.2. Deneysel Veriler ile JWŁ Hesaplamaları	123

Sayfa

6.3. Termokimyasal Kod (EXTEC), Deneysel ve Literatürden Elde Edilen JWL Parametrelerinin Karşılaştırılması.....	130
7. DENEYSEL, LİTERATÜR VE EXTEC KODUNDAN ELDE EDİLEN JWL PARAMETRELERİNİN SAYISAL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	133
7.1. SPEED Hidrokodu	133
7.2. JWL Parametreleriyle SPEED Hidrokodunda Yapılan Analizler Sonucunda Elde Edilen Karşılaştırma Sonuçları	138
7.3. Zamana Bağlı JWL Denklemi için Miller Modeli Parametrelerinin Hesaplanması.....	142
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR	153
EKLER.....	159
EK- 1. JWL parametrelerinin hesaplama adımları	160
EK- 2. VISAR cihazı için veri analizi	164
ÖZGEÇMİŞ	166

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çelik gövde, plaka ve çevreye iletilen basınç analizleri için model boyutları.....	46
Çizelge 3.2. Ateşleme sistemindeki patlayıcı şekli analizleri için model boyutları	52
Çizelge 3.3. Dalga şekillendirici küre çapı analizi için model boyutları	56
Çizelge 3.4. Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılacak malzeme ve bileşenler..	60
Çizelge 3.5. Silindir genleşme test düzeneğinde kullanılacak malzeme ve bileşenler...	67
Çizelge 5.1. Patlayıcı üretiminde kullanılacak malzeme özellikleri	91
Çizelge 5.2. Silindir genleşme testi için iletken tel numaraları ve silindir duvarına göre konumları	108
Çizelge 5.3. Patlayıcı doldurulmuş test kalemi özellikleri.....	109
Çizelge 5.4. Detonasyon hızları.....	112
Çizelge 5.5. S110, S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcıları için silindir genleşme testlerinde alınan konumlarına göre zaman ölçüm sonuçları.....	117
Çizelge 6.1. EXTEC Termokimyasal kodu ile hesaplanan JWL parametreleri ve detonasyon özellikleri	122
Çizelge 6.2. JWL parametrelerinin deneysel olarak hesaplanması için EXTEC kodu ile hesaplanan bazı parametreler	122
Çizelge 6.3. Bakır silindirler için konum-zaman eğrilerinin katsayıları	125
Çizelge 6.4. Deneysel verilerle hesaplanan JWL değerleri.....	130
Çizelge 6.5. Deneysel, EXTEC ve literatür kullanılarak hesaplanan JWL parametreleri	131
Çizelge 7.1. S110 patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidrokod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları	139
Çizelge 7.2. S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidrokod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları	140
Çizelge 7.3. S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidrokod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları	141

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Hugoniot eğrisi ve reaksiyon fazları [4]	3
Şekil 1.2. Sönümlenmiş detonasyon dalgası [5]	6
Şekil 1.3. Sürekli hale gelmiş detonasyon dalgası [5]	6
Şekil 1.4. Detonasyon dalga görüntüsü [6]	7
Şekil 1.5. RDX'in kimyasal formülü [7]	8
Şekil 1.6. İdeal olmayan davranış gösteren patlayıcılarda detonasyon dalga şeması [6]	10
Şekil 1.7. Detonasyon ürünlerinin termodinamik değişim grafiği [4]	11
Şekil 1.8. Detonasyon sırasında a) açığa çıkan enerji b) kullanılabilir enerji [4].....	12
Şekil 1.9. Silindir testinin standart deney geometrisi	13
Şekil 1.10. a) Silindir genleşme test düzeneği [6], b) genleşen silindirin görüntüsü [9]	13
Şekil 1.11. Deney düzeneğinin kesit görüntüsü [10]	14
Şekil 2.1. Düzlemsel dalga elde etmek için kullanılan bazı dalga şekillendirici yemleme şarjı gösterimleri [22]	22
Şekil 3.1. JWL Denkleminin elde edilmesi için deney düzenekleri ve TD-JWL denklemlerinin elde edilme yönteminin şeması.....	35
Şekil 3.2. Plaka hızlandırma test düzeneği şeması	41
Şekil 3.3. Patlayıcı katı modeli	45
Şekil 3.4. Plaka kalınlığının belirlenmesi için plaka hızlandırma model ve plaka üzerindeki deformasyonların takip edildiği duyargaların görünümü.....	47
Şekil 3.5. 2-boyutlu plaka hızlandırma analizi sonucunda plaka üzerine yerleştirilen duyargalardan alınan hız-zaman değişim grafikleri a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3.....	48
Şekil 3.6. Bakır plaka katı modeli.....	49
Şekil 3.7. Namlu katı modeli	50
Şekil 3.8. Ateşleme sistemi analizlerinde kullanılan modelin genel görüntüsü	53

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. Silindirik ateşleme sistemi 2-boyutlu model görüntüsü a) Model-4, b) Model-5, c) Model-6, d) Model-7	53
Şekil 3.10. Silindirik ateşleme sisteminin çözümlemesi sonucunda yanma oranı ve basınç dağılım görüntüsü a) Model-4, b) Model-5, c) Model-6, d) Model-7	54
Şekil 3.11. Konik ateşleme sistemi 2-boyutlu model görüntüsü a) Model-8, b) Model-9, c) Model-10, d) Model-11	55
Şekil 3.12. Koni şekilli ateşleme sistemi çözümleme sonucu plaka görüntüsü a) Model-8, b) Model-9, c) Model-10, d) Model-11.....	55
Şekil 3.13. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı model görüntüsü a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14.....	57
Şekil 3.14. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı model görüntüsü oranı ve basınç dağılımı görüntüsü a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14.....	57
Şekil 3.15. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı analiz sonucunda plaka üzerindeki duyargalara ait hız-zaman grafikleri a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14.....	58
Şekil 3.16. Yemleme şarjı katı model görüntüsü a) yemleme şarjı b) dalga şekillendirici c) yemleme şarjı kılıfı.....	59
Şekil 3.17. Ana test kalemi katı model görüntüsü	60
Şekil 3.18. Ana test kalemi katı model kesit görüntüsü.....	61
Şekil 3.19. Silindir genişleme test düzeneği şeması	62
Şekil 3.20. Silindir genişleme testlerinde kullanılan OFHC bakır silindirin katı modeli	65
Şekil 3.21. Bakır silindir ve iletken tel tutucu modeli	66
Şekil 4.1. Silindir dış çapının zamana bağlı değişimi [22]	73
Şekil 4.2. Silindir duvar eğim açısı [22]	74
Şekil 4.3. Detonasyon sonrası plakaya etkileyen basınç ve plakanın hareketi	83
Şekil 4.4. JWL parametreleri hesaplama adımları [22]	86
Şekil 5.1. Test 4 için r katsayısının zamana bağlı değişimi a) test6, b) test8, c) test9....	99

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Mevcut sistemin SPEED yazılımındaki analizi sonucu plaka serbest yüzeyi üzerindeki sıcaklık grafiği	102
Şekil 5.3. Empedans eşleştirme çalışmasında SPEED analiz modeli	104
Şekil 5.4. Empedans eşleştirme çalışmasında SPEED analizi sonucunda plakanın serbest yüzey zamana bağlı sıcaklık grafiği.....	105
Şekil 5.5. S110 patlayıcısının silindir genleşme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri a) test1 b) test2 c) test3	114
Şekil 5.6. S109 (Al) patlayıcısının silindir genleşme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri a) test1 b) test2 c) test3	115
Şekil 5.7. S109 (LiF) patlayıcısının silindir genleşme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri a) test1 b) test2 c) test3	116
Şekil 6.1. JWL parametrelerinin karşılaştırılması ve TD-JWL parametrelerinin elde edilmesi için izlenen yöntem	120
Şekil 6.2. Silindir genleşme testlerinde sinyal alınan bakır tellerin zamana bağlı konum değişimleri a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF)	124
Şekil 6.3. Silindir enleşme testleri sonucunda matematiksel model ile hesaplanan silindir duvar hızlarının ve ivmelerinin eğrileri değişimi: a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF).....	126
Şekil 6.4. Silindir duvarının kinetik enerjisi ve patlayıcı kimyasal enerjilerinin özgül hacim ile değişimi a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF).....	128
Şekil 7.1. SPEED Hidrokod modeli.....	134
Şekil 7.2. SPEED Hidrokod modelinin çözümleme alanı	135
Şekil 7.3. SPEED Hidrokod modelinin ağ görüntüsü.....	136
Şekil 7.4. S110 patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genleşme çözümleri sonucunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi.....	138
Şekil 7.5. S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genleşme çözümleri sonucunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi.....	139
Şekil 7.6. S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genleşme çözümleri sonucunda SPEED hidrokodunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi.....	141
Şekil 7.7. S109 (Al) S109 (LiF) patlayıcılarının zamana bağlı alüminyum yanma hız modeli ile SPEED hidrokodunda elde edilen silindir duvarının hız eğrileri	143

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Harp başlığının etkinlik gösterimi [1]	1
Resim 1.2. Patlayıcının infilak fazları [4]	5
Resim 3.1. VISAR ve optik sistem malzemeleri [48].....	42
Resim 3.2. Test çalışmalarında kullanılan osiloskopun görüntüsü.....	43
Resim 3.3. Lissajous şekli [48]	44
Resim 3.4. İzoleli iletken tel ve klemens	63
Resim 5.1. Plaka hızlandırma testi öncesinde üretilen OFHC bakır plakanın a) boyut ölçümleri b) kütle ölçümleri.....	92
Resim 5.2. Plaka hızlandırma testi öncesinde patlayıcının a) boyut ölçümleri b) kütle ölçümleri.....	93
Resim 5.3. Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılan namlu.....	94
Resim 5.4. Düzlemsel dalga merceğine ait yemleme şarjı kılıfı ve dalga şekillendirici	94
Resim 5.5. VISAR cihazına ait optik lens ve optik lensin koruma kutusu	95
Resim 5.6. 10 mm kalınlığında koruyucu plaka	96
Resim 5.7. Lazer ışınının yansıması sonucu osiloskopta okunan a) sinüs ve kosinüs dalgaları b) Lissajous şekli.....	96
Resim 5.8. Plaka hızlandırma test düzeneği a) düzeneğin ilk durumu, b) düzeneğin son durumu.....	97
Resim 5.9. 5. Plaka hızlandırma testi sonrası bulunan plaka üzerindeki erime görüntüsü	103
Resim 5.10. Empedans çalışmasında SPEED yazılımı ile boyutlandırılan PMMA malzemeden üretilen plakalar	105
Resim 5.11. Empedans eşleştirme yöntemi sonucunda oluşturulan yeni plaka hızlandırma test düzeneği	106
Resim 5.12. Bakır silindir ve iletken tel tutucu.....	108
Resim 5.13. Alüminyum katkılı patlayıcı ile doldurulmuş bakırın x-ray görüntüsü.....	110
Resim 5.14. Silindir genleşme test düzeneğinin genel görüntüsü	110

Resim	Sayfa
Resim 5.15. Silindir genleşme test düzeneğinin yan açıdan görüntüsü	111
Resim 5.16. Silindir genleşme test düzeneğinin arka açıdan görüntüsü	112
Resim 7.1. SPEED hidrokodu içerisinde patlayıcının Miller modeli parametrelerinin girildiği pencere	137
Resim 7.2. SPEED hidrokodu içerisinde patlayıcının JWL parametrelerinin girildiği pencere	137
Resim 7.3. SPEED hidrokodunun S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleri için girdi penceresi	142

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	JWL 1. Terim parametresi (GPa)
As	Plaka yüzey alanı
a	Miller modeli reaksiyon hız sabiti
a1	Eğri fonksiyonunun 1. sabiti
a2	Eğri fonksiyonunun 3. sabiti
B	JWL 2. Terim parametresi (GPa)
b	Miller modeli
b1	Eğri fonksiyonunun 2. sabiti
b2	Eğri fonksiyonunun 4. sabiti
bhe	V_{CJ} dönüşüm oranı
C	JWL 3. Terim parametresi
Ce	Patlayıcı kütlesi (kg/m)
d	Silindir çapı (mm)
D1	1. Faz sinyal fonksiyonu
D2	2. Faz sinyal fonksiyonu
Ec	Sıkıştırma enerjisi (GPa)
Ed	Detonasyon/Genleşme enerjisi (GPa)
EG	Gurney enerjisi (GPa)
Ek	Kinetik enerji (J)
Es	İç enerji (GPa)
E₀	Kimyasal enerji (GPa)
Kf	Saçak katsayısı (km/s/fr)
L	Silindir boyu (mm)
h	Plaka hızlandırma test verimi (%)
M	Parçacık kütlesi (kg/m)
m	Miller modeli enerji çıkış kuvveti
mp	Plaka kütlesi (g)

Simgeler	Açıklamalar
n	Miller modeli basınç kuvveti
P	Basınç (GPa)
P_{CJ}	Chapman-Jouget basıncı (GPa)
P_u	Miller Modeli referans basıncı (0,1Pa)
Q	Enerji (GPa)
Q_{Al}	Alüminyum enerjisi (MJ/kg)
Q_{exp}	Patlayıcının patlama ısısı (J)
R	Gaz sabiti (J/mol.K)
R1	JWL 1. Terimin eigenvalue değeri
R2	JWL 2. Terimin eigenvalue değeri
r1	Silindirin iç duvarının yarıçap değeri (mm)
r2	Silindirin dış duvarının yarıçap değeri (mm)
r10	Silindirin iç duvarının ilk yarıçapı değeri (mm)
r20	Silindirin dış duvarının ilk yarıçap değeri (mm)
rm	Silindirin duvarının ortalama yarıçap değeri (mm)
rm0	Silindirin duvarının ilk ortalama yarıçap değeri (mm)
R²	Eğri eşleşme oranı
r	VISAR hız ölçüm sınır katsayısı
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman (s)
u_{Al}	Alüminyum katkılı patlayıcı kullanılan plaka hızı (m/s)
u_{LiF}	LiF katkılı patlayıcı kullanılan plaka hızı (m/s)
V_{CJ}	CJ noktasındaki özgül hacim
V_D	Detonasyon hızı (m/s)
V_r	Silindir duvarının radyal yöndeki hızı (m/s)
V_w	Silindir duvarının bileşik hızı (m/s)
V_G	Gurney hızı (m/s)
v	Detonasyon gazlarının hacmi (mm ³)
v0	Patlayıcının ilk hacmi (mm ³)
x	Konum (mm)
α	Detonasyon hızı hata oranı
β	CJ Basıncı hata oranı

Simgeler**Açıklamalar**

δ	Detonasyon enerjisinin ortalama hata oranı
η	Plaka hızlandırma testinin verimi (%)
ω	JWL adyabatik genleşme kuvveti
λ	Alüminyum yanma oranı (%)
θ	Açı (°)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_m	Parçacık yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_e	Patlayıcı yoğunluğu (kg/m ³)
τ	Zaman (s)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ANFO	Amonyum Nitrat-Fuel Oil
BKW	Baker-Kristiakowsky-Wilson
CJ	Chapman-Jouget
EOD	Explosive Ordnance Disposal
EXTEC	Explosive Thermo-Chemical Equilibrium Code
HMX	High Melting Explosive
JCZ	Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler
JWL	Jones-Wilkins-Lee
LJD	Lennard-Jones-Devonshire
LLNL	Lawrance Livermore National Laboratory
LiF	Lityum Florür
PBXN	Plastic Bonded Explosive
RDX	Research Department Explosive
SPEED	Shock Physics Eulerian-Langranian Explicit Dynamics
OFHC	Oxygen-Free High Conductivity
VISAR	Velocity Interferometer System for Any Reflector
ZND	Zeldovich, vonNeumann, Doering

1. GİRİŞ

Gelişen savunma sanayii teknolojileriyle birlikte hava, kara ve deniz alanlarındaki hedeflere karşı mühimmat geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Bu durum, su altı, kapalı alan ve hava silah sistemlerinde yaygın olarak kullanılan mühimmatların etkinliklerini artırma gereksinimi ortaya koymaktadır. Farklılık gösteren hedeflere karşı tahrip kabiliyetini arttırma kapsamındaki çalışmalar hedef balistiği bilimi altında incelenmektedir. Harp başlığının bazı hedeflere karşı etkinlik gösterimleri aşağıda Resim 1.1 ile verilmiştir.



Resim 1.1. Harp başlığının etkinlik gösterimi [1]

Araştırmanın amacı ve hedefleri

Harp başlıklarının tasarımı, amacına, şekline ve içeriğine göre karakteristik özellik gösterir. Bu nedenle tasarım sırasında etkinlik, güvenilirlik ve güvenlik açısından birçok geliştirme ve doğrulama testleri yapılmaktadır. Geliştirme sırasında çok sayıda deneme yapılması gerektiğinden maliyetler oldukça yükselir. Ayrıca harp başlıklarının büyük oranda yurt dışı kaynaklı malzemeler içermesi nedeniyle dışa bağımlılığı da arttırmaktadır. Çalışma, harp başlıklarının geliştirme analizlerini bilgisayar paket programlarında yaparak mümkün olduğunca az test ve malzeme sarfiyatı yapmaya imkân sağlayacaktır. Böylece maliyetleri düşürerek olabildiğince az malzemeye ihtiyaç duyulması ve dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir.

Harp başlığının etkinliğini etkileyen parametrelerden biri de kullanılan patlayıcıların karakteristik özellikleridir. Bunların başında patlayıcının detonasyon sonrası davranışını belirleyen hal denklemi gelir. Hal denklemi mevcut veya yeni bir patlayıcının performansını tahmin edebilmek için tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, yüksek enerjik malzemelerin

detonasyon esnasında kimyasal reaksiyonları ve termodinamik değişimleri çok karmaşık olduğundan teorik modellerle nitelikli olarak ifade edebilmek oldukça zordur. The Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) yüksek enerjik malzemeleri (İng. high energetic materials) detonasyon parametrelerini hesaplamak için EXPLO5 ve bu parametreleri analiz modellerini yapmak için Ansys Autodyn, LS Dyna gibi yazılım programlarında kullanmaktadır [2]. TÜBİTAK SAGE bu programların yanı sıra SPEED ve EXTEC programlarını da kullanmaktadır. Bu yazılım paketlerinin çözücülerini patlayıcı performansını hal denklemleriyle ifade etmektedir. Hal denklemlerinin parametre girdileri Euler veya Langrange hücre yapısında sonlu hacim yöntemleriyle çözüm yapan hidrokodlarda çözümlenir. Hal denklemleri birkaç farklı modelle ifade edilebilmektedir. Bunların en yaygın olanları politropik gaz denklemi, Lennard-Jones-Devonshire (LJD), Baker-Kristiakowsky-Wilson (BKW), Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler (JCZ) ve Jones-Wilkins-Lee (JWL) denklemleridir. JWL denklemi hidrodinamik hesaplamalar arasında basitliği, görece hassas sonuç vermesi ve pek çok yüksek enerjik malzemede veri elde etmesi kolay olduğu için yaygın olarak tercih edilmektedir [3]. Patlayıcılar içerisinde yüksek enerjik malzemeler ve reaktif katkıları bulunmaktadır. Yüksek enerjik malzemeler ideal davranış gösterirken reaktif katkıları reaksiyon mekanizmasını değiştirdiği için ideal olmayan davranış gösterir. Bu tez kapsamında alüminyum katkılı, genleşme sırasında ideal olmayan davranış gösteren patlayıcıların JWL durum denkleminin belirlenmesi hedeflenmektedir.

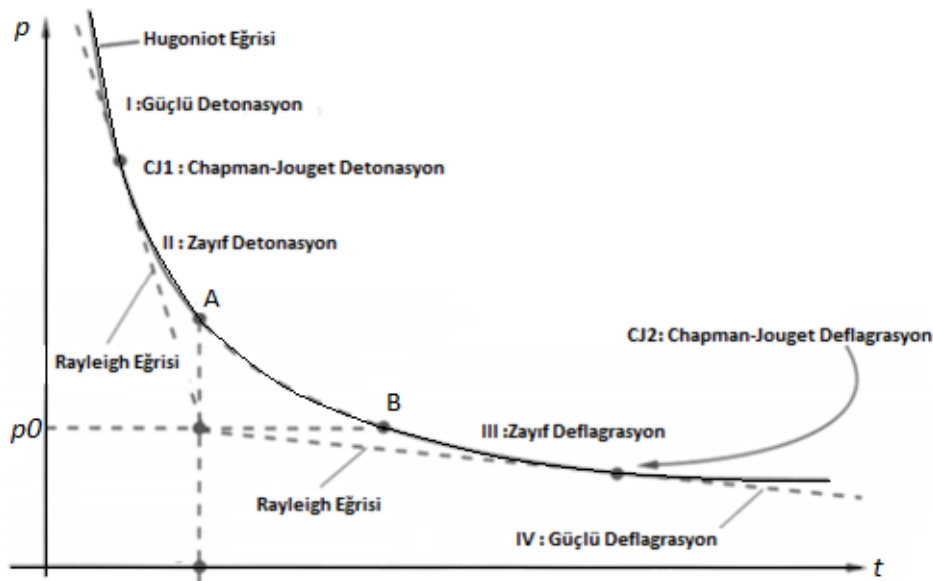
Patlayıcı reaksiyon fazları

Patlayıcı reaksiyon fazları yanma dalgasının yayılım hızına bağlı olarak değişmektedir. Patlayıcı reaksiyon fazları 3 grupta ifade edilebilir:

1. Patlama: Isı çıkış hızı yüksektir. Ancak, patlayıcı üzerinden yanma dalgası geçişini gerektirmez.
2. Deflagrasyon: Yanma dalgası ses hızının altında (İng. sub-sonic) bir hızda ilerler. Alev yayılım hızı 100 m/s'den daha düşük olur. Harp başlığı içindeki patlayıcıda meydana gelen deflagrasyon sırasında hava üzerinde yüksek hızda itki olurken yanma hızı görece düşük olduğu için gövdede parçacıklanma olmaz.

3. Detonasyon : Yüksek enerjili patlayıcıda kimyasal reaksiyonun ses hızının üzerinde (İng. supersonic) bir hızda yayılması ile oluşan yüksek basınçlı şok dalgasıdır. Harp başlığı içindeki patlayıcıda meydana gelen detonasyon sırasında gövde parçacıkları. Süpersonik hızda alev ve yüksek basınçlı şok dalgasının görüldüğü reaksiyondur. Patlayıcı üzerinde ilerleyen detonasyon bölgesinin şartları teorik olarak Chapman-Jouget (CJ) teorisi ile açıklanmaktadır.

Reaktif malzeme şok basıncı ile sıkıştırılarak partiküller arası mikrojet oluşumunu sağlar. Mikrojetler yüksek basınç altında sıcaklığı yükselerek aktifleşme enerjisine ulaşır ve reaksiyona girerler. Detonasyon reaksiyonu sonucunda oluşan gaz ürünlerin durumu kütle, momentum ve enerji denklileri birlikte çözülmesi sonucu elde edilen Rayleigh eğrisi ve Hugoniot eğrisi ile ifade edilir. Rayleigh eğrisi, basınç etkisiyle değişmeyen ses hızı ile ifade edilen lineer bir eğridir. Hugoniot eğrisi ise basıncın ses hızı ile değiştiği momentum denkleminde meydana gelmektedir. Şok sıkışması, reaktif patlayıcı içinde Rayleigh eğrisi ve Hugoniot eğrisi ile kesiştiği nokta olan von Neumann durumuyla ifade edilir. Kimyasal reaksiyon Rayleigh eğrisi boyunca sonik duruma kadar genişler. CJ noktası ve sonik nokta bir boyutlu akış için aynı durumu ifade eder. Daha sonra akış yeni bir şok oluşmadan genişlemeye devam eder. Reaksiyon fazları, Hugoniot eğrisi ve Rayleigh eğrileri üzerinde Şekil 1.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Hugoniot eğrisi ve reaksiyon fazları [4]

I Bölgesi: Bu güçlü detonasyon bölgesidir. Bu bölgede oluşan yanma gazı basıncı, CJ şartlarındaki detonasyon basıncından daha büyüktür. Güçlü-detonasyon bölgesi geçilirken detonasyon dalgası sonrası oluşan yanma gazının hızı süpersonik hızdan subsonik hıza düşer. Güçlü detonasyon özel deneysel düzenek ile yapılabilmektedir.

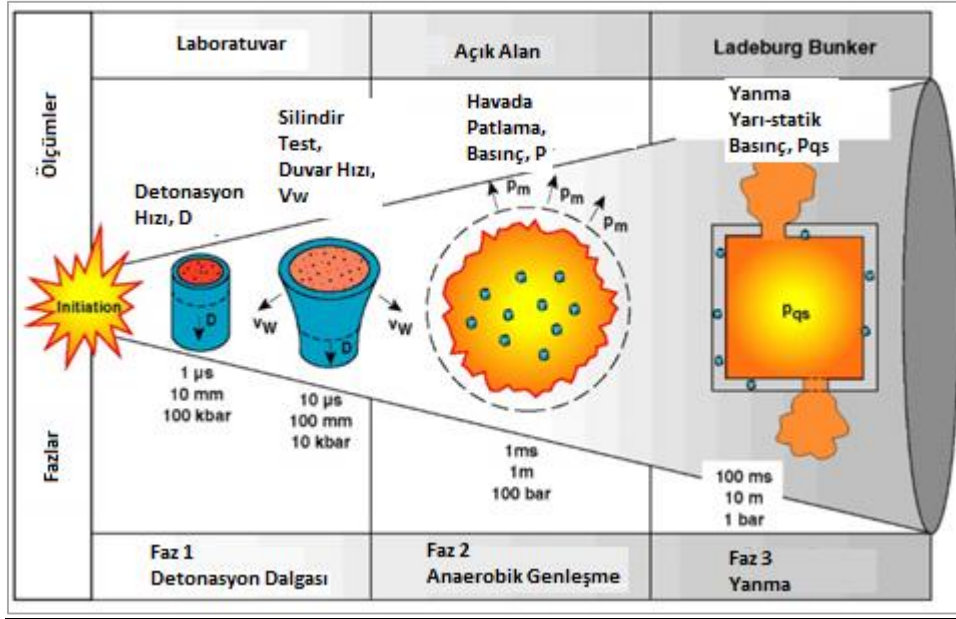
II Bölgesi: Zayıf detonasyon bölgesidir. Yanma gazı basıncı, CJ şartlarında oluşan basınçtan daha düşüktür. Bu bölge geçilirken gaz hızı yavaşlar ancak hala ses hızından daha yüksektir. Zayıf detonasyon nadiren gerçekleşebilen bir durumdur. Meydana gelebilmesi için kimyasal kinetiği daha hızlı olan gaz karışımları kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu bölgelerin teorileri yukarıdaki genel detonasyon yapısından türetilmiştir. Birçok deneysel şart yukarıda U noktası ile verilen CJ dalgasında oluşan durum temel alınarak yapılmıştır. U noktasına üst CJ şartı denir. P_1 ve $1/\rho_1$ den çizilen Rayleigh eğrisinden daha düşük eğime sahip bir eğri çizildiğinde herhangi bir noktada kesişim olmayacağından detonasyon görülmecektir. CJ2 noktası tüm deflagrasyonların en yüksek hıza sahip olanını ifade eder. Eğer A noktasından çizilen eğrinin eğimi Şekil 1.1 ile verilenden daha yüksek olursa eğriyi iki bölgeye ayırır ve bu durum fiziksel olarak mümkün olmaz. Eğer eğri eğimi daha düşük olursa III ve IV bölgesi ortaya çıkar.

III Bölgesi: Zayıf deflagrasyon bölgesidir. Yanma gazı hızı, subsonik hızdan daha yüksek bir subsonik hız bölgesine geçer. Bu bölgedeki deflagrasyon çoğu zaman deneysel çalışmalarda görülmektedir. Yanmış gaz basıncı, yanmamış gaz basıncından biraz daha düşüktür.

IV Bölgesi: Güçlü deflagrasyon bölgesidir. Deflagrasyon bölgesi geçilirken gaz hızı subsonik hızdan süpersonik hıza geçiş yapar. Dalga yapısı gereği sabit alanlı bir gövde içinde subsonikten süpersonik hıza geçiş olamaz. Ancak güçlü deflagrasyon, deneysel olarak asla görülememektedir.

İnfilak fazları

İnfilak kelime anlamı itibarıyla çok güçlü bir patlamayı ifade eder. Patlama sırasında geçirdiği fazların olduğu mesafe, zaman, basınç değerleriyle ilişkilidir. Bir patlayıcının infilakı sırasında geçtiği aşamalar aşağıda Resim 1.2 ile gösterilmiştir.

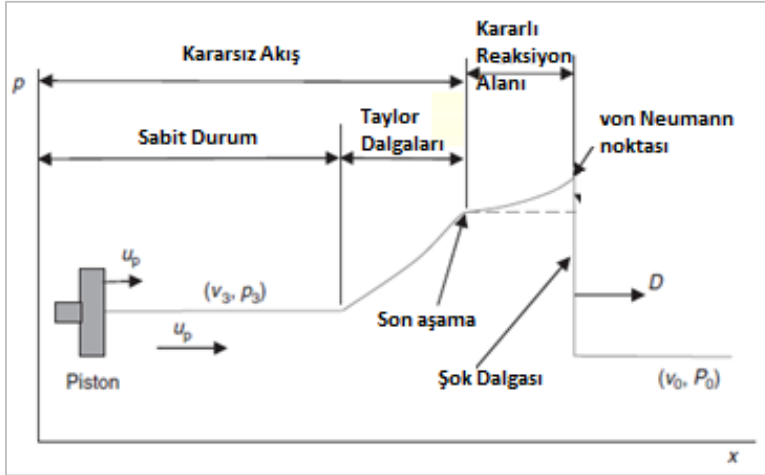


Resim 1.2. Patlayıcının infilak fazları [4]

İnfilak durumu içerdiği reaksiyonlar ve zaman ölçeğinde 3 farklı fazla açıklanmaktadır. Bunlar sırasıyla detonasyon, oksijensiz (İng. anaerobik) genleşme ve yanma fazlarıdır. Yüksek sıcaklık veya yüksek şok basıncı ile mikrosaniye mertebelerinde detonasyon reaksiyonu oluşur. Reaksiyon sırasında yüksek basınç ve yüksek sıcaklık açığa çıkar. Bu aşamada reaksiyon ürünü ve reaksiyona giren malzemenin termokimyasal olarak dengede olduğu kabul edilir. Oluşan detonasyon ürünleri bu sıcaklığın etkisiyle ortamda reaktif malzeme varsa onlarla reaksiyona girerek oksijensiz ortamda adyabatik genleşme yapar. Bu faz, 100 μs mertebelerinde oluşur, reaksiyon bölgesi ise santimetre kalınlıklarındadır. Daha geniş bir alana yayılır ve reaksiyon ortamdaki havanın oksijeniyle devam edebilir.

Detonasyon fiziği

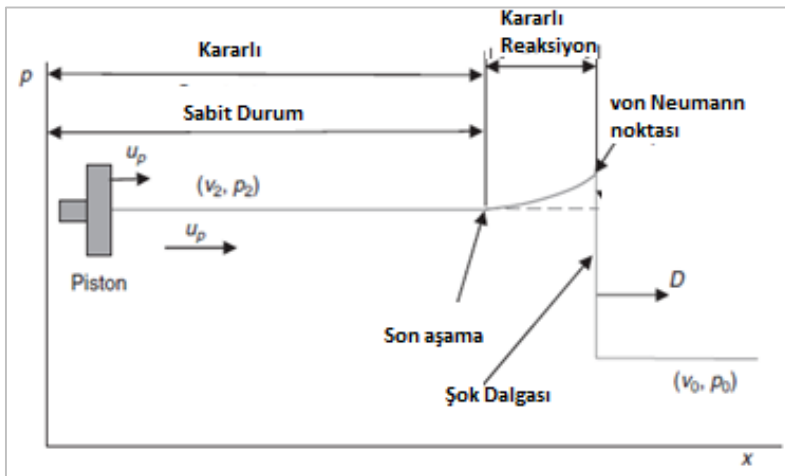
Detonasyon teorisi ilk olarak 1950 yıllarında Zeldovich, von Neumann, Doering (ZND) tarafından ortaya atılmıştır [5]. Bu teoriye göre, bir patlayıcı üzerinde güçlü bir şok dalgası patlayıcının gözeneklerindeki havayı sıkıştırarak yüksek basınç ve sıcaklık oluşturur. Oluşan basınç ve sıcaklık yeni patlayıcı moleküllerinin reaksiyona girmesini sağlar. Yeni moleküllerin reaksiyonu sonucu oluşan basınç ve sıcaklık sonrakini tetikleyerek sürekli bir enerji dalgası oluşturur. Bu reaksiyon zinciri o kadar kısa zamanda gerçekleşir ki malzemenin gelebileceği en yüksek değere ani bir şekilde ulaşmasına neden olur. Patlayıcı içerisinde detonasyonun oluşmadan sönümlenme durumu Şekil 1.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Sönümlenmiş detonasyon dalgası [5]

Şekilde görüldüğü üzere patlayıcı üzerinde reaksiyon zincirini başlatan temsili bir piston bulunmaktadır. Piston, patlayıcının katı elastik dayanımının üzerinde sıkışmasını sağlayarak ses hızının altında basınç dalgaları oluşturur. Bu dalgalara Taylor dalgaları denir. Piston basıncı katı patlayıcı üzerinde süreksiz reaksiyonlar oluşturur. Reaksiyon sonucunda oluşan gazlar ses hızının altındaki Taylor dalgaları şeklinde yayıldığında şok dalgası sürekliliğini kaybeder.

Eğer piston yeterince yüksek basınçta patlayıcıya nüfuz ederse sürekli hale gelen detonasyon dalgası elde edilir. Şok dalgasının enerjisiyle oluşan hız o kadar fazladır ki Taylor dalgalarının oluşmasını engeller. Sürekli hale gelmiş detonasyon dalgasının oluşma durumu aşağıda Şekil 1.3 ile gösterilmiştir.

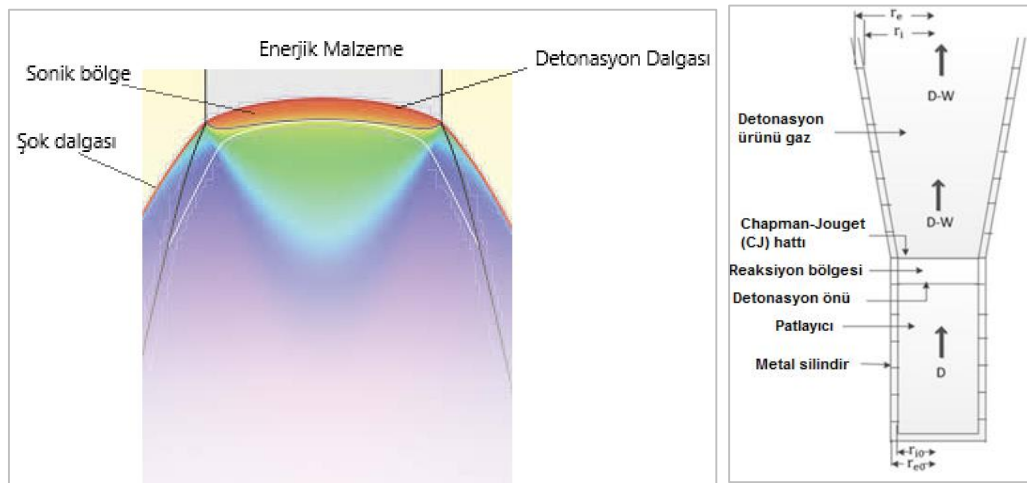


Şekil 1.3. Sürekli hale gelmiş detonasyon dalgası [5]

Patlayıcının detonasyon basıncına yakın basınçta iletilen şok dalgası ile birlikte patlayıcı üzerinde kimyasal reaksiyon meydana gelir. Pistonun ilettiği şok basıncının sürekliliğini devam ettirmesi halinde pistonun enerjisi ile patlayıcının reaksiyon enerjisi birleşerek daha yüksek enerji oluşturur. Bu enerji, katı patlayıcının reaksiyona girmesini devam ettirerek reaksiyonun sürekli hale geldiği noktaya ulaştırır. Bu nokta Şekil 1.3 üzerinde “Son aşama” olarak gösterilmiştir. Bu nokta patlayıcı detonasyonunun sürekli hale geldiği en düşük enerji noktası olarak Chapman-Jouget (CJ) teorisiyle açıklanmaktadır. Bu noktadan itibaren patlayıcı reaksiyonları kararlı hale gelir. Devam eden piston basıncı ve kararlı hale gelen patlayıcı reaksiyonlarının etkisi ile birlikte patlayıcı içerisinde fiziksel olarak en yüksek teorik basınç noktasına ulaşıldığı varsayılır. Bu noktaya von Neumann noktası denir. Böylece akışın en önünde sürdürülebilir bir şok dalgası meydana gelir.

Chapman-Jouget (CJ) teorisi

Detonasyonun hemen sonrasında ürün gazları, katı faz yoğunluğunun yaklaşık olarak 1,5-2,5 katına sıkıştırılabilir. Bu gaz yoğunlukları tutuşmadan detonasyona kadar hızlı bir değişim gösterir. Patlayıcı üzerinde ilerleyen reaksiyon zincirinin olduğu bölgenin kalınlığı sıfır olacak şekilde bir çizgi olarak kabul edilir. Bu çizgi, reaksiyona girmeyen bölgeden reaksiyona girmiş bölgeye ani bir geçişin olduğunu ifade eder. Bu noktadan itibaren kimyasal reaksiyon başlar ve reaksiyon bölgesi başlangıcı CJ noktası olarak adlandırılır. Detonasyon dalgasının enerjik malzeme üzerinde ilerleme görüntüsü Şekil 1.4 ile gösterilmiştir.



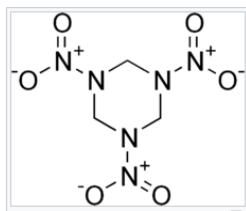
Şekil 1.4. Detonasyon dalga görüntüsü [6]

Partikül hızı ve ses hızı toplamı detonasyon hızına eşittir ve kimyasal reaksiyonun bu eğri boyunca gerçekleştiği varsayılır. Katı patlayıcının şok özellikleri ile ilgisi yoktur. Şok dalgası, detonasyon dalgasıyla birlikte ilerlediği için detonasyon hızı (minimum şok hızı) tek sınır şartı olarak kabul edilir. Reaksiyon bölgesindeki detonasyon ürünleri termodinamik dengede olduğu kabul edilir. CJ noktası sonrası detonasyon ürün gazları Taylor dalgaları şeklinde yavaşça genişir [5]. CJ noktası aynı zamanda detonasyon ürünü gazların genişemesinin başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir. CJ noktasından itibaren oluşan yüksek basınçlı gazın genişeme karakteristiği tüm hedef balistiği uygulamalarına girdi sağlamaktadır.

İdeal davranış gösteren patlayıcılar

Patlayıcılar temelde yüksek enerjik malzemelerden oluşmaktadır. Çarpma, sıcaklık vb. etkilere karşı hızlı reaksiyon göstermemesi ve duyarsız olması için polimer bazlı bağlayıcı fazla birlikte üretilmektedir. Patlayıcı içerisinde yüksek enerjik malzeme miktarı ne kadar fazla ise detonasyon reaksiyonu o kadar kararlı olur. Detonasyon reaksiyonu sonucunda oluşan ürün gazları kararlı bir genişeme hali oluştururlar ve bu durumu gösteren patlayıcılara ideal davranış gösteren patlayıcılar denir.

Yüksek enerjik malzemelerin başında askeri amaçlarla yaygın olarak kullanılan HMX, RDX ve TNT gibi patlayıcılar gelmektedir. HMX, $C_4H_8N_8O_8$ ve RDX, $C_3H_6N_6O_6$ bileşik formülüne sahiptir. Bu tip yüksek enerjik malzemeler detonasyon sırasında kendi içerisinde mevcut bulunan oksijeni kullanır. Bu yönüyle anaerobik bir reaksiyondur ve birincil reaksiyon olarak adlandırılır. Birçok patlayıcı içerisinde kullanılan RDX'in gerçek adı siklotrimetilen-trinitramin olup saf halde 204 °C'de eriyebilmektedir. Malzemenin yoğunluğu 1,816 g/cm³'tür [7]. RDX'in kimyasal formülü aşağıda Şekil 1.5 ile gösterilmiştir.



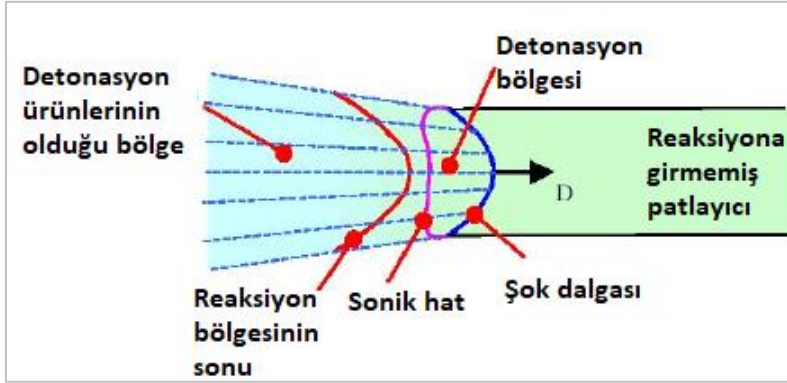
Şekil 1.5. RDX'in kimyasal formülü [7]

RDX bazlı patlayıcının daha yüksek yoğunluklarda döküm ve presleme yöntemiyle üretimi gerçekleştirilebilir. Ancak RDX'in hassasiyeti yüksek olduğundan polimer yapıdaki bağlayıcı faz patlayıcıyı duyarsız hale getirerek çarpma ve yüksek ısıya karşı daha güvenli olmasını sağlar. RDX gibi yüksek enerjik malzemelerin reaksiyon hızları ve şok basınçları çok yüksektir. Patlayıcı üretimlerinde farklı reaktif katkıların kullanılması ile etkinliği değiştirilebilir. RDX'e daha düşük reaktif olan bir katkı yapıldığında moleküller arası mesafe arttığından reaksiyon hızı ve şok basıncı düşebilmektedir [7].

İdeal olmayan davranış gösteren patlayıcılar

Patlayıcılar, üretim amaçlarına ve etkinliklerine göre çeşitli reaktif katkı malzemeleriyle desteklenirler. Reaktif katkılar detonsiyon reaksiyonu ürünlerle reaksiyona girerek reaksiyon mekanizmasını değiştirir. Yüksek enerjik malzemelerin detonsiyonu sırasında oluşan kimyasal reaksiyon zamanı mikrosaniye mertebesinde. Bu süre içerisinde reaksiyon sonucu yüksek enerji açığa çıkarak yüksek basınç oluşturur. Bu süre zarfında aktifleşen reaktif katkı malzemesinin partikülleri detonsiyon ürünleriyle reaksiyona girerek ikinci reaksiyonları veya diğer adıyla yanma sonrası reaksiyonları oluşturur. İkinci reaksiyonlar, detonsiyonun enerjisini başlangıçta azaltır, sonrasında ikinci reaksiyonun etkisiyle toplam reaksiyon enerjisini arttırarak daha yüksek seviyeye çıkmasını sağlar.

Patlayıcıların enerji yoğunluğunu ve enerji çıkış süresini arttırarak yüksek basınç etkisini daha uzun sürede göstermesini sağlamak için alüminyum gibi reaktif katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Alüminyum, yüksek reaktif özelliği ve reaksiyonu sonucunda yüksek miktarda molekül oluşturması sayesinde aynı miktardaki yüksek enerjik malzemeye göre daha fazla gaz çıkışı sağlayabilir. Alüminyumun reaksiyon aktivasyonunu kazanması için öncelikle gaz fazına geçmesi gerekmektedir. Katı alüminyum tanelerinin önce erimesi ve daha sonra gaz haline geçmesi sırasında gereken enerji için detonsiyon enerjisinden sağlanır. Gaz fazındaki alüminyumun, yüksek enerjik malzemenin detonsiyonu sonrasında detonsiyon ürünleriyle reaksiyona girmesinden dolayı bu reaksiyonlar ikinci yanma (İng. afterburn/secondary) reaksiyonu olarak adlandırılır. İkinci yanma sırasında atmosferde bulunan oksijeni kullanılmadığı için oksijensiz (İng. anaerobik) tiptedir. İdeal olmayan davranış gösteren patlayıcıların detonsiyon dalga ilerleyişi aşağıda Şekil 1.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.6. İdeal olmayan davranış gösteren patlayıcılarda detonasyon dalga şeması [6]

İdeal olmayan patlayıcıların detonasyonunda şok önü daima eğriseldir. Şok dalgasının arkasında kalan bölgede reaksiyonlar meydana gelmektedir. Reaksiyon ürünlerinin akışı kararlı değildir ve tüm reaksiyonlar detonasyon bölgesinde tamamlanmaz. Detonasyonu ilerleten bölge sonik hat ile biter ve sonik hattın ilerisinde süpersonik akış bulunur. Detonasyon şok dalgası ile ses hızında ilerlerken şok dalgasının gerisinde Taylor dalgaları oluşur, bu dalgalar hala süpersoniktir ve reaktiftir. Alüminyum gibi katkı maddelerinin yandığı ikinci reaksiyonlar bu bölgede gerçekleşir [6]. Yüksek enerjik malzemelerin alüminyum ve detonasyon ürünleriyle girdiği kimyasal reaksiyon denklemleri aşağıda verilmiştir [8].

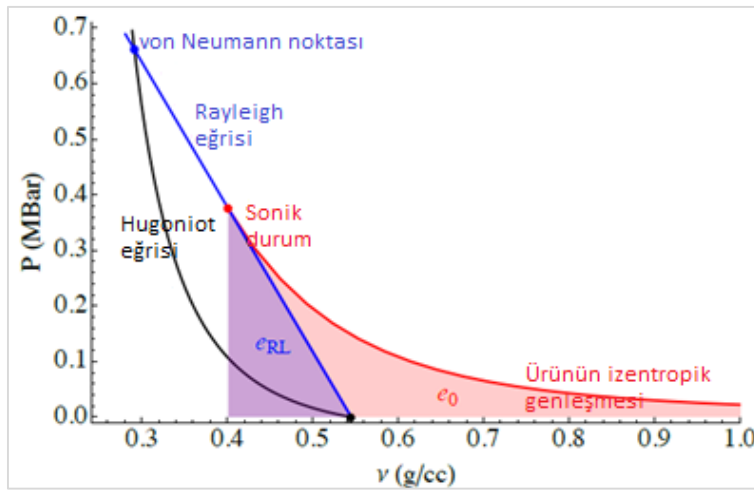


Yukarıdaki reaksiyon basamaklarına göre alüminyum CO ve CO₂ gibi detonasyon ürünlerini katı karbona dönüştürmektedir. Bu nedenle RDX gibi yüksek enerjik malzemelerin detonasyon enerjisini önce düşürür ve çevreye iş yapma kapasitesini azaltır, daha sonraki reaksiyonların enerjisi ile yüksek ısı açığa çıkmasını sağlar. Bu yönüyle alüminyum katkılı patlayıcılar ideal detonasyon reaksiyonu ve ideal genişleme modelinden uzaklaşmaktadır.

Patlayıcı genişleme enerjisi ve iş yapma kapasitesi

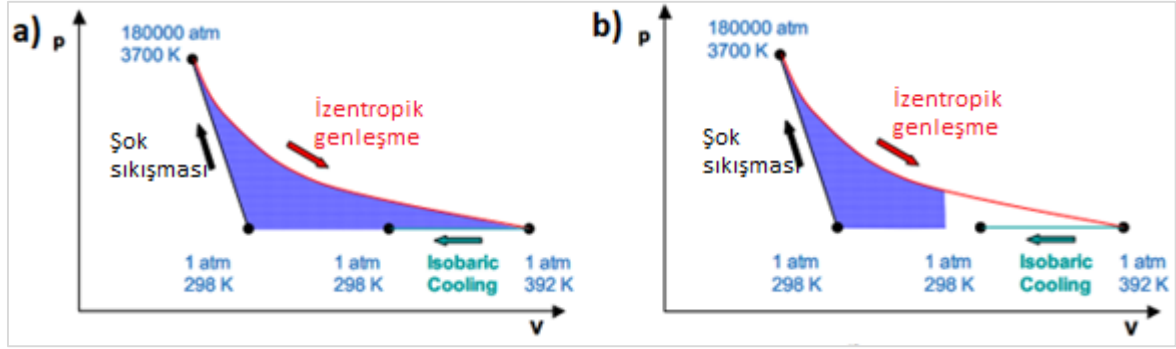
Kararlı bir detonasyonda ekzotermik kimyasal reaksiyon oluşurken detonasyon ürünleri adyabatik olarak genişterek metal duvarın genişlemesine neden olur. Detonasyon sırasında

patlayıcının toplam kimyasal enerjisinin bir kısmı şok dalgası ile reaksiyona girecek olan patlayıcıyı mekanik olarak sıkıştırırken kalan kısmı da detonasyon ısısı olarak detonasyon ürünlerinin iç enerjisi veya kinetik enerji olarak depolamaktadır. Detonasyon sonucunda gaz ürünlerin içerdiği ve silindir duvarına genişlettiği enerji, patlayıcının genişleme enerjisi olarak ifade edilmektedir. Genleşme enerjisi ile çevresine yapılan iş ise iş yapma kapasitesi olarak adlandırılır. Eğer patlayıcının reaksiyon bölgesi çok ince ise çevresine karşı uyguladığı momentumda o kadar düşüktür. 1-boyutlu akışta termodinamik detonasyon grafiği aşağıda Şekil 1.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Detonasyon ürünlerinin termodinamik değişim grafiği [4]

Bir patlayıcının iş yapma kapasitesini veren kinetik veri, silindir genişleme testleriyle belirlenebilir. İş yapma kapasitesi ise genellikle Gurney enerji denklemiyle ifade edilir. Gurney enerji, birim patlayıcı kütlesi başına genişleyen detonasyon ürünleri ve hızlandırılan metalin son kinetik enerjisidir. Metal hızlandırma sırasında detonasyon ürünlerinin radyal genişleme hızı lineer kabul edilir. Metal ve patlayıcının kinetik enerjisi ile kıyaslandığında ısı, deformasyon ve sürtünmeden dolayı oluşan enerji kayıpları ihmal edilir. Mevcut enerjinin kullanılabilirliği, basıncın çevre şartlarına yaklaşmasıyla azalmaktadır. Detonasyon sırasında açığa çıkan ve kullanılabilir enerjinin genişleme denklemi üzerinde gösterimi aşağıda Şekil 1.8 ile verilmiştir.



Şekil 1.8. Detonasyon sırasında a) açığa çıkan enerji b) kullanılabilir enerji [4]

Yukarıdaki şekilde bir patlayıcının detonasyonu sırasında katı reaktif fazın sıkışması ve reaksiyon sonucunda reaksiyon ürünü gazların genişleme eğrileri gösterilmektedir. Adyabatik olarak kabul edilen bu sürecin sonunda çevreye yapılan iş boyalı kısımla gösterilmiştir. Ancak fiziksel koşullar nedeniyle bu işin bir kısmı kullanılabilir.

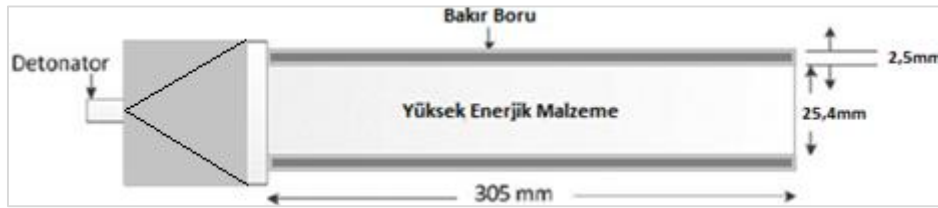
Hal denklemi

Patlayıcıların detonasyon sonrasında oluşan gaz ürünlerinin genişleme durumunun ifade edilmesi için hal denklemleri kullanılmaktadır. Bu bağlamda patlayıcıların detonasyon sonrası durumunu ifade edebilmek için birçok hal denklemi sunulmuştur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı JWL hal denklemidir. Alüminyum katkılı yüksek enerjik malzemelerin reaksiyon mekanizması ideal mekanizmadan farklı olduğu için Miller ve Guirguis, JWL denklemini geliştirerek alüminyumun zamana bağlı reaksiyon hız ifadesini içeren bir terim eklemiştir. Yeni oluşturulan JWL denklemine ise alüminyum partiküllerinin yanma hızı zamanla değiştiğinden TD-JWL (İng. time dependent) veya JWL Miller uzantısı (İng. extension) denilmiştir. Tez kapsamında alüminyumlu patlayıcıların durum denklemi parametrelerinin en hassas şekilde elde edilebilecek test yönteminin seçilmesi, bu test düzeneğinin kurulması ve prosedürün ortaya koyulması gerekmektedir. Bu kapsamda uygun test düzenekleri incelenmiştir.

Silindir genişleme test yöntemi

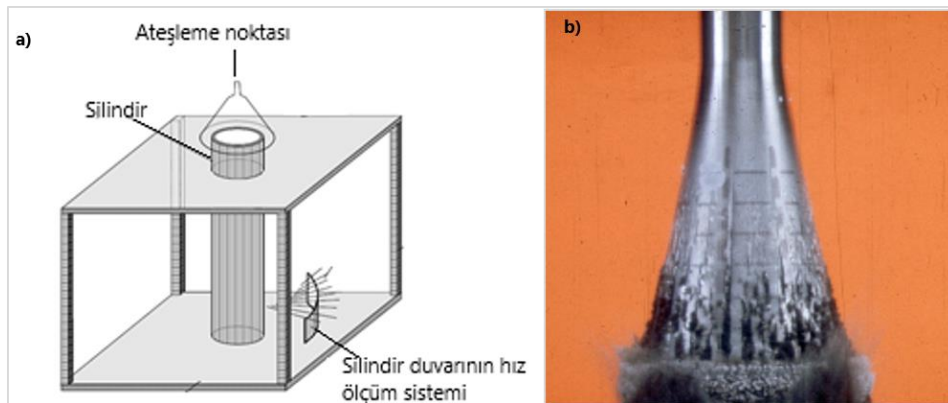
Yüksek enerjik malzeme ve bağlayıcı faz ile oluşturulan ideal patlayıcıların JWL denklem parametrelerinin elde edilmesinde yaygın olarak silindir genişleme test yöntemi kullanılmaktadır. Silindir genişleme testi, patlayıcının görece performansını ölçmek için

detonasyon fiziği uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bir patlayıcının detonasyonu sonrasında performansını ve detonasyon enerjisinin harp başlığına transferi uygulamalarıyla ilgili önemli ve yaygın olarak kullanılan bir çözümdür. Bu yöntemle patlayıcının içinde bulunduğu gövde duvarını hangi hızda genişlettiği ve deformasyon kabiliyeti hakkında bilgi edinilebilmektedir. Silindir genişleme testlerinde yaygın olarak kullanılan boyutlar ve test düzeneğinin şekli aşağıda Şekil 1.9 ile gösterilir.



Şekil 1.9. Silindir testinin standart deney geometrisi

Test, 300 mm uzunluğunda ve yaklaşık 25,4 mm (1”) çapında OFHC bakır borunun içerisine yerleştirilen patlayıcının infilak ettirilmesi sonucu gerçekleştirilir. Silindir duvarının elastik olarak orijinal yarıçapının yaklaşık 3 katına genişlemesi sırasında, ateşleme noktasından 200-250 mm kadar mesafede olan silindir duvarının konum geçmişinin tespit edilmesine dayanır. Silindir duvarının genişlemesi sırasında silindirin duvar hızı radyal ekseninde silindire dik açıdan ölçülür. Metal hızı zamana bağlı fonksiyon haline getirilerek kinetik enerji değerleri hesaplanır. Silindir genişleme test düzeneğine ait gösterim aşağıda Şekil 1.10 ile gösterilmiştir.



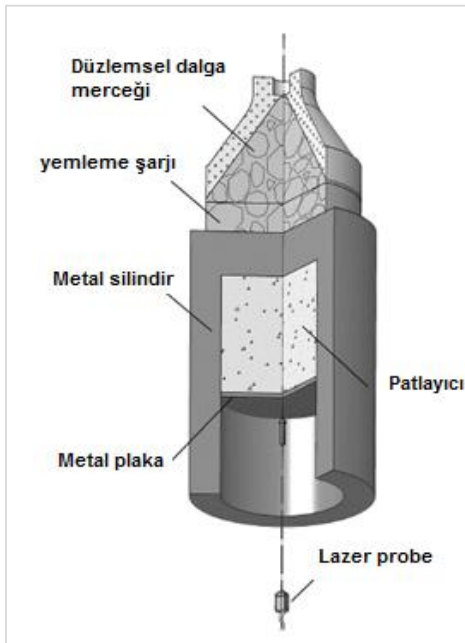
Şekil 1.10. a) Silindir genişleme test düzeneği [6], b) genişlen silindirin görüntüsü [9]

Yukarıdaki şekilde verilen silindir genişleme test düzeneğinde silindiri üst ucundan ateşleme gerçekleştirilir. Ateşlenen patlayıcı detonasyonu sonrasında oluşan gazlar genişleyerek

silindiri Şekil 1.10 b) ile verilen görüntüdeki gibi genişletir. Silindir duvarı genişlemesinin hızı ise silindirin alt ucuna yakın bölgedeki hız ölçüm sistemi üzerinden gerçekleştirilir.

Plaka hızlandırma test yöntemi

Patlayıcının genişleme enerjisinin hızlandırma etkisi prensibiyle çalışan plaka hızlandırma yöntemi JWL denkleminin parametrelerini belirlemek için diğer bir etkin yöntem olarak kullanılmaktadır. Daha düşük miktarda patlayıcı ile test yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Çelik malzemeden silindir şeklindeki namlu içerisine patlayıcı ve patlayıcı üzerine OFHC bakır plaka yerleştirilerek düzenek kurulmaktadır. Alüminyum katkılı patlayıcının infilak ettirilmesi sonucu hızlandırılan plakanın hız geçmişi ölçülmektedir. Metal plakanın hız bilgisi ile kinetik enerjisi hesaplanarak genişleme enerjisi elde edilebilmektedir. OFHC bakır plakanın hız geçmişi VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) veya PDV (Photonic Doppler Velocimeter) gibi interferometre cihazlarla hassas olarak ölçülebilir. Plaka hızlandırma yöntemi PDV cihazı gibi hassas ve yüksek hızlı ölçüm yapabilen bir cihaz ile kullanıldığında patlayıcı ve metal malzemeler için şok dinamiği ölçüm araştırmalarında yayın olarak kullanılabilir. Plaka hızlandırma test düzeneğine ait gösterim aşağıda Şekil 1.11 ile verilmiştir.



Şekil 1.11. Deney düzeneğinin kesit görüntüsü [10]

Plaka hızlandırma sistemi, silindir genleşme yönteminde olduğu gibi metal parçacığın hızlandırılmasına dayanmaktadır. Buna göre patlayıcının ateşlenmesi sonucunda oluşan ürün gazları genişlerken metal plakayı hızlandırır. Metal plakanın bir yüzü ışığı yansıtıcı olacak şekilde parlatılmış olur. İnterferometre cihazı tarafından plaka yüzeyine gönderilen ışın, yüzeyden tekrar yansiyarak giden ve gelen ışınlar arasındaki farktan hız ölçümü gerçekleştirilir.

SPEED Yazılımı

SPEED (Shock Physics Eulerian Explicit Dynamics) yazılımı hidrodinamik akış problemlerini sayısal olarak çözen paket programdır. Patlayıcıların infilak ettirilmesi ve şok basınçlarının patlayıcılar üzerinde etkisini sayısal olarak çözme konusunda oldukça gelişmiştir. SPEED yazılımında 2-boyutlu eksenel simetrik çözümler oldukça basit ve hızlı şekilde çözülebilmektedir. SPEED hidrokodu içerisinde malzemelerin hidrodinamik parametreleri için veri tabanı bulunmaktadır. Bu veri tabanı literatür kaynaklarına dayanmakta olup parametrelerin alıntı yapıldığı kaynaklar program yazılımı içinde belirtilmektedir. SPEED programı hazır literatür kaynakları sunarken aynı zamanda kullanıcının girdi yapabilmesine de izin vermektedir. Böylece elde edilen deneysel parametreler ile girdi oluşturularak yeni malzeme özelliklerine göre çözümleme yapılabilmektedir. Tez çalışması kapsamında kullanılan SPEED hidrokod çözümlerinde oluşturulan tüm modeller için kaynağı belirtilmeyen parametreler SPEED programının veri tabanından alınmıştır. Testler sonucunda elde edilen deneysel verilerin literatür ve diğer kaynaklarla karşılaştırılması için SPEED programı kullanılmıştır.

Genel değerlendirme

Tez çalışması kapsamında ideal davranış gösteren ve ideal davranış göstermeyen patlayıcıların detonasyonu sonrasında genleşme hal denklemi parametrelerinin bulunması için test düzenekleri karşılaştırılmıştır. Silindir genleşme testlerinde detonasyon dalgası ölçüm sistemine doğrultuları farklı olduğundan silindirin metal özellikleri tarafından etkilenmez. Bu sayede geniş bir hacim için ölçüm yapılabilir ki bu da farklı patlayıcılar için veri elde edilmesine yardımcı olur. Silindir genleşme testi patlayıcının yüksek hacim ve düşük basınç seviyesine gelirken ölçüm yapılması için tasarlanmıştır [11]. Alınan verilerin işleme yöntemi bazı farklı uygulamalar yapılsa da temel olarak birçok çalışmada

doğrulanmıştır. Ancak alüminyum katkılı patlayıcılarda kararlı detonasyonun sağlanması için gereken kritik çap daha büyüktür. Bu nedenle yüksek alüminyum içerikli patlayıcılarla yapılan silindir genleşme testinde daha fazla patlayıcı kullanılmaktadır. Bu durum test maliyetini de arttırabilmektedir. Plaka hızlandırma testlerinde ise detonasyon dalgası, hızı ölçülen plakaya dik olarak geldiğinden plaka yüzeyinde yüksek basınç oluşturur. Bu durum plakanın metal özelliklerine bağlı olarak ölçüm hassasiyetini değiştirebilir. Plaka hızlandırma test yöntemi uygun bir hız ölçüm sistemi kullanıldığında daha az patlayıcı kullanılabilir, patlayıcı ve metal malzeme ile ilgili daha fazla veri elde edilmesini sağlayabilir.

Testlerde kullanılan patlayıcılar, çevresel etkilere karşı duyarlı yüksek enerjik malzemelerdir. Patlayıcı testlerin yapılması kontrollü olmalıdır. Bu nedenle patlayıcı ile yapılacak testler, çevre ve kişi güvenliklerince özel önlemler dâhilinde ve uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmektedir. Ayrıca mühimmat geliştirilmesi için standart malzemeler kullanılmaktadır. Bu nedenle alüminyumlu patlayıcıların detonasyonu sonrası durumunun belirlenmesi sırasında kullanılacak malzemeler, hem güvenlik açısından standartların korunması hem de mühimmat geliştirilmesi için kullanılan malzemelere uygun test yönteminin geliştirilmesi açısından tercih edilmiştir. Bununla birlikte bu testler, yetkili kurum olan TÜBİTAK SAGE yerleşkesinde icra edilmiş ve testlerde kurumun cihazları, aletleri ve alt yapı olanakları kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde JWL hal denklemi parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar genel hatlarıyla sunulmuştur.

2.1. Plaka Hızlandırma Testi Çalışmaları

Wang, Buttler ve Krier katı yakıt ve patlayıcıların ideal olmayan yanma veya detonasyonu sonrası gaz ürünlerinin durumunu veren denklem ve yöntemleri incelediler. Buna göre detonasyon sonrası gaz ürünler, malzemenin yanma reaksiyon özelliklerine ve enerjisine göre oldukça farklı davranış göstermektedir. Birçok hal denklemi gazların moleküler dinamik teorisine dayanmaktadır ve bunların basitleştirilerek kullanılması için bazı düzeltme faktörleri içeren ve eğri uydurma yoluyla deneysel olarak elde edilen hal denklemleri geliştirilmiştir. Bu denklemleri belirli bir yoğunluk aralığı içerisinde karşılaştırdılar. İdeal gaz denkleminde katı faz özelliği gösteren durumlara kadar geniş bir yoğunluk aralığında sonuç veren çok denklemlilikten geliştirilmiş bir hal denklemi ortaya çıkardılar. Hassas sonuç verdiği bilinen bazı enerjik malzemelerin detonasyon özellikleri geliştirilen denklem sonuçları ile karşılaştırıldı ve yakın sonuçlar elde edildi [12].

Yuan ve arkadaşları, alüminyum katkılı patlayıcıların infilakı sonucunda parçacık hızlandırmasına alüminyumun etkisini incelemişlerdir. Alüminyum RDX'in detonasyonu sonucunda detonasyon ürünleriyle reaksiyona girerek enerji açığa çıktığından bunu karşılaştırmak için inert LiF malzeme katkılı RDX hazırlayarak karşılaştırma yapmışlardır. RDX yüksek enerjik malzemesine %5, %10 ve %15 oranında Al/LiF katkılı RDX hazırlayarak plaka hızlandırma testi yapmışlardır. Testlerde hız ölçüm cihazı olarak PDV kullanılmıştır. Alüminyum katkılı patlayıcının detonasyon reaksiyonunu iki bölümde incelemişler; bunlar detonasyon bölgesi ve son detonasyon bölgesidir. Alüminyumun detonasyon bölgesindeki entropi değişimi alüminyum reaksiyon derecesi ile ilişkili olduğu varsayımı yapılmıştır. Detonasyon bölgesinde izentropik varsayım yapılmasına rağmen, alüminyumun reaksiyon bölgesinde izentropik olmayan model oluşturulmuştur. Alüminyumun yanma derecesi ise reaksiyon kinetik fonksiyonundan elde edilmiştir. LiF ile hazırlanan izentropik patlayıcı ve alüminyum ile oluşturulan izentropik olmayan patlayıcı arasındaki fark kullanılarak oluşturulan yeni sayısal modelle deneysel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [13].

Liu ve arkadaşları, 170 nm ortalama tane boyutlu alüminyum katkısı kullanarak Al/RDX patlayıcısının detonasyon özellikleri için kapsamlı test yaptıklarını belirtmiştir. Detonasyon bölgesi, metal hızlandırma etkisi incelenmiştir. Testlerde detonasyon hızı, detonasyon basıncı ve patlayıcı ile katı cisim ara yüzey hızı ölçülmüştür. Deney için plaka hızlandırma test yöntemi kullanılmıştır. Alüminyum katkısının kontrolü için Al/RDX patlayıcısı ile aynı kütle oranlara sahip LiF/RDX patlayıcısı kullanılarak karşılaştırmalı test yöntemi izlenmiştir. Test patlayıcılarının boyutları Ø20 mm çapında ve 20 mm boyunda üretilmiştir. Patlayıcı-plaka ara yüzey hızının ölçülmesi için Ø20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında LiF plakası kullanılmıştır. Tüm testlerdeki hız ölçümlerinde DISAR (Displacement Interferometry for Any Reflector) cihazı kullanılmıştır. Alüminyumun reaksiyon enerjisi termokimyasal hesaplamalarla belirlenmiş, deneysel parametreler ve yanma sonrası enerjinin bilgisayarlı sayısal analiz programlarında simülasyonları yapılarak detonasyon parametreleri elde edilmiştir. 170 nm tane boyutlu alüminyum katkısı kullanılarak yapılan testlerde %0, %5, %10 ve %15 katkılı alüminyum kullanılan testlerde detonasyon hızlarında %1,3 azalma olduğu görülmüştür. Bu patlayıcılarla yapılan basınç testlerinde manganin duyargalarının ölçümleri sonucunda önemli bir basınç farkının olmadığını tespit edilmiştir. %15 kütle alüminyum oranına sahip patlayıcının detonasyon reaksiyonu zamanı 64 ns ölçülürken detonasyon bölgesinin kalınlığı 0,47 mm ölçülmüştür. %5 katkılı patlayıcı kullanılarak yapılan teste göre ölçümler, zamanda %14 ve kalınlıkta %8 kadar daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Plaka hızlandırma testlerinde 10 µs boyunca alınan verilerde %15 katkılı patlayıcının hızı %5 katkılıya göre %12 daha fazla çıkarken, plakanın hızlanma zamanı 2,9 µs daha geç olmuştur. Hesaplanan JWLM modelinin parametreleriyle yapılan sayısal simülasyonlarda, detonasyon ürünlerinin hacmi ilk hacmin 2 katına çıktığında alüminyumun %80'nin reaksiyona girdiği hesaplanmıştır [8].

Li ve arkadaşları, alüminyum katkılı patlayıcılarda alüminyumun hızlandırma etkisine katkısını araştırmak için farklı bir çalışma yapmıştır. Bu sayede hız farkı hareket kanunuyla doğrudan hesaplanabilmektedir. Testlerde patlayıcı olarak TNT ve alüminyum katkılı bir başka patlayıcı kullanılmıştır. TNT patlayıcısı ile yapılan testte ikinci yanma (İng. Afterburning) oluşmazken alüminyum katkılı patlayıcıda bu etki incelenmiştir. Bunun için bir ucu kapalı, diğer ucu ise hareketli piston şeklindeki plaka ile kapalı boru içerisinde 20 g patlayıcı patlatılarak plakanın hareketi yüksek hızlı kamera ile görüntülenmiştir. Boru ucundaki plakanın kütlesi ile zamana bağlı konum değişiminden hız ve ivme bulunabilmiştir. Newton hareket kanunu eşitliği ile basıncın zamana göre değişimi elde edilmiştir.

Patlayıcının ilk hacmi ve hareketli plakanın düzgün boru içindeki konum değişiminden genleşme oranı bulunabilmiştir. Mekanik enerji denkliği kurularak basınç ve hacim değişiminden zamana bağlı enerji değişimi elde edilmiştir. Buna göre TNT patlayıcısında detonasyon sonrası yanma enerjisi sıfıra yakın iken alüminyumlu patlayıcının enerjisi artmaya devam ettiği belirtilmektedir. Alüminyumlu patlayıcının yanma sonrası enerjisi yaklaşık 4MJ/kg olarak hesaplanırken Cheetah termokimyasal kodunda hesaplanan ve kalorimetre bombası cihazında ölçülen değerler daha düşük bulunmuştur [14].

Metallerin erime sıcaklıkları, çarpma sonucu yüzeyde oluşan karışık faza dönüştüğü andaki ölçülen yüzey sıcaklıklarına eşittir. Tan ve arkadaşları tek kristalli LiF plakasının arkasına yerleştirdikleri OFHC bakır ve saf demir plakalarının erime sıcaklıklarını ölçmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Genellikle optik radyometri tekniği ile sodyum klorür veya quartz plakası arkasına yerleştirilen plakaya şok basıncının çarpması sonucu sıcaklıkları ölçülmektedir. Ancak bu yöntem şeffaf plaka arkasında yalnızca opak malzemelerin sıcaklığı ölçülebilmektedir. Tek kristalli LiF tuzu 200 GPa basınca kadar saydamlığını koruduğu için genellikle tercih edilmiştir. Bu nedenle şeffaf plakanın arkasına yansıtıcı olması için film koyularak boşluksuz temas sağlanabilmektedir. LiF plakasının arkasına film koyularak arkasına erime sıcaklığı ölçülecek metal plaka koyularak test düzeneği kurulmuştur. OFHC bakıra 2 kademeli gaz silahıyla 225, 261 ve 271 GPa basınçlar uygulanarak sırasıyla yüzeyde 4578 K, 4755 K ve 4981 K sıcaklıklar ölçülmüştür [15].

Xie ve arkadaşları, bakır kristallerinin yüksek şok basıncına maruz kaldığında fiziksel değişimini incelemişlerdir. Bunun için bakır plakaya 2-3 km/s hızlarında bir piston çarptırılarak düzlemsel bir şok dalgası uygulanmıştır. Şok basıncının etkisiyle bakır plaka plastik bölgeye geçiş yaparak erimelerin meydana geldiği görülmüştür. Bakır plakanın plastik bölgeye geçişi, piston hızının 2,5 km/s ve 170 GPa basıncın üzerinde olduğu durumlarda meydana geldiği belirtilmiştir. Şok fiziği uygulamalarında malzeme karakteristiğinin anlaşılması için farklı şok düzeylerinde ve şok basıncına tepki zamanı boyunca davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Bu testler genellikle düşük empedanslı tampon plaka veya serbest yüzey ölçümüyle gerçekleştirilmektedir. Erime olayı termodinamik olarak düşük basınçta daha kolay gerçekleştiğinden farklı bir yapı izlemektedir. Testlerde 3 km/s hızla çarptırılan piston sonucunda bakır plakanın atomik pozisyon geçmişi ve radyal dağılım fonksiyonu ölçülerek erimenin 146 GPa basınçta olduğu belirlenmiştir. Buna göre 2,25, 2,5, 2,75 ve 3 km/s hızlarla çarptırıldığında yaklaşık olarak

sırasıyla 25 GPa, 200 GPa, 175 GPa ve 125 GPa basınçlar elde edilmiştir. Buna göre 2,5 km/s hızın üzerinde çarpma gerçekleştiğinde 176 GPa basınç elde edildiğinden erimenin gerçekleştiği belirtilmiştir [16].

2.2. Düzlemsel Dalga Merceği Test Çalışmaları

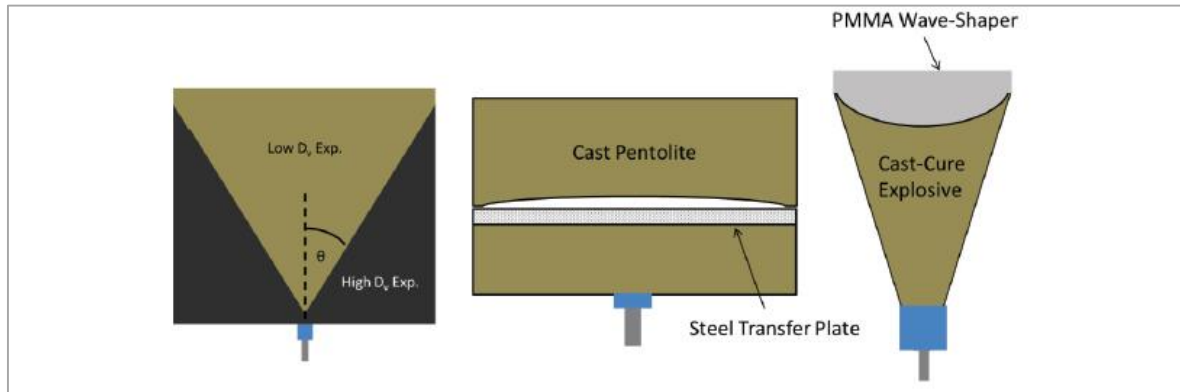
Fritz, detonasyon dalgasının düzlemselleştirilmesi için kullanılan mevcut yöntemlerinin çoğunu maliyetli bulduğu ve karmaşık patlayıcı üretimlerinin zor olması sebebiyle inert plastik malzemeyi kullanarak bir tasarım yapmıştır. Bu yöntemle plastik malzemede yarı küresel şekli deneme yanılma yoluyla doğru geometrisini oluşturarak düzlemsel dalga merceği hazırlamıştır. Çoğu patlayıcı merceği tek detonasyon noktasından ateşlenen patlayıcının yay biçimindeki detonasyon dalgasını düzlemselleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Bunun için en sık kullanılan yöntemlerden biri detonasyon hızları farklı olan iki patlayıcın kullanıldığı merceklerdir. Fritz çalışmasında, detonasyon hızı düşük olan patlayıcı yerine mekanik işlemlerin kolayca yapılabileceği inert plastik malzeme kullanmıştır. Tasarım, patlayıcı malzemenin plastik üzerine dökülerek veya basılarak üretim yapılabilmesine izin vermektedir. Sıcak döküm sırasında plastik bağlı patlayıcı ve plastik mercek parçasının temel malzemeleri aynı olduğundan fiziksel özellikleri uyumlu olur. Çalışmada yarı küresel inert plastik mercek üzerine basit üretim olması için silindir şeklinde patlayıcı dökülmüştür. Ancak bu şekil koni olduğunda düzlemsel dalga oluşması etkilenmeden daha az patlayıcı kullanılabilir. Taslak model, mercek formülü ve ışın izleme yöntemiyle kurulmuştur. Oluşturulan taslak üzerine merceğin yarı küresel şekli iteratif olarak denenerek detonasyon dalgasını düzlemselleştirmek için uygun geometri bulunmasını sağlar. Plastik içerisindeki şok hızı sabit değildir. Şok dalgası plastik içine girdikten sonra ekseninde ilerlerken kademeli olarak hızı azalır. Şok dalgasının izlediği yol ekseniden radyal yöne kaydıkça şok dalgası plastik ile teğet olma eğiliminde etkileşime girer. Tasarlanan mercek ateşlenerek streak kamera ile dalga oluşum mesafeleri kaydedilmiştir. Bunun için 7 yarıktan oluşan alüminyum yüzeyin içinden detonasyon dalgası geçerken flaş ışığından yararlanılmıştır. Sonuç olarak mercekte oluşan dalganın radyal yöndeki en büyük zaman farkı 0,80 μ s ölçülmüştür. Bu sonuç radyal mesafeye göre çok küçük olduğundan ihmal edilerek dalganın düzlemsel kabul edilebileceği belirtilmiştir. Fritz, oluşan küçük zaman farkının Taylor dalgalarından meydana geldiğini öngörmüştür [17].

Anastacio ve arkadaşları, 2 silindirik patlayıcı arasına metal halka yerleştirilerek detonasyon eğrisinin düzlemselleştirilmeye çalışmışlardır. Test sonucu yüksek hızlı kamera ve lazerle ölçülerek LS Dyna simülasyonunda karşılaştırması yapılmıştır. Metal halka yönteminde prensip; tek noktadan ateşlenen patlayıcının oluşturduğu şok dalgası metal üzerinden daha yüksek hızda geçerken, halkanın orta kısmında ses hızı daha düşük olan hava üzerinden geçerken yavaşlamasıdır. Deneyde silindir şekilli TNT ve A-IX-1 patlayıcı kalıplarının arasına 2 mm kalınlığında ve dış çapı 40 mm, iç çapı 20 mm olan halka yerleştirilerek hazırlanmıştır. Detonasyon eğrisi ise fiber duyargaların patlayıcı merkezinden radyal yönde belirli aralıklarla yerleştirilmesiyle ölçülmüştür. Deney sonucunda TNT ile yapılan sonuçlar başarılı olamamıştır. Yalnızca A-IX-1 patlayıcısı ve simülasyon birbiriyle eşleştiği görülmüştür. LS Dyna yazılımında yapılan 2-boyutlu simülasyonda JWL modeli ve IG modeli olmak üzere 2 farklı model kullanılmıştır. Bunlardan en yakın sonucu veren model ise IG modeli olmuştur [18].

Naeem ve arkadaşı, birbiriyle temas halinde olan detonasyon hızı farklı 2 patlayıcının geometrisini belirleyerek yarı-küresel detonasyon dalgasını düzlemsel hale getirmeye çalışmışlardır. Patlayıcıların bazı ölçülerini hesaplamak için Matlab programlama kodu kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Ansys Autodyn hidrokodunda simülasyonu yapılarak karşılaştırılmıştır. Düzlemsel dalga şekillendiricilerin birinde oktojen ve baryum nitrat kullanılırken diğerinde oktojen ve TNT patlayıcıları kullanılmıştır. Test modeli tasarlanırken, detonasyon hızları farklı olan patlayıcıların yüksekliği ve detonasyon dalgasının düzlemsel olması gereken mesafe dikkate alınmaktadır. Buna göre eksenel olarak simetrik olan ve koni şeklindeki patlayıcıların ortadan ateşlenmesi sonucunda detonasyon dalgası için en kısa mesafe eksenel yönde olurken köşegene olan mesafe daha uzak olmaktadır. Bu nedenle eksenel yönde detonasyon hızı düşük olan patlayıcının yüksekliği fazla iken kenarlara gidildikçe detonasyon hızı yüksek olan patlayıcının kalınlığı artmaktadır. Bu geometri belirlenerek patlayıcı için tasarım modeli hesaplanmıştır. 2mm kalınlığındaki alüminyum gövde içerisinde kalınlıkları hesaplanan patlayıcılar sırasıyla yerleştirilerek simülasyon modeli oluşturulmuştur. Hazırlanan simülasyon modeline Ansys Autodyn hidrokodunda çözümleyerek Matlab programında hazırlanan kod ile hesaplanan model kalınlıklarının düzlemsel dalga merceği hazırlanmasında uygun olduğu değerlendirilmiştir. Ancak farklı şekildeki iki patlayıcının pratik olarak üretimi tehlikeli ve maliyeti yüksek olmaktadır. Bu nedenle bu yöntemle düzlemsel dalga merceğinin oluşturulması genellikle tercih edilmemektedir [19].

Joseph ve arkadaşları, polimer dalga şekillendirici kullanarak hazırlanan düzlemsel dalga merceği için çalışmalar yapmıştır. Tasarımın çıkış noktası olarak Fritz tarafından tasarlanan düzlemsel dalga şekillendirici alınmıştır. 100 mm (4 in) çapındaki bu tasarım daha az patlayıcı kullanarak daha küçük bir ateşleme sisteminde test edilmek için 25,4 mm (1 in) boyutunda tasarlanmıştır. Tasarımlarda patlayıcıların doldurulduğu ve dalga şekillendirmek için kullanılan polimer malzemeler yüksek hassasiyetle işlenmesini sağlamak ve iş gücünü azaltmak için 3D yazıcı ile üretmiştir. Kullanılacak test kalemlerinde PBXN110 malzeme özelliklerine benzemesi için yüksek enerjik malzemesi HMX olan döküm patlayıcı kullanılmıştır. Test öncesinde tasarım modeli CTH hidrokodunda çözümlenmiştir [20].

Forrest ve arkadaşları, farklı yapıdaki düzlemsel dalga merceği modellerini test ederek karşılaştırmıştır. Bunun için iki farklı detonasyon hızına sahip patlayıcıdan oluşan mercek, patlayıcıların arasına metal halka ve hava boşluğu bırakılarak hazırlanan mercek ve inert malzemeyle patlayıcı ve plaka arasında tampon oluşturulan mercekleri incelemiştir. Düzlemsel dalga elde etmek için kullanılan yöntemlerin bazıları aşağıda Şekil 2.1 ile verilmiştir.



Şekil 2.1. Düzlemsel dalga elde etmek için kullanılan bazı dalga şekillendirici yemleme şarjı gösterimleri [21]

Şok dalgasının ilerleyişi streak kamera ile incelenirken en yüksek basınçlarının tespiti PDV cihazı ile yapılmıştır. Sonuçta elde edilen streak kamera görüntüleri karşılaştırıldığında istenen düzlemsel dalgayı veren en iyi tasarımın detonasyon hızı farklı iki patlayıcıdan oluşan mercek olmuştur. Ancak patlayıcıların şekillendirilmesi maliyetli ve işçiliği yüksek olduğundan uygun bulunmamıştır. Patlayıcılar arasında hava boşluğu ve metal halka ile hazırlanan mercekte istenen düzlemsel dalga elde edilemediği gözlenmiştir. Ancak inert

dalga şekillendirici ile hazırlanan mercek hem şok dalgasının tutarlı ilerlediği ve düzlemsel dalga oluşumunu sağladığı görülmüştür. Dalga şekillendiriciyi işleminin kolay olması ve üretimin ucuz olması nedeniyle tercih edildiği belirtilmiştir [21].

2.3. Silindir Genleşme Testi Çalışmaları

Elek ve arkadaşları, JWL denkleminin parametrelerini silindir genleşme testi sonucunda elde edilen deneysel verileri kullanarak analitik çözüm ile JWL denkleminin parametrelerini bulmuşlardır. Deneysel olarak elde edilen JWL denklemi sayısal sonlu eleman modeline girdi yaparak deneysel veriyi doğrulamışlardır. Sayısal sonlu elemanlar programı olarak abaküs programını kullanmışlardır. Silindir genleşme testinde silindir duvarının hız ölçümlerini streak kamerayla yapmıştır. TNT, Composition B, PBXN-9404, HMX ve FH-5 olmak üzere 5 farklı patlayıcı için testleri gerçekleştirmişlerdir. Patlayıcıların deneysel verileriyle analitik çözüm yaparak JWL parametrelerini bulmak için yoğunluk, detonasyon hızı, CJ basıncı ve detonasyon enerjisi gibi karakteristik özellikleri literatürden bulmuşlardır. Testlerde patlayıcı doldurulan silindir özellikleri ve çapı standart olarak alınmıştır. Silindir çapları yaklaşık Ø25mm iken FH-5 için kullanılan silindir çapı daha düşük alınmıştır. Analitik çözümde farklı bir yöntem izlenerek basınç değeri silindir duvarının hareket kanununa denkleminde elde edilmiş, silindir duvarının deformasyon enerjisini hesaba katan bakırın mukavemet değeri kullanılmıştır. Genleşme oranı ise detonasyon ürünlerinin süreklilik denklemi üzerinden elde edilmiştir. Parametre çözümünde R_1 , R_2 ve ω başlangıç değerleri literatürden alınarak tüm parametreler hesaplanmış ve literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen parametreler abaküs programında silindir genleşme test modeli oluşturulmuştur. Programda dinamik çözüm Euler/Langrange birlikte çözüm metodu uygulanmıştır. JWL parametreleri patlayıcı modeli olarak girilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak zamana bağlı deneysel konum değerleri abaküs model sonuçlarıyla iyi bir eşleşme gösterirken deneysel Gurney hızı abaküs modeli arasındaki fark $\pm 3\%$ değerinin içinde kaldığı belirtilmiştir [22].

Hornberg 1989 yılında yapmış olduğu çalışmada silindir genleşme testinin yanı sıra plaka hızlandırma ve akvaryum testlerini kullanmışlardır. Çalışmada silindir genleşme testleri için farklı patlayıcıların detonasyonu sonrası genleşme sırasında silindir duvarının hareketini etkileyen durumlar incelenmiştir. Bunun için duyarsız yüksek patlayıcı TNT patlayıcısına katkı yapılarak ideal olmayan patlayıcılar türetilmiştir. Bu katkılar

nitroguanidin (NQ), amonyum nitrat (AN) ve bunların alüminyum (Al) katkılarıdır. Patlayıcıların Gurney enerjileri ve genişleme yarıçapına bağlı duvar enerji değişimleri ideal davranış gösteren Composition B patlayıcısı ile karşılaştırılmıştır. İdeal olmayan katkıli patlayıcıların testleri 25,4 mm çaplı silindirler yerine 40 mm çaplı silindirler ile yapılmıştır. Sonuç olarak, genişlemenin ilk başlarında patlayıcı karışımlarının enerjileri hızlı yükselmesine rağmen genişlemenin ileri fazlarında alüminyum katkısının daha baskın olduğu görülmektedir. Alüminyum katkı oranı arttıkça silindir duvarının enerjisi düşmüştür. Ek olarak, katkı oranı arttıkça detonasyon ısısı yükselmesine rağmen isentropik genişleme hızı giderek düştüğü görülmüştür [23].

Emir Topkaraoğlu, tez çalışmasında ideal patlayıcıların detonasyon sonrası ürün gazlarının durumunu incelemiştir. JWL hal denklemi parametrelerinin belirlemek için silindir genişleme yöntemini uygulamıştır. Dört farklı patlayıcı ile ikişer test gerçekleştirerek basınç-ölgül hacim ilişkisini incelemiş ve JWL parametrelerini hesaplamıştır. Hesapladığı JWL parametrelerini kullanarak silindir genişleme testinin doğrulamasını yapmak için sonlu eleman yöntemini kullanmıştır. Hesapladığı JWL parametrelerini Ansys Autodyn ticari yazılım paketine girdi olarak kullanmış ve silindir genişleme testlerinin simülasyonunu yapmıştır. Hidrokod simülasyonunda hücre boyutlarını değiştirerek etkin hücre yapısını bulmuş ve silindir duvarının konum-zaman geçmişini ölçerek sonuçları karşılaştırmıştır [24].

Castedo ve arkadaşları, silindir genişleme testini maden sektöründe kullanılan, ideal olmayan 2 farklı emülsiyon patlayıcısının JWL parametrelerini elde etmek için kullanmıştır. Temel malzemesi ANFO (amonyum nitrat fuel oil) ile üretilen patlayıcıların her biri için 1030 ve 1182 kg/m³ değerinde 2 farklı yoğunluk için hazırlanmıştır. Hazırlanan bu patlayıcıların her birini 2 farklı silindir çapı için test ederek toplamda 8 adet test gerçekleştirilmiştir. Silindir genişleme testi yapılan patlayıcıların JWL parametreleri hesaplanırken parametrelerin başlangıç değerleri W-DETCOM termokimyasal koduyla hesaplanmış ve parametreler Matlab programında en küçük kareler yöntemi prensibine göre yazılan kod ile elde edilmiştir. Elde edilen parametreler LS Dyna hidrokodunda 2-boyutlu olarak modellenmiştir. Patlayıcı kütlesi LAG-LAG(Langranian), ALE-LAG (Arbitrary Langranian Eulerian) ve SPH-LAG (Smooth Particle Hydrodynamics) olmak üzere 3 farklı LS Dyna çözüm yöntemi için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak duvar hızı, deneysel verilerle hesaplanan CJ basıncı, ölçülen radyal hız ve hesaplanan Gurney hızı ile sayısal çözümleme

sonucundaki değerlerle karşılaştırılmıştır. En dūřuk hata oranı SPH yōntemi kullanılan sayısal cōzōmleme iēin elde edilmiştir. Ancak deneysel verilerle ōlēōlen radyal hız ve hesaplanan Gurney hızı, sayısal yōntemle elde edilen hızların geēmiři karşılaştırıldığında 40 μs sonunda fark oluşmaya başlamıştır. Bu farkın nedeni ise ideal davranış gōsteren yōksek enerjik malzemeye yapılan katkılardır. Detonasyon sonrasında patlayıcıya yapılan reaktif katkılarının enerjisi yanma sonrası (İng. afterburn) kısmı hesaplanmadığı iēin deneysel verilerin altında kalmıştır [25].

Warren ve arkadaşları, bir patlayıcının detonasyonu sonrasında genleşme parametrelerini elde ederken kullanılan silindir genleşme testi ve plaka hızlandırma testlerinin gōēlū ve zayıf yōnlerinin olduğunu ōne sūrmūřlerdir. Picatinny Liquid Explosive patlayıcısı iēin yarım ōlēek silindir genleşme testi ve plaka hızlandırma testini birlikte kullanmışlardır. CJ basıncı, Gurney hızı, detonasyon enerjisini elde etmişlerdir. Bu parametreleri termokimyasal kod ile hesapladıkları JWL parametrelerini kullanarak yaptıkları simūlasyonla karşılaştırmışlardır. Bu sayede silindir genleşme testinin maliyetini azaltırken daha hassas sonuē almayı hedeflemişlerdir. Aynı test dūzeneęinde silindir genleşme yaparken silindirin uē kısmına yerleştirilen plaka ile plaka hızını ōlēmūřlerdir. Silindir genleşme sırasında detonasyon sonrası gazların genleşme enerjilerini ve plaka hızlandırma testi ile CJ basıncını elde etmişlerdir. Bu sayede genleşme parametreleri bulunurken kullanılan CJ basıncı aynı testte ōlēōlmūřtūr. Sonuē olarak CTH hidrokodunda yapılan iki boyutlu simūlasyonun silindir duvarı hızı, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Kıyaslanan iki testten bir tanesinin grafiklerinin cōk yakın olduğu gōrōlmūřtūr [26].

Esen ve arkadaşları, maden endūstrisinde kayalık patlatma amacıyla kullanılan ANFO gibi ideal olmayan ticari patlayıcıların performansının ōlēōm ve değerlendirilmesini, ANFO ve Emūlsiyon patlayıcılara alūminyum katkısının performansa etkisinin değerlendirilmesi, sonuēların su altı testlerle ve tam ōlēek testlerle karşılaştırılarak silindir genleşme test yōnteminin kullanışlılığı belirlenmeye cōalıřılmıřtır. 3 yıl iēinde, 11 farklı patlayıcı iēin araştırma yapılmıştır. Kullanılan patlayıcılar yōksek enerjik malzeme iēermedięinden kritik cōapları oldukēa yōksektir, bu nedenle aynı tipte patlayıcılar iēin cōapları 40 mm ve 100 mm olan 4'er farklı silindir genleşme testi yapılmıştır. Bu cōalıřmalarda silindirlerin cōapının, silindir genleşmesinin JWL modeliyle tutarlılığının ve hataya neden olan faktōrler detaylı incelenmiştir. Emūlsiyon patlayıcılar saf olarak ve %3,5 oranında 62 μm ortalama tane boyutunda alūminyum katkısı yapılarak performansları karşılaştırıldığında genleşmenin ilk

safhalarında fark görülmezken sonraki safhalarda alüminyumun daha fazla enerji verdiği görülmüştür. Ancak aynı oranda 250 μm ortalama tane boyutunda alüminyum katkısı yapıldığında alüminyumun genleşme kapasitesine etkisi olmadığı görülmüştür. Ayrıca E682 patlayıcısına %6 oranında 62 μm ortalama tane boyutunda alüminyum katkısı yapıldığında en yüksek Gurney enerjisi saf E682 patlayıcısında 1,92 MJ/kg iken alüminyum katkılı olanında 2.16 MJ/kg olmuştur. Böylece %6 oranında alüminyum katkısının Gurney enerjisini %12,5 oranında artarken detonasyon basıncı %3,9 oranında azalmıştır. JWJ parametreleri ile modellendiğinde Gurney enerjileri alüminyum katkısı yapıldığında %12,2 oranında artmıştır. Bu testler arasındaki hata oranı hesaplandığında %4,5-5 arasında olduğu görülmüştür. Çalışmalarda alüminyum katkılı ANFO ve emülsiyon patlayıcılarının performansını ölçmede silindir genleşme testinin etkinliği araştırılmıştır. Sonuç olarak açık hava uygulamalarında su altı patlatma performanslara göre daha uygun olduğu belirlenmiştir. Saf patlayıcıların silindir genleşme testi sonuçları Esen tarafından geliştirilen ideal olmayan detonasyon kodu DeNE ile hesaplanan sonuçlar eşleştirilmiştir. Davis ve Hill, 2001 4" ve 8" çaplı testler yapılmıştır. Testler gerçekleştirilirken silindir çapları yüksek olduğu için silindir et kalınlıkları da yüksektir. Et kalınlığından kaynaklı hataları en aza indirmek için çift taraflı ölçüm yapılmıştır. Silindir duvar hızı ölçümleri temasla elektriksel sinyal alan pin setleriyle ölçülmüştür. Silindir çaplarının performans ölçümüne etkisi de incelenmiştir. İdeal davranıştan uzaklaştıkça ve silindir çapı arttıkça Gurney hızının düştüğü tespit edilmiştir. Ancak alüminyum katkılı patlayıcılarda silindir çapı arttıkça detonasyon hızı artmasına rağmen Gurney hızının azaldığı tespit edilmiştir. Alüminyum katkılı patlayıcılar için bu etki daha büyük ve daha küçük tane boyutlu alüminyumlar için aynı olduğundan tane boyutunun silindir çapı etkisini değiştirmemiştir. Daha küçük tane boyutlu alüminyum kullanılan patlayıcılarda detonasyon hızı daha yüksek bulunmuştur. Ancak, alüminyum katkılı patlayıcılarda ideal davranış göstermediğinden Gurney enerjisinin silindir çapıyla birlikte artması beklenir. Bu nedenle testlerin tekrar edilerek incelenmesi gerektiği önerilmiştir. Bununla birlikte çalışmalarda silindir testi ve su altı patlatma testleri kullanılmıştır. Buna göre dış ortamda kaya patlatmak için gerekli performans ölçümü açısından silindir testinin daha uygun olduğu görülmüştür. Çalışmanın bir başka aşamasında saf emülsiyon ve alüminyum katkılı emülsiyon patlayıcısının Gurney enerjileri karşılaştırılmıştır. Verilere göre alüminyum katkılı patlayıcının enerjisi, saf patlayıcıya göre yaklaşık 2 μs sonra ayrışarak daha yüksek değere ulaşmıştır [6].

Zhou ve arkadaşları, alüminyum katkılı patlayıcıların zamana bağlı JWL hal denkleminin parametrelerini bulmak için silindir genleşme ve su altı patlatma test yöntemini çalışmışlardır. Silindir genleşme testini ideal davranış gösteren patlayıcıların hal denklemi JWL parametrelerini elde etmişlerdir. Silindir genleşme testi ile zamana bağlı yanma oranının bulunması parametrelerini ise su altı patlatma testlerinden elde edilen enerji çıkış hızıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Silindir genleşme testinde Ø25 mm iç çapa ve 2,5 mm et kalınlığına sahip 305 mm uzunluğunda OFHC bakır boru kullanılmıştır. Silindir içerisine HMX, alüminyum, amonyum perklorat ve wax malzemesinden oluşmaktadır. Ancak malzeme oranları belirtilmemiştir. Silindir genleşme testi sonucunda elde edilen verileri 17 µs süreyle kaydederek duvar hızından JWL parametrelerini belirlemişlerdir. Zamana bağlı JWL denkleminin yanma oranını su altı testlerinde belirlemişlerdir. Bu testte suyun 6 m altında, patlayıcıya 4, 5, 6 ve 7 m yatay mesafelerde yerleştirilen basınç sensörlerinden alınan verilerle şok dalgasının basınçları kaydedilmiştir. Silindir testlerinden elde edilen JWL parametreleri için 2D-Autodyna hidrokodu kullanılarak hazırlanan su altı patlatma modelinde zamana bağlı yanma oranı denkleminin parametreleri deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir [27].

Manner ve arkadaşları, ideal olmayan patlayıcı karışımlarına alüminyum katkısının etkisini silindir testi ve plaka testi ile incelemiştir. Testlerde kullanılan patlayıcıda kütleli olarak %15 alüminyum katkısı içerirken patlayıcının yüksek enerjik malzemesi HMX'tir. Alüminyumun ortalama tane boyutu 3,2 µm olarak belirtilmiştir. Üretilen patlayıcı ile silindir testi ve plaka hızlandırma testleri yapılmıştır. Silindir genleşme testi standart yöntemle yapılarak silindir duvar hızı ölçülürken plaka hızlandırma testinde patlayıcı bir şahit plakadan belirli mesafelere yerleştirilerek infilak ettirilmiştir. Bu şekilde plakaya detonasyon dalgası çarpmamakta ve genleşen gazlar doğrudan temas etmemektedir. Bu şekilde patlayıcının genleşme enerjisi değil yakın havada ilerleyen basınç (İng. blast) etkisi incelenmiştir. Bu testler aynı patlayıcının alüminyum yerine kütleli olarak %15 LiF ve %7,5 Al + %7,5 LiF ile üretilerek tekrarlanmıştır. Silindir genleşme testinde standart ölçülerden farklı olarak 12,7 mm çapında ve 127 mm boyunda ısıtılmış bakır silindir kullanılmıştır. Detonasyondan itibaren 100 µs mertebesinde metal hızlanması incelenirken yakın hava basıncı etkisinde, 2 ms süreye kadar plaka hızı ölçümü alınmıştır. Böylece alüminyumun hızlandırma etkisi 2 ms süreyle incelenmiştir. Yakın hava basınç etki testi sırasında 58 mm çapındaki patlayıcı kullanılarak 152 mm ve 254 mm mesafelere çelik plaka yerleştirilmiştir. İnfilak sonrasında havada oluşan basınç plakalara çarparak

hızlandırırken plakanın arkasına yerleştirilen PDV sistemiyle plaka hızı ölçülmüştür. Silindir testleri sonucunda alüminyum ve LiF katkılı patlayıcıların zamana göre silindir duvar hızının ve plaka hızının değişimi karşılaştırılmıştır. Silindir duvar hızlarının 1 μ s zamana kadar birlikte hareket ettiği, sonrasında alüminyum katkılı patlayıcı ile ölçülen plaka hızının LiF katkılı patlayıcı ile ölçülen plaka hızına oranının, 2 μ s zamanda %13, 20 μ s zaman sonunda %20 olduğu görülmüştür. Açık alandaki plaka hız testinde plaka hızlandırma etkisi incelenmeye devam edilmiştir. 152 mm mesafede %22 olan hız oranı, 254 mm mesafede %31 oranına çıktığı görülmüştür. Açık alandaki basınç ölçümleri karşılaştırıldığında ise alüminyum katkılı patlayıcıdan elde edilen basıncın, LiF katkılı patlayıcıdan elde edilen basınca oranı %38 olarak bulunmuştur. Buna göre alüminyum katkılı patlayıcıların genleşme enerjisine katkısı 2-200 μ s zaman aralığında artarak devam ederken sonrasında artış oranının azalmasına rağmen 2 ms zamana kadar etkisini gösterdiği gözlenmiştir [28].

2.4. Hız Ölçüm Çalışmaları

Holtkamp ve arkadaşları, 2004 yılında yaptıkları bir araştırmada yüksek enerjili patlayıcıların patlaması sonucunda metal üzerinden yayılan Taylor dalgalarının serbest yüzeyden hava veya vakum boşluğuna yayılırken metal içerisinde parçalanma ve kırılmaların olduğunu düşünmüştür. Bu durum yüksek şok basıncıyla karşılaşan metallerdeki erimeye başlamanın bir sonucu olduğunu belirtmiştir. Erimeye başlayan malzemelerin akma mukavemeti de düşmektedir. Bunu kanıtlamak için farklı kalınlıktaki tantalum, bakır, 6061 T6-alüminyum ve kalay gibi metallerin için parçalanma ve kırılma mukavemetleri proton radyografisi (PRad) ve VISAR cihazlarıyla ölçüm yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm testlerde 50 mm çapında ve 12,5 mm yüksekliğinde PBX 9501 patlayıcısı kullanılmıştır. Radyografi sonuçlarına göre şok basıncının etkisi ile metalin tipi ve kalınlıklarına göre parçalanma katmanları oluşurken Taylor dalgaları sıvı malzemenin serbest yüzeyden yansıdığı anda sıvı içerisindeki hız dağılımı kavitasyona neden olduğu ifade edilmektedir. Bu kavitasyonun yoğunlukta dalgalanmalara yol açtığını, kavitasyon olmayan bölgelerin üzerindeki yoğunluğun çok daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Buna rağmen VISAR cihazında görüntü alabilmiş, kalın malzemelerde şok yansımaları ve yoğunluk dalgalanmaları daha uzun sürerken ince malzemelerde daha kısa sürmüştür [29].

Jensen ve arkadaşları, PDV cihazının hız ölçüm hassasiyetini doğrulamak için elektriksel teller kullanarak elde ettiği hız verilerini karşılaştırmıştır. Ayrıca hızlandırılmış plakaların hız geçmişini PDV cihazı ve VISAR cihazı ile aynı anda ölçüm yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. İlk testte PDV ve elektriksel tellerin hız ölçüm sonuçları karşılaştırılmış, elde edilen hız farkları cihazların ölçüm belirsizliklerinin altında bir değer olan %0,1 oranında bulunmuştur. Böylece PDV cihazı ile elde edilen hız verilerini güvenilir kabul etmiştir. İkinci testte PDV cihazı ile hızlandırılmış plakanın hız geçmişi ölçülmüştür. Testte PDV fiber optik ışık lazer başlıkları, çıplak fiber lazer başlıkları, kolimatör takılmış fiber lazer başlığı ve odaklama lazer başlığı ile olmak üzere üç farklı şekilde ölçüm yapılmıştır. Çıplak lazer başlıkları 4° açı ile yerleştirilerek yerdeğiştirmemiş ışının PDV lazer başlıklarına geri yansıması sağlanmıştır. Odaklama uzaklığı 21 mm ve 48 mm olan odaklayıcı probe'lar kullanılmıştır. Odaklayıcı proble lar geri yansıyan ışının çok düşük seviyede olmasını sağlamaktadır. PDV ile elde edilen bu veriler VISAR cihazlarıyla 532 nm dalga boylu ışın kullanılarak doğrulamaya çalışmıştır. Hızlandırılan plakanın hızını temsil etmesi için simetrik LiF plakanın her iki yüzeyine de ışığı yansıtması için alüminyum plaka koyularak ölçüm alınmıştır. Testler sonucunda VISAR ve PDV ile elde edilen verilerin örtüştüğü gözlenmiştir. Ancak PDV cihazı düşük hız değişikliklerini hızlı şekilde STFT (short time fourier transform) tekniğiyle çözmenin zorluğundan bahsetmiştir [30].

Stevens ve arkadaşları, kalay malzemeden yapılmış bir plakanın şok etkisiyle katı-sıvı faz değişimini karakterize ederek serbest yüzeydeki optik dağılımı PDV cihazıyla belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için yüksek basınçla karşılaşan malzemenin faz değişimi sırasında fazların ayırt edici özelliklerine odaklanılmıştır. Faz değişiminin sonucu olan yansıtıcılık özelliğinin değişiminden yola çıkılmış ve testlerde faz değişimine daha kolay uğraması nedeniyle kalay kullanmışlardır. İlk testte 12,7 mm çapında ve 12,7 mm kalınlığında PBX-9501 patlayıcısı ile 25 mm çapında ve 1,5-7,5 mm kalınlıklarında kalay plaka kullanarak testler yapmıştır. İlk testte plakaya 28-30 GPa basınç ulaşmış ve malzemenin %50'den fazlası erimiştir. Plakaya gelen şok dalgası malzeme içinde ilerlerken stres giderek azalır. Bu nedenle sonraki testlerde plaka kalınlığı artırılarak enerjisi daha düşük patlayıcı kullanılmıştır. Şok dalgası plakaya geldiği andan 11 μ s ve 12 μ s sonra 2 adet flaş x-ray görüntüsü alınmıştır. Bu görüntülerden erimeye bağlı yoğunluk değişimi gözlenmiştir. Sonraki testte plakaların yüzeyleri aynasallaştırılarak ışık kaynağı ile aydınlatılmıştır. Erime noktasının altında yoğunluk farkı olmayacağından erime sonrasında yüzeylerden yansıyan ışındaki değişim yüksek hızlı kamera ile görüntülenmiştir. Buna bağlı olarak

erimenin ilk başladığı plaka ortasında oluşan konik kısmın yansıtıcılığı ve sonrasında oluşan kenar kısımdaki yansıtıcılık görüntülenmiştir. Plakanın kenar kısmının ölçülen hızı, PDV cihazı ölçümüyle örtüştüğü gözlenmiştir. Optik deneylerde şok basıncına uğramış plakanın erime karakteristiğini görmek için erime öncesinde 100 ns aralıklarla kamera ölçümü alınmış ve aynalı yüzeydeki yansıtıcılığı görmek için flaş ışığı kullanılmıştır. Erime noktası üzerinde ise verilen flaş ışığının yansımadağının görüleceği varsayılmıştır. İlk andaki görüntüde plakanın orta kısmında yansıma olurken erime noktasının üzerindeki resimde yüzeydeki yansımanın bozulduğu görülmüştür. Optik dağılımı test etmek için 532 nm dalga boylu lazer ışını Fresnel lensi üzerinden plakaya düşürülerek yüksek hızlı kamera ile yansıtıcılık gözlenmiştir. Buna göre erime sonrası oluşan ışıma dağılmış ve yansıtıcılığın azaldığı belirlenmiştir. Aynı testler streak kamera ile görüntülenerek erimenin oluşum hızı belirlenmiştir. Sonraki testlerde PDV cihazının farklı açılarda plaka yüzeyinden aldığı hız ölçümü karşılaştırılmıştır. Buna göre PDV optik probe'larının 0° , 30° ve 60° açılarda konumlandırılarak alınan hız ölçümleri karşılaştırılmıştır [31].

Kuznetsov ve Bennets, patlayıcı araştırmalarını yapmak için PDV sistemi ile plaka hızlandırma test kurgusu oluşturmaya çalışmışlardır. Amaçları 15 g ila 60 g arasında değişen patlayıcı miktarıyla 1-4 mm arasındaki uzaklıktaki hedef için ölçümler yapılmıştır. Bunun için 100 mW gücünde ve 1550 nm dalga boyunda sürekli infrared ışık üretebilen lazer sistemi ile Tektronix DPO7254 model osiloskop kullanmışlardır. Osiloskop veri alma frekansı 20 GS/s ve bant genişliği ise 2,5 GHz'dir. 5 mm kalınlığında ve $\varnothing 30$ mm çapında çelik plakayı hızlandırmak için PE4 tipi patlayıcı kullanılmıştır. PDV optik fiber probe'larının hedeften 8 mm ve üstünde yerleştirildiği uzaklıklarda veri alınamadığı görülmüştür. 4 mm uzaklığa yerleştirildiğinde alınan veri sinyalleri kötü olmasına rağmen ölçülebilir düzeyde olmuştur. Yerleştirilen plakanın ayna benzeri parlaklıktan uzak ve oldukça kaba yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Yüzeyden alınan verinin 40 ns'lik bir bölümü için FFT (Fast Fourier Transform) tekniği uygulanmıştır ve alınan veri hassasiyeti 7 ns olmuştur. Elde edilen grafiklerde birden fazla eğri elde edilmiş, en belirgin olan eğri esas ölçüme konu verilerdir. Diğer eğriler ise harmonik yansımalarlardır. Eğer lazer gücü 100 mW değerinden 2 W seviyesine çıkarılabilirse teorik olarak 18 mm'de ölçüm alınabilir. PDV ölçüm kabiliyeti aynı zamanda optik lazer başlığının ışığı toplama kapasitesine de bağlıdır. Bu kapasite hedef plakanın eğimi arttıkça azalır. Eğer plaka eğimi 10° veya daha fazla ise alınan sinyal ölçülemeyecek kadar azaldığı belirtilmiştir [32].

Grant ve arkadaşı, 2019 yılında yaptığı bir araştırmada malzemelerin şok deneylerini yapan ölçüm cihazları için gerekli şartları sağlamaya çalışmıştır. Şok deneylerinin ölçümleri en iyi optik cihazlarla yapılabildiği için numuneye şok gelmesi sonrasında malzemede hassas ölçüm şartlarını etkileyen değişiklikleri gözlenmiştir. Oluşan değişiklikleri gözlemek için hızlı kamera kullanmış ve hızları da PDV veya VISAR cihazlarıyla ölçmüştür. Şok malzemeye ulaştığında yüzeydeki erime numuneden yansıyan lazer ışınını dağıttığı için cihaz tarafından alınan sinyalin yaklaşık 500ns sonra çoğunun kaybolduğunu gözlemiştir. Bu kaybı azaltmak için numune arkasına LiF koyarak serbest yüzeyden hava ortamına şok dalgasının yayılmasını önlemeye çalışmıştır. Numune üzerine gelen şok dalgası serbest yüzeyden yansıyarak malzeme içinde gerilme stresi oluşturur. İçerde oluşan bu gerilmelerin mukavemeti eğer malzeme mukavemetinden yüksek ise malzeme içinde bir veya daha fazla katmanda parçalanmalar oluşur. Numune arkasına koyulan polimer malzeme empedansı plaka empedansına yakın olduğu için şok basıncı serbest yüzeyden geri yansımaz veya daha az yansır. Bu şekilde plakanın parçalanması veya yüzeydeki erime azaltılarak sinyal kaybı da azaltılmıştır. Diğer bir deneyde şok basıncı azaltılarak yüzeydeki erime miktarı azaltılmıştır. Düşük şok basıncı yansıma yüzeyinden alınan sinyalin artmasına olanak sağlamıştır. Şok deneylerinde kullanılan optik cihazlardan hassas şekilde sonuç alınabilmesi için ya veri alınan cihazın deney şartlarına uygun olması ya da deney şartlarının ölçüm sonuçlarını etkilemeyecek şekilde önlem alınması gerektiğini göstermiştir [33].

Dolan, yaptığı çalışmada PDV cihazının gelişimi ve VISAR cihazına karşı avantajlarını konu almıştır. Buna göre PDV temel olarak Michelson İnterferometresine dayanmakta olduğundan ve şok fiziği çalışmalarında kullanılan VISAR cihazının ölçüm yapabilmesi için ayna gibi parlak bir yüzeye sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Bu durum yüksek basınçta şok ile karşılaşması sonucunda deformasyonlar meydana getirerek veri alınan yüzeyin bozulmasına neden olur. Bununla birlikte bu yüzyıla kadar km/s mertebesinde hız ölçebilmek için GHz frekansının bulunmadığı ifade edilmiştir. VISAR cihazlarında 532 nm ve 1550 nm dalga boylarında ışın kullanılabilir. 1550 nm dalga boyu frekansın düşük olması nedeniyle daha iyi bir ölçüm sağlarken ışının görülememesi ve hız çözünürlüğünü düşürmesi nedeniyle dezavantajlı olduğunu, ancak bu dezavantajlar göz ardı edilebilecek düzeyde olduğunu ifade etmiştir [34].

Strand ve arkadaşları, VISAR cihazını ve Fabry-Perot prensibine dayanan kurgu ile yapılan heterodyne hız ölçüm cihazlarını karşılaştırmak için şok hızını ölçtüğü bazı testlerde kullanmıştır. Bu testlerden biri olan metal plaka hızlandırma testinde VISAR cihazını ve elde edilen verileri elektriksel sinyallere dönüştüren osiloskop kullanmıştır. Bu test için hız ölçüm hassasiyeti yüksek olması nedeniyle düşük frekans 1550 nm dalga boyunda lazer ışını kullanmıştır. Çok düşük zaman aralıklarında veri almak için 8 GHz bant aralığında frekans ölçebilen ve 20 GS/s veri alma kapasitesine sahip osiloskop ile 40 μ s süresince veri alınmıştır. Kullandığı sistem ve cihazlar maksimum 5000 m/s hız ölçüm kapasitesine sahiptir. Hedef yüzeyinden yansıyan ışını toplamak için 6 mm çapında ve 97 mm odak uzaklığına sahip kolimatör lens, yüzeyden 102 mm uzaklığa yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Kolimatör lensin yüzeyden uzaklığının odak uzaklığından fazla olmasının nedeni daha yüksek hassasiyette daha uzun mesafe için veri alınmasının istenmesidir. Osiloskopun dikey hassasiyeti 100 mV'tur. Lazer gücü 1 W'tır. Patlayıcının patlatılması sonucu ilk şok dalgası 9 μ s sonra plakaya ulaşmıştır. Plaka hızlanmaya başladığında elde edilen elektriksel voltaj değeri gürültü seviyesinden biraz fazladır. Buna rağmen 1024 adet veri noktası bu seviyeden itibaren alınarak Fourier transform çerçevesinde işlenmiş ve zamana bağlı hız grafiği elde edilmiştir. Alınan elektriksel sinyaller belirli bir aralık için çok yüksek genlik göstermesine rağmen cihazların düşük frekans kesme filtresinden geçirilmesi nedeniyle veri kaybının oluşması önlenmiştir [35].

Yu ve arkadaşları, detonator geliştirme çalışmaları kapsamında detonator içerisinde bulunan patlayıcı için şok basıncına karşı duyarlılığını ölçmek için testler yapmıştır. Bunun için farklı şok basınçlarının patlayıcı üzerine uygulanması sonucu etkilerini araştırmıştır. Yüksek şok basınçlarının seviyelerini ölçmek için SS304 malzemeden çok ince folyolar kullanmıştır. Yeterince ince folyolar için empedans eşleştirme tekniğiyle iletilen basınçtaki düşüşü azaltmıştır. Kullanılan folyolardaki partikül hızını ölçmek için VISAR cihazını kullanmıştır. VISAR ayna benzeri yansıtıcı bir yüzeyden hız ölçümü alabilmektedir. VISAR ışınının görülebildiği noktasal boyu ise 0,1-1 mm aralığındadır. Uçan parçada görüntülenmeye çalışılan nokta ışın noktasından daha küçük ise ölçümü zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte yüksek şok basıncı ince folyoya ulaştığında yüzeyde eğilme, bükülme ve bölgesel bozunmalar meydana gelir. Veri kaybını önlemek ve daha hassas bir şekilde uzun mesafe boyunca hız ölçümü alabilmek için VISAR optik konfigürasyonunda bir takım değişiklikler yapılmıştır. Tek basına ışın toplama özelliğine sahip içerisinde asferik lens bulunan kolimatör, yansıyan ışını daha geniş aralıkta toplayıp genişleten ve odak uzaklığı

yüksek olan lens ile birlikte kullanılmıştır. Böylece veri toplamadaki hatalar azaltılarak hız verileri toplanabilmiştir [36].

Menikoff ve arkadaşları, silindir genleşme testinde silindir duvarının hız ölçümü için PDV ve streak kamera ölçümlerini karşılaştırmış ve bu iki ölçüm arasındaki farkları incelemişlerdir [37]. İki yöntem ile elde edilen hızların zaman geçmişleri aynı olsa da PDV ölçümünde şok dalgasının bakır silindir duvarına iletimi sırasında salınımlar meydana gelmiştir. Ancak bu salınımlar streak kamerada görülmemiş olup daha düzgün bir eğri olarak gösterilir.

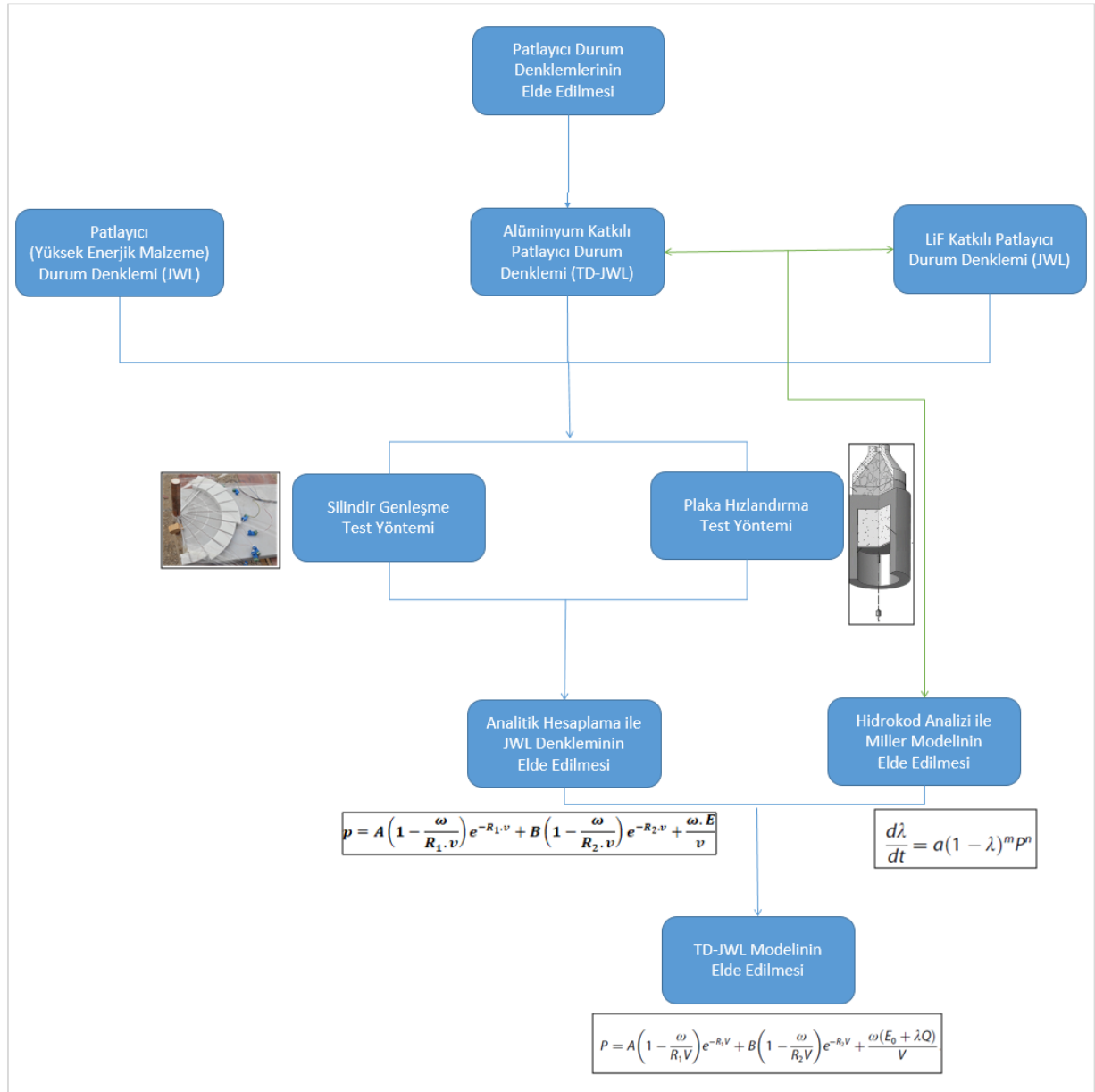
2.5. Literatür Özeti ve Tez Konusuyla İlişkisi

Literatür çalışmalarında JWL hal denklemi parametrelerinin elde edilmesi için yapılan test çalışmaları ve test düzenekleri incelenmiştir. Literatürde genellikle plaka hızlandırma test düzenekleri namlu içinde ve namlu olmadan gerçekleştirilmiştir. Hız ölçüm sistemi olarak ise genellikle PDV cihazı ile birlikte nadiren VISAR cihazının kullanıldığı görülmüştür. Test düzeneğinin çalışması için oldukça az miktarda patlayıcıyla çalışması ve test maliyetlerinin düşük olması nedeniyle tez çalışması kapsamında çalışılan düzeneklerden biri olmuştur. Literatür araştırması sırasında incelenen plaka hızlandırma test düzeneklerinde patlayıcıyı ateşlemek için düzlemsel dalga şekillendirici (İng. plane wave lens) kullanıldığı görülmüştür. Plaka hızlandırma test düzeneğinde deneme testleri sonucunda bu yapının kullanılması gerektiği anlaşılarak özgün tasarım yapılmış ve sisteme uygulanmıştır. Plaka hızlandırma testleri, ideal davranış gösteren patlayıcılar için JWL hal denkleminin parametrelerini elde etmekle birlikte çoğunlukla alüminyumlu patlayıcıların TD-JWL hal denkleminin parametrelerini belirlemek için de kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanarak alüminyum katkılı patlayıcılarla yapılan test, alüminyum yerine aynı kütleli oranda LiF katkısı ile yapılmıştır. LiF literatür çalışmalarında inert kabul edilerek detonasyon ürünleriyle reaksiyona girmediği varsayımı yapılmıştır. Bunun yanı sıra patlayıcı içindeki LiF, alüminyum fiziksel olarak temsil ettiği ve detonasyon yapısını koruduğu düşünülmüştür. Bu şekilde iki farklı patlayıcıyla tekrarlanan testler sonucunda plaka hız sonuçlarının farkından yararlanarak alüminyumun, detonasyon sonrasında oluşan genleşme enerjisine katkısı hesaplanmıştır. Bu yöntem için tez çalışması içerisinde ikili karşılaştırma testi olarak adlandırılmıştır.

Literatürde kullanılan bir diğer yöntem geleneksel silindir genleşme yöntemidir. Birçok patlayıcı için denenen ve analitik çalışmalar sonucunda elde edilen JWL denkleminin parametreleri sayısal paket programları kullanılarak doğrulandığı anlaşılmıştır. Literatürde incelenen silindir genleşme testlerinde genellikle ideal davranış gösteren patlayıcılarla birlikte çok sık olmasa da alüminyum katkılı patlayıcılarla da çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda alüminyumun kütsel oranına bağılı olarak geniş çaplı silindirler kullanılmıştır. Hem silindirlerin geniş olması nedeniyle yüksek miktarda patlayıcı kullanılması, hem de düzenekte kullanılan diğer malzemelerin üretimi nedeniyle test maliyetlerinin arttığı ve yavaş bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir. Amacımız düşük maliyetli, yüksek doğruluğa sahip ve daha pratik bir yöntemle alüminyum katkılı patlayıcıların detonasyonu sonrası TD-JWL hal denklemini belirlemektir. Silindir genleşme test düzeneğiyle yapılan çok sayıda çalışma olmasına rağmen plaka hızlandırma testlerinde uygulanan alüminyum ve LiF katkılı patlayıcıların ikili testlerinin, silindir genleşme test yöntemi ile yapıldığına rastlanılmamıştır. Test maliyetleri arttırılmadan düzeneğin kurulması için alüminyum kütsel oranı belirli bir seviyede tutulmuş, düzenekte kullanılan aparatlar ise basit ve ihtiyaca hızlı cevap verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan aparatların hızlı şekilde üretilmesi için 3-boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Literatürdeki silindir genleşme çalışmalarında hız ölçüm sistemi olarak PDV cihazı, iyonizasyon pinleri, streak kamera gibi sistemler kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında kurulan silindir genleşme testinin düzeneğinde bunların yerine hız ölçüm sistemi olarak izoleli bakır teller kullanılmıştır. Silindir genleşme testinde alüminyum ve LiF katkılı patlayıcılarla ikili test yaparak TD-JWL denkleminin parametrelerinin belirlenmesi için yöntem uygulanmıştır. Tez çalışması, ilk defa hız ölçümünde izoleli bakır tellerin kullanılması ve alüminyumla birlikte LiF malzemesi kullanılarak ikili test yönteminin uygulanması açısından literatüre katkı sunmaktadır. Kullanılan malzeme ve pratik uygulama yönüyle daha önce yapılan çalışmalardan daha basit ancak daha etkili çözüm sunulmuştur.

3. DENEY DÜZENEKLERİ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Bu bölümde tez çalışmasında kurulan test düzenekleri anlatılarak düzenekler içerisinde yer alan bileşenlerin seçimi ve tasarımı açıklanmıştır. Analitik hesaplama tekniklerindeki ayrımlar incelenerek izlenecek yol belirlenmiştir. Literatür çalışmaları ışığında deney düzenekleri ve JWL denklemlerinin elde edilmesi için takip edilen yöntemin şeması aşağıda Şekil 3.1 ile verilmiştir.



Şekil 3.1. JWL Denkleminin elde edilmesi için deney düzenekleri ve TD-JWL denklemlerinin elde edilme yönteminin şeması

Buna göre silindir genleşme ve plaka hızlandırma testleri olarak iki farklı yöntem için test düzeneği kurulmuştur. Testler sonucunda alınan deneysel verilerin analitik hesaplama tekniğiyle hesaplanacağı açıklanmıştır. Şekil 3.1 ile verilen şematik gösterimde, tez çalışmasında izlenen yol gösterilmiştir. Bu yöntem ve uygulamalarla veriler elde edilmeye çalışılarak durum denklemi parametreleri hesaplanmıştır.

Deney düzenekleri temel olarak patlayıcı, ateşleme sistemi, hız ölçüm sistemi ve ana bileşenden oluşur. En önemli bileşen, detonasyonu sonrası hal denklemi parametrelerinin hesaplanacağı patlayıcıdır. Patlayıcının hazırlanması ve üretim şekli ölçüm sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Sistemdeki diğer bileşenlerin tasarımı patlayıcı numunesinin özelliklerine uygun şekilde yapılmıştır. Patlayıcının boyutları ateşleme sisteminin yapısal olarak farklı yol izlemesi gerekebilir. Ayrıca patlayıcının enerji çıkış hızı ve beklenen parçacık hızına göre hız ölçüm şekli belirlenmiştir. Hız ölçüm sisteminin özellikleri; beklenen hızın mertebesi, parçacığın hız profili ve ölçüm alma hassasiyetine göre ayarlanmıştır. Düzeneklerdeki yardımcı diğer ana test kalemi bileşenleri patlayıcı ve hız ölçüm sisteminin yerleşimine uygun olarak malzeme seçimi ve boyutlandırması SPEED hidrokodunda yapılan 2-boyutlu çözümleme verileri değerlendirilerek belirlenmiştir.

3.1. Testlerde Kullanılacak Patlayıcı Özellikleri

Testlerde kullanılacak patlayıcı içerisinde yüksek enerjik malzeme, alüminyum ve plastik bağlayıcı malzeme kullanılmaktadır. Alüminyumlu patlayıcılarda reaksiyon mekanizması karmaşıktır ve alüminyum, yüksek enerjik malzemenin detonasyon ürünleri ile reaksiyona girmektedir. Yüksek enerjik malzemenin detonasyon hızı, alüminyumun detonasyon ürünleriyle reaksiyonu öncesinde alüminyum partiküllerinin aktifleşme zamanını etkileyebilir. Bu nedenle literatür çalışmalarından faydalanılarak yüksek enerjik malzeme için RDX seçilmiştir. RDX tipi ve üretim tekniği de detonasyon hızı ve reaksiyon sonucuna etki edebilecektir.

Alüminyumun zamana bağlı reaksiyon derecesini etkileyen en önemli etkenlerden biri partikül boyutlarıdır. Alüminyum reaksiyona girmeden önce dışarıdan enerji alarak gazlaşmaya başlar ve reaksiyon gaz fazındayken oluşur. Bu yüzden gazlaşma hızı reaksiyonun başlaması için kritik bir öneme sahiptir. Patlayıcı üretiminde kullanılan

alüminyum küresel şekilde üretilir. Literatür çalışmalarında yanma derecelerinin farklı olduğunu göstermek için genel olarak 50 nm, 5 µm ve 50 µm ortalama alüminyum tane boyutları kullanılmıştır [38-40]. Ortalama boyutlar alüminyum partiküllerinin belirli bir aralıktaki boyut dizisinin istatistik ortalamasını ifade eder. Bu açıdan küresel alüminyum partikülleri detonasyon ürünleriyle reaksiyona girerken farklı zamanlarda aktifleşebilecektir. Ancak ortalama partikül boyutları, nanometre seviyelerine inildikçe reaktivlik arttığından üretimi ve kullanımı tehlikeli olmaktadır. Ayrıca bu boyuttaki partiküller patlayıcı üretiminde de çok fazla kullanılmamaktadır. Bu nedenle test patlayıcılarının küresel alüminyum tane boyutu 8-10 µm olarak belirlenmiştir. Bu ortalama boyutlar patlayıcı üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum saflık derecesi %99 değerinin üzerindedir.

Alüminyumlu patlayıcının detonasyonu sonrasında alüminyumun reaksiyonu sonucu oluşan enerji farkının bulunabilmesi için aynı kütleli oranda LiF katkısı kullanılmıştır. LiF malzemesinin fiziksel özelliklerinin alüminyuma benzemesi ve ancak alüminyum gibi reaktif olmaması nedeniyle tercih edilmektedir. Patlayıcı katkısı olarak kullanılan LiF ortalama partikül boyutu <60 µm'dir. LiF saflık derecesi ise %99,98 değerinin üzerindedir. LiF kimyasal yapısı itibarıyla renksiz, katı bir inorganik bileşiktir. Mikro kristalli yapıda toz olarak üretilebilir. Geniş bant aralığı sayesinde kristalleri, kısa ultraviyole radyasyon dalgaboyuna karşı diğer tüm maddelerden daha geçirgendir ve özel ultraviyole optiği uygulamalarında kullanılmaktadır [41]. Tez çalışması kapsamında LiF, patlayıcı üretimine uygun şartlar için satın alınarak üretimde kullanılmıştır.

Testlerde kullanılacak patlayıcının seçimi için yaygın kullanılan patlayıcılar seçilmiştir. Böylece literatürde açık kaynak parametreleri ile karşılaştırılarak kurulan deney düzeneği doğrulanabilmektedir. Savunma sanayiinde alüminyum katkılı ve alüminyum katkılı olmayan belirli patlayıcılar kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları PBXN109, PBXN110, PBXN111, PBXN113 gibi konvansiyonel patlayıcılardır. Patlayıcılar içerisinde kullanılan alüminyum, RDX gibi önemli reaktif bileşenlerin fiziksel özellikleri ve üretim teknikleri belirli askeri standartlarla ifade edilir. Tez çalışmasında kullanılacak patlayıcıların içeriği ve kütleli oranı bakımından literatürdeki patlayıcılara benzemekte ve malzeme oranları %1-2 oranında değişebilmektedir. Çalışmanın sonraki bölümlerinde PBXN109 benzeri patlayıcılar S109 ve PBXN110 benzeri patlayıcılar S110 olarak adlandırılacaktır. PBXN109 içerisinde bulunan bileşenlerin özellikleri MIL-E-82886 standardında verilmiştir [42].

Patlayıcı içerisinde kullanılan RDX özellikleri MIL-R-398C_INT_AMENDMENT-6 standardında verilmiştir [43]. Katkı olarak kullanılan alüminyum bileşeninin özellikleri ise MIL-PRF_23950B(AS)w/AMENDMENT 1 standardında verilmiştir [44]. Bu standarda göre PBXN109 üretiminde kullanılan ortalama RDX oranı %64 ve alüminyum oranı ise %20 seviyesindedir. Ancak bu değerler üretim şartlarına ve malzemenin üretim özelliklerine göre değişiklik gösterebilir.

Tez çalışmasında literatürde çoğunlukla çalışılan PBXN109 ve PBXN110 standart patlayıcı benzeri patlayıcılar kullanılmıştır. Bu nedenle elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılabilecektir.

3.2. Testlerde Kullanılacak Ateşleme Sistemi

Namlu içerisindeki patlayıcıyı ateşlemek için farklı yapıda sistemler kullanılmıştır. Ateşleme sistemlerinin içerisinde daha yüksek basınç üretebilen ve kolayca ateşlenebilir duyarlı patlayıcılar kullanılmaktadır. Bu patlayıcılara yemleme şarjı denilir ve elektrikli detonatorler ile ateşlenebilmektedir. Patlayıcı özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılacak bir ölçüm için kararlı detonasyon yapısının oluşması gerekmektedir. Bu nedenle ateşleme sisteminde kullanılacak yemleme şarjının şekil ve boyutları, sistemdeki patlayıcının boy/çap oranına ve ölçüm yapılacak noktanın ateşleme sistemine olan uzaklığına göre değişebilmektedir. Ateşleme sistemlerinde genellikle koni ve silindirik şekilli yemleme şarjları kullanılmaktadır. Eğer ateşlenecek patlayıcı kararlı detonasyon yapısına ulaşması için patlayıcının boy/çap oranı yeterince büyükse üretim kolaylığı açısından silindirik yemleme şarjının bulunduğu ateşleme sistemi basit olması bakımından tercih edilmektedir. Daha hızlı kararlı detonasyon elde edebilmek için kademeli silindirik yemleme şarjı veya konik şekilli yemleme şarjları kullanılmaktadır. Sistemdeki yemleme şarjı detonatör tarafından ateşlenerek zincir başlatılmaktadır. Patlayıcıyı infilak ettirmek için belirli bir gerilim ile ateşlenebilen standart tip detonatör kullanılmaktadır.

3.3. Hız Ölçüm Teknikleri

Detonasyon reaksiyonu sonucu genişleyen gazların kinetik enerjisi içinde bulunduğu gövdenin duvarlarına aktarılır. Bir patlayıcının genişleme enerjisini bulabilmek için detonasyon ürünlerinin genişirken hızlandığı parçacıktan yararlanılmaktadır. Parçacığın hızı ve

fiziksel özellikleri kullanılarak detonasyon ürünü gazların genleşme enerjilerine ulaşabilmektedir. Patlayıcının detonasyonu sonucunda onunla temasta bulunan parçacığın hızlanma sırasında ölçümünü yapabilmek için parçacığın şok dalgasının yüksek basınç ve sıcaklığına dayanarak belirli fiziksel koşulları sağlayabilmesi gerekmektedir. Test çalışmalarında bu koşullara uygun olarak metaller kullanılmaktadır. Hızlandırılan metal parçacıkların hızı, üzerine etkiyen patlayıcı miktarı göz önüne alındığında metal birim kütlesine göre 1000-5000 m/s seviyelerinde olabilmektedir.

Genellikle şok dalgası deneylerinde çarpma hızı, şok hızı, stres grafiği çıkarmak ve serbest yüzey hızı ölçmek için yüksek çözünürlüklü ölçüm tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Bunlar elektriksel sinyal, yoğunluk farkı veya optik tekniklerle yapılabilmektedir.

3.3.1. İletken tel

Patlayıcı parametrelerinin bulunabilmesi için kullanılan ilk yöntemlerden biri elektriksel iletken tel kullanımıdır. Elektriksel iletkenlik, zaman çözünürlüğü 10^{-9} s mertebesinde olduğundan detonasyon sonucu hızlanan metal parçacık hız ölçümü için uygundur. Hız ölçümü için üzerine belirli bir gerilim uygulanan tellerin ucu açık devre şeklinde bırakılır. Metal çarpma anında elektrik devresi kapanarak sürekli elektriksel sinyaller üretilir ve bu sinyallerdeki değişikliklerin gerilim değerleri osiloskop veya benzeri bir veri toplama cihazı ile zamana bağlı olarak kaydedilir. Metal parçacığın çarpması sonucunda devre kapanarak veri toplama cihazında uygulanan gerilim okunur. Veri toplama sırasında ölçüm sistemindeki tüm bileşenlerin zaman çözünürlüğü parçacık hızından yüksek olmalıdır. İletken telin uçları arasındaki mesafe, tellerin kapasitansı, elektrik iletkenliği, veri toplama cihazının bant genişliği ve frekansı ölçülen hız için uygun olduğunda hassas sonuçlar alınabilmektedir [45].

3.3.2. Streak kamera

Silindir genleşme testlerinde silindir duvarı başta olmak üzere hareketli katı cisimlerinin hızını ölçmeye yarayan cihazlardan biridir. Streak kamera birim zamanda katı cismin ışık değişimini belirli aralıklarla kaydeder. Işık atışları dar bir yarıktan geçerek dedektöre yansır, böylece fotonlar dedektöre çarptığında bir sonraki gelen foton ile pozisyon farkı

oluşmuş olur. Elek ve arkadaşları JWL parametrelerini bulmak için silindir genleşme yöntemini kullanırken hız ölçüm sistemi olarak streak kamera cihazını kullanmıştır [22].

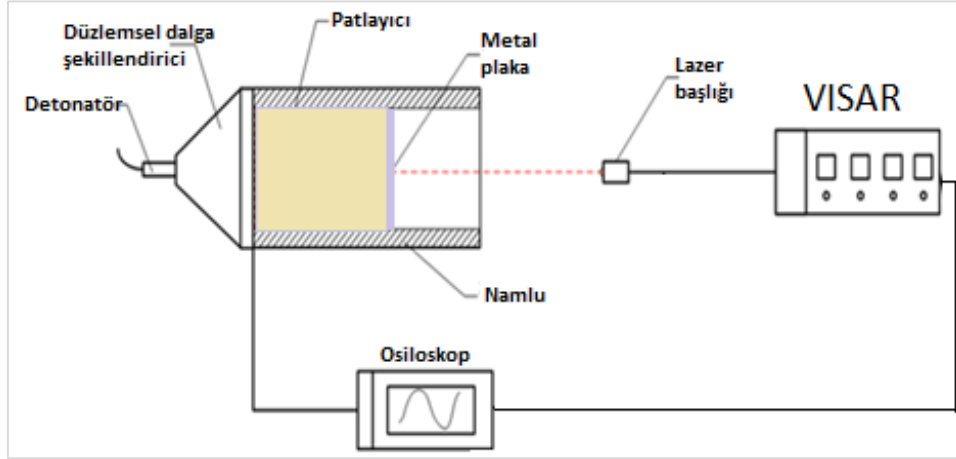
3.3.3. Interferometre

Detonasyon ürünlerinin genleşmesi sonucu metal plakanın hızı, laboratuvar düzeyinde yapılan patlama testleri için plakanın ağırlığına göre 1000-5000 m/s aralığında olmaktadır. Bu mertebedeki hızları yüksek çözünürlükte ölçmek için genellikle optik fiber interferometre kullanılmaktadır. Optik interferometreler km/s cinsinden hız birimlerini mikrosaniye mertebesinin altındaki bir çözünürlükle ölçebilirler. Temel olarak hareket eden katı cisme, iletilen ve yansıyan ışın dalgalarının oluşturduğu girişim yardımıyla ölçüm gerçekleştirilmektedir. İnterferometreler, optik fiber sensörlerin değişim tipine ve çalışma prensibine göre sınıflandırılabilir. Bu yüzden kimyasal konsantrasyon, elektrik alan, gerilme, sıcaklık, basınç veya diğer fiziksel bileşenler cinsinden tanımlanabilir. Çalışma prensibi yoğunluk, faz, polarizasyon ve dalga boyundaki değişimlere dayanır. Faz modülasyonlu optik fiber sensörler genellikle interferometrelerle ilgilidir. Çünkü ışık dalgasının optik fazı veya iki ışık dalgası arasındaki faz farkı genelde girişim ölçme teknikler vasıtasıyla tespit edilir. Bu teknikler de eşevreli (İng. coherent) ışık kaynakları kullanır ve ilgilenilen çevresel parametrenin neden olduğu faz kaymasını kesin bir şekilde tespit eder. Dört temel interferometre optik fiber sensör vardır. Bunlar Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, ve Sagnac olarak isimlendirilir [46].

3.4. Plaka Hızlandırma Test Düzeneği

Yüksek çarpma hızlarına maruz kalan malzemelerin şok dalgası yükleri altındaki davranışları şok fiziği ve uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Bunu laboratuvar şartlarında anlamak ve karakterize etmenin en uygun yollarından biri plaka çarpma testleridir. Silindir namlu içerisindeki patlayıcının infilak ettirilmesi sonucu oluşan detonasyon ürünleri genleşerek yüksek basınç ile metal plakanın hareket etmesini sağlar. Genleşme sırasında özgül hacim artarken plakaya etkiyen basınç azalır. Tüm veriler elde edildikten sonra momentum denkliği kullanılarak JWL parametreler elde edilir. Son yıllarda JWL parametrelerinin elde edilmesi ve hızlandırılan metalin şok karakteristiğinin belirlenmesi için plaka hızlandırma testi sıkça uygulanmaya başlamıştır.

Plaka hızlandırma test çalışmaları kapsamında kullanılan test düzeneği genel olarak ana test kalemi, hız ölçüm sistemi ve veri toplama cihazından veya osiloskoptan oluşmaktadır. Test düzeneğinin şeması Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Plaka hızlandırma test düzeneği şeması

Plaka hızlandırma testinde kullanılacak bileşenlerin tasarımı; ulaşılabilir olması, ucuz olması, tekrar kullanılabilir olması ve çevreye verebileceği hasarı en aza indirecek güvenlikte olması düşünülmüştür. Ayrıca ölçüm cihazlarına hassas ölçüm yapabilmesine de olanak sağlayacak nitelikte olması gerekmektedir.

3.4.1. Hız ölçüm sistemi

Plaka hızlandırma testinde plaka hızı ölçüm sistemi olarak VISAR cihazı kullanılmıştır. VISAR tarafından verilen ışın dalga boyu 1550 nm'dir. Lazer odak uzaklığı 50 mm'dir. VISAR sistemi ve kullanılan optik lens ve fiber optik kablo malzemeleri aşağıda Resim 3.1 ile gösterilmiştir.



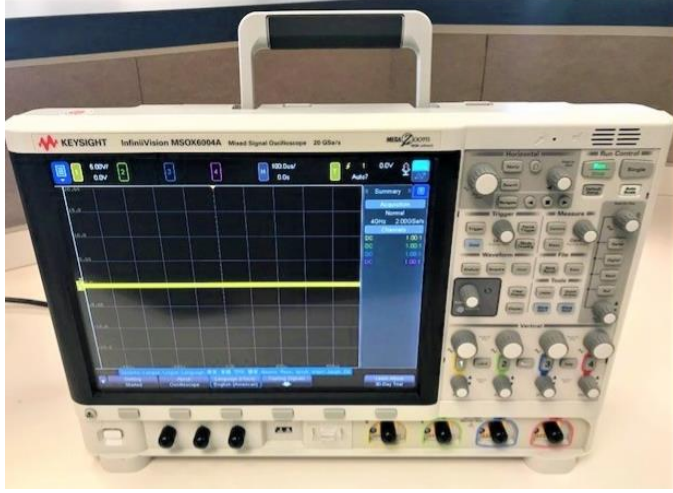
Resim 3.1. VISAR ve optik sistem malzemeleri [47]

VISAR cihazı bir fiber Doppler hız interferometre sistemidir. Bu cihaz yüksek hızlı bir cismin hız geçmişini zamana bağlı olarak ölçme yeteneğine sahiptir. Fiber optik kabloları vasıtasıyla lazer ışını gönderir ve hedeften yansıyan ışının dalga boyları arasındaki faz farkına göre hız ölçümünü gerçekleştirir. Kullanılan VISAR cihazı yansıyarak dönen ışını +30 Db ışını güçlendirme yeteneğine sahiptir. Yansıyarak dönen ışın, hedef üzerinden 3000 MW gücünde gönderilen bir lazer ışını gücüne sahiptir. Cihazı diğerlerinden ayıran en önemli özelliklerden biri hedefe gönderilen ışını güçlendirmek yerine yansıyan ışını güçlendirmektir. Böylece yüksek enerji kullanılmasına engel olur. Yüksek güçte lazer ışını göndermek dalga boylarının ve faz farkının artmasına neden olarak ölçüm çözünürlüğünün düşürür. Lazer ışını yansımadan sonra güçlendirmek güç ihtiyacını azaltırken gürültü seviyesini de düşürür. PDV ve diğer interferometreler gönderilen ve yansıyan ışınları toplanması sonrasında Fourier analizinden geçirilmesi gerekirken VISAR sisteminde bu ışınlar doğrudan hız verisi olarak kullanılabilir [47].

3.4.2. Veri toplama sistemi

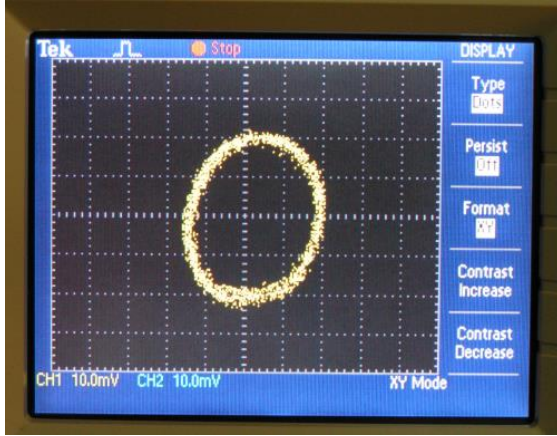
Veri toplama sistemi için osiloskop kullanılmıştır. Osiloskop 20 GS/s veri alma frekansına sahiptir. Ayrıca VISAR cihazı için gerekli olan 4 kanaldan veri alma imkânı verir. Bu 4 kanal girişinin yanı sıra bir de veri alma sinyali için ayrıca “Trig” girişi mevcuttur. Osiloskop fotodiyotlar ile gelen ışık sinyalini elektriksel sinyale dönüştürür. Bu sinyaller sürekli ve sinüzoidaldir. Veri alma frekansı çok yüksek olması nedeniyle 0,4ns aralıklarla veri alma olanağı vermektedir. Ancak test şartları gereği belirli seviyelerde gelen ışının dalga boyu

nedeniyle 10 GS/s yani 0,8 ns aralıklarla veri alınmıştır. Plaka hızlandırma testleri kapsamında kullanılan osiloskopun görüntüsü aşağıda Resim 3.2 ile verilmiştir.



Resim 3.2. Test çalışmalarında kullanılan osiloskopun görüntüsü

VISAR cihazından gönderilen lazer ışını, metal plaka üzerinden yansyarak belirli bir frekansta yansyarak osiloskopta dalga şekli görülebilir. Veri alındığının en iyi göstergelerinden biri de osiloskopta görülen Lissajous şeklidir. Lissajous şekli kompleks harmonik bir hareketi temsil eden parametrik denklemler sisteminin bir grafiğidir. Eğriler, iki bağımsız harmonik hareketin etkisi altındaki hareketi izlenen bir noktanın izlediği yolu gösterir. Genellikle harmonik hareketler basit, birbirine dik ve frekansları belirli bir orandadır. Lissajous şekilleri genellikle X ve Y girdilerinin sinüzoidal hareketlerini pratik olarak görüntülemenin bir uygulamasıdır. Genellikle interferometrede elde edilen optik sinyallerin düzgün olup olmadığını görmek için kullanılır. Lissajous şekilleri ideal olarak eşit yarıçaplarda konsantrik çemberlerden oluşmalıdır. Eğer çember şekillerinde bozukluklar varsa bu durum verilerde kayıp olduğunu göstermektedir. Osiloskop cihazlarında görüntülenen Lissajous şekli örneği aşağıda Resim 3.3 ile verilmiştir.



Resim 3.3. Lissajous şekli [48]

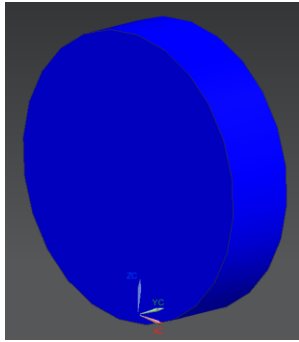
Doğru verilerin alınabilmesi için iki harmonik dalga arasında $\pi/2$ kadar faz farkı olmalıdır. Sinüzoidal dalgalar arasındaki faz farkı Lissajous şeklinin elips şeklinde veya tam daire şeklinde olmasını sağlar. Eğer bu faz farkı $\pi/4$ kadar ise Lissajous şekli 45° açı ile elips şeklinde görünür. Dalgalardan birinde gürültü var ise bu durum Lissajous şeklinin bir kısmındaki verilerde dağınıklar görülür.

3.4.3. Ana test modeli ve bileşenleri

Bu bölümde sistemde kullanılan bileşenlerin malzemelerinin seçilmesi ve bileşenlerin boyutlandırılması için yapılan SPEED hidrokod çözümlemeleri anlatılmıştır. SPEED hidrokodunda yapılan çözümlemeler için test düzeneğinin modeli oluşturulmuştur. Düzenekte belirlenen bileşenlerin bazı boyutları ve malzemeleri literatürdeki bazı çalışmalarda verilmiş olsa da sistemin pratik kullanıma uygun şekilde malzeme ve boyut seçimi yapılmıştır. Test düzeneğinin amacına uygun olarak plaka hızlandırma silindirik bir gövde içerisinde yapılmaktadır. Gövde içerisine metal plaka ile bitişik şekilde patlayıcı yerleştirilerek infilak ettirilir ve oluşan ürün gazlarının itkisiyle hareket ettirilir. Plaka hızlandırma testlerinde ana test bileşeni yapısı itibariyle gaz/barut silah sistemine benzemektedir. Bu silah sistemlerinde parçacık, basınçlı inert gaz veya barutun yanması sonucu oluşan yüksek basınçlı gazın itkisiyle hareket ettirilir. Parçacığın içinde bulunduğu silindirik hazneye ise namlu adı verilmektedir. Bu nedenle plaka hızlandırmasının gerçekleştirildiği silindirik gövde de namlu olarak adlandırılacaktır. Plaka hızlandırma sisteminin ana test bileşenleri; namlu, hızlandırma plakası ve patlayıcı ve patlayıcıyı infilak ettirmek için ateşleme sisteminden oluşmaktadır.

Patlayıcı

Tez çalışmasının amacı, patlayıcının detonasyonu sonrası gaz ürünlerinin genişleme durumunun incelenmesi olduğundan testlerde kullanılacak patlayıcının kütsel ve yapısal özellikleri tüm test çalışmalarında aynıdır ve ayrıntıları Bölüm 3.1’de daha geniş şekilde açıklanmıştır. Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılan patlayıcı boyutlarının hem kararlı şekilde detonasyonu sağlayacak kadar büyük, hem de sistemin boyutlarına uygun şekilde diğer malzemelere zarar vermeyecek kadar küçük olmalıdır. Bu nedenle boyut olarak literatürde çoğunlukla kullanılan ölçüler alınmıştır. Literatür çalışmalarında çap, patlayıcının içerdiği alüminyum oranına bağlı olarak Ø40 veya Ø50 mm alınmıştır. Tez çalışması kapsamında kullandığımız patlayıcının alüminyum oranı %22’den fazla olmadığı için çap olarak Ø40 mm seçilmiştir. Patlayıcı yüksekliği, kararlı detonasyonun sağlanabileceği en kısa mesafe ile sınırlıdır. Ancak sistemin tekrar kullanılabilir olması için diğer bileşenlere zarar vermeyecek kadar küçük olması gerekmektedir. Sisteme özel ateşleme sistemi kullanıldığından bu mesafe literatürde de yaygın olarak kullanılan 15 mm olarak belirlenmiştir. Patlayıcı katı model görüntüsü Şekil 3.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Patlayıcı katı modeli

Bu boyutlara göre patlayıcı kütlesi, patlayıcı yoğunluğuna göre yaklaşık olarak 30 g ağırlığında olmaktadır. Belirlenen patlayıcı boyutlarının sistem için uygunluğu SPEED hidrokodunda yapılan 2-boyutlu ateşleme analizlerinde incelenmiştir.

Hızlandırma plakası

Patlayıcı infilak ettirildiğinde detonasyon gazlarının genişmesi sonucunda genişleme enerjisi metal plakaya kinetik enerji olarak aktarılmış olur. Plaka, patlama sırasında yüksek

basınçta detonasyon dalgasının çarpması sonucu deformasyona uğrar. Deformasyon sırasında plakanın oldukça sünek olması, parçalanmaması ve bütünlüğünün korunması istenir. Böylece plakada kütle kaybı oluşmayacaktır. Literatür çalışmalarında, patlayıcı ile yapılan testlerde genellikle oksijen oranı çok düşük olan OFHC bakır malzemesi kullanılmıştır. OFHC yaklaşık %99,95 üzerinde bir saflık oranına sahiptir. OFHC bakır malzemenin yüksek basınç altında oldukça sünek bir davranış göstermesinden dolayı tercih edilmektedir. Bu nedenle plaka malzemesi olarak OFHC bakır malzemesinden kullanılmasına karar verilmiştir.

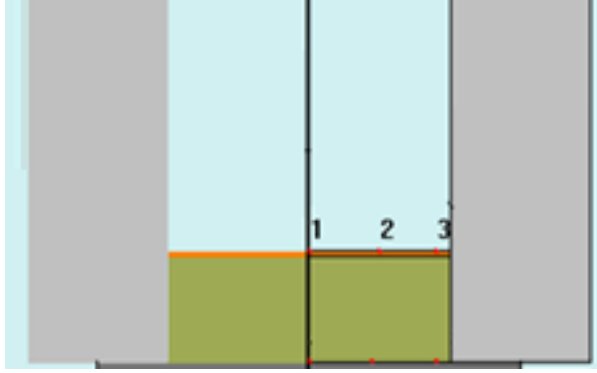
Metal plaka boyutları belirlenirken patlayıcı boyutu göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle bakır plakanın çapı patlayıcı ile aynı olacak şekilde Ø40 mm olarak belirlenmiştir. Plaka kalınlığı ise hız ölçüm sisteminden uygun veri alınmasına bağlıdır. Plaka hızlandırma testinde kullanılan VISAR interferometresi serbest yüzey hızının değişimini oldukça hassas olarak ölçebilen bir cihazdır. Buna göre durgun metal plaka, yüksek şok basıncıyla karşılaştığında plakaya iletilen stres dalgaları plaka kalınlığı boyunca ilerleyerek diğer yüzeyine ulaşır. Elastik dalgalar çarpma yüzeyinden başlayarak malzemenin serbest yüzeyine doğru hareket eder. Plakada da elastik dalga serbest yüzeye ulaştığında hareket sağlar ve bu dalganın bir kısmı serbest yüzeye bitişik ortama iletilirken geri kalan kısmı da yansyarak geri döner. Bu dalgalar sönümlenene kadar yüzeylerden düzenli olarak yansır. Eğer plaka kalınlığı fazlaysa bu yansımalarından dolayı gürültü oluşur ve ölçüm sonuçlarının hassasiyeti azalır. Hız ölçüm sisteminde en az gürültü oluşturacak plaka kalınlığı için SPEED hidrokodunda 2-boyutlu analizler yapılmıştır. Analizi yapılacak modelin boyutları ve patlayıcı malzemesi aşağıda Çizelge 3.1 ile verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çelik gövde, plaka ve çevreye iletilen basınç analizleri için model boyutları

Test Düzenegi Bileşeni	Çelik Gövde İç Çapı [mm]	Patlayıcı Boyutları [mm]	Metal Plaka Boyutları [mm]	Patlayıcı
Model-1	Ø40	Ø40x15	Ø40x1,0	PBXN109
Model-2	Ø40	Ø40x15	Ø40x1,5	PBXN109
Model-3	Ø40	Ø40x15	Ø40x2,0	PBXN109

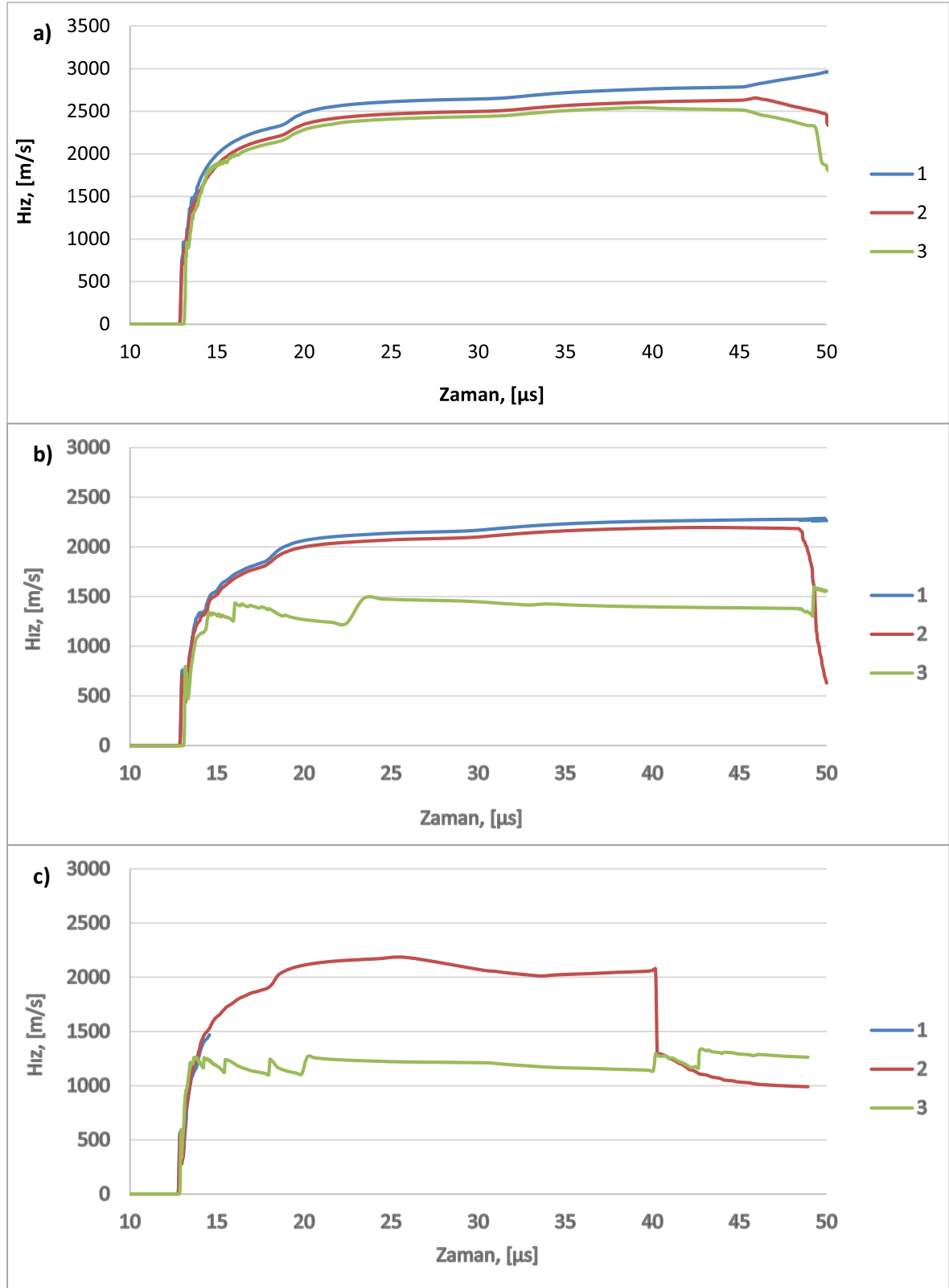
Bu analizler için yukarıda belirlenen patlayıcı boyutları ve malzemesine uygun model hazırlanmıştır. Plaka çapı patlayıcı çapı ile aynı ve malzemesi OFHC bakırdır. Karşılaştırılacak plaka kalınlıkları ise 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olarak belirlenmiştir. Modelde

kullanılan malzemeler için SPEED hidrokodunun veri tabanında bulunan parametreler kullanılmıştır. SPEED hidrokodunun veri tabanı kaynakları belli, yaygın olarak kullanılan literatür çalışmalarından elde edilen parametreleri içermektedir. SPEED hidrokodunda hazırlanan plaka hızlandırma modeli aşağıda Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



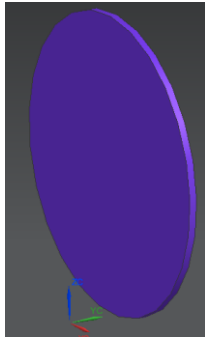
Şekil 3.4. Plaka kalınlığının belirlenmesi için plaka hızlandırma model ve plaka üzerindeki deformasyonların takip edildiği duyargaların görünümü

Analiz sırasında plakada kütle kaybı oluşup oluşmadığı plakanın yüzeyine yerleştirilen duyargaların hareketiyle incelenmiştir. Plakanın uçuş eksenini boyunca düzlemsel olarak hareket eden plakanın merkezi, kenarı ve ikisi arasındaki nokta zamanla uçuş hızı değişiminin aynı olması beklenir. Bu noktalar yukarıdaki modelde gösterildiği gibi merkez noktası (1), plaka kenarı (2) ve iki nokta arası (3) duyargaları yerleştirilmiştir. Plaka hızlandırılması sırasında çözümleme sonucu plaka üzerinde belirlenen noktaların hızı ile takip edilecektir. Buna göre plaka kalınlığına göre yapılan analizlerde hangi plaka kalınlığı için daha kararlı bir hareketin olduğu ve hız ölçüm sistemi için uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu boyutlarla yapılan analizler sonucunda plaka üzerine yerleştirilen duyargalardan alınan y-eksenindeki hız geçmişi grafikleri aşağıda Şekil 3.5 ile verilmiştir.



Şekil 3.5. 2-boyutlu plaka hızlandırma analizi sonucunda plaka üzerine yerleştirilen duyargalardan alınan hız-zaman değişim grafikleri a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3

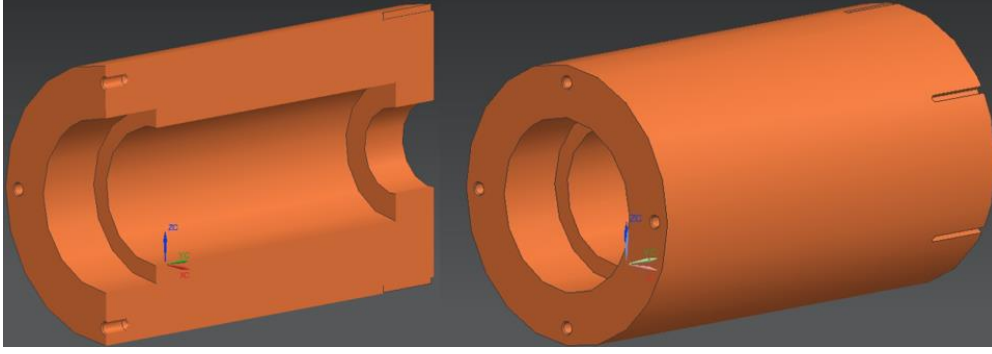
Hız ölçüm sistemi, gönderilen lazer ışınının parlatılmış plaka yüzeyinden yansıyarak cihaza dönmesiyle giden ve yansıyan ışın arasındaki farkın incelenmesiyle ölçülmektedir. Buna göre plaka yüzeyi ve plakanın uçuş sırasındaki hareketi düzgün, eksenel yönde ve yerleştirildiği düzlemde olmalıdır. Aynı model için plaka kalınlıkları 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olarak alınmış, üzerine yerleştirilen duyargaların zamana bağlı hız değişimi gözlenmiştir. Buna göre 1,5 mm kalınlıklarında plaka kullanılarak yapılan çözümlemede plaka merkezinde bulunan nokta (1) ve ona yakın olan nokta (2), birlikte hareket ederken (3) noktası namlu iç cidarına sürtünmeden dolayı daha yavaş ilerleyerek kopmuştur. 2 mm kalınlığındaki plaka ile yapılan çözümlemede ise plakanın yüksek kalınlıkta olmasından dolayı plaka içinde parçalanma olduğu ve (2) noktasının koptuğu değerlendirilmektedir. Grafiklere göre en iyi sonucu 1 mm kalınlıktaki plakanın kullanıldığı model vermiştir. (1), (2) ve (3) noktalarının birlikte hareket ettiği ve aynı düzlemde kaldığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle testte kullanılacak plakanın 1 mm kalınlıkta olması gerektiği değerlendirilmiştir. Bakır plakanın katı modeli aşağıda Şekil 3.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Bakır plakanın katı modeli

Namlu

Patlayıcı rijit bir gövde içerisinde infilak ettirilerek detonasyon gazları plaka üzerinde oluşturduğu basınç ile plakayı hızlandırır. Yapı itibarıyla bu sistem, barut silahı veya gaz silahı sistemlerine benzemektedir. Bu nedenle gövde boyutları seçilirken gövde içerisinde patlayıcının infilakı sonrasında gövde şeklinin korunması için literatür çalışmalarından ve mevcut barut silahı ateşleme sistemlerinden yararlanılmıştır. Buna göre namlunun iç çapı Ø40 mm, kalınlığı 20 mm ve malzeme olarak ısıl işlem görmüş çelik seçilmiştir. Tasarlanan çelik namlunun katı model görüntüsü aşağıda Şekil 3.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Namlunun katı modeli

Namlunun bir ucunda yalnızca hız ölçüm cihazının lensinden çıkan ışınının geçebileceği büyüklükte açıklık bırakılmıştır. Bu açıklık üzerinden gelen ışın tekrar cihazın lensine yansıtılarak ölçüm alınacaktır. Bu açıklığın çapı, hızı ölçülecek plakanın çapından daha küçüktür ve patlayıcının infilakı sonrasında plakayı tutması için tasarlanmıştır. Bu tasarımla hız ölçüm cihazının lensinin korunması amaçlanmaktadır.

Ateşleme sistemi

Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılan ateşleme sisteminin amacı patlayıcının uygun şekilde ateşlenmesini sağlamaktır. Bununla birlikte ateşleme sistemi ateşleyeceği patlayıcıya göre yapısal olarak farklılık gösterebilmektedir. Kullanacağımız plaka hızlandırma sisteminde daha az miktarda patlayıcı kullanmak ve düzlemsel bir detonasyon dalgası elde edebilmek için ateşleme sisteminin özel olarak tasarlanması gerekmektedir. Oldukça düşük kalınlığa sahip patlayıcıda kararlı bir detonasyon oluşturması için patlayıcı üzerindeki birçok noktanın aynı anda şok basıncı iletilmelidir. Patlayıcının tüm kesiti aynı miktarda basınçla karşılaşarak ateşlendiğinde düzlemsel bir detonasyon dalgası oluşur. Detonasyon dalgası bu şekilde daha hızlı kararlı hale gelerek patlayıcının daha az miktarda kullanılabilmesini sağlar. Böylece 15 mm kalınlık belirlenen patlayıcı için kararlı detonasyon yapısı sağlanabilecektir.

Yüksek hızda ilerleyen plakanın interferometre ile hızının ölçülebilmesi için belirli bir süre boyunca plakanın patlama ekseninde hareket etmesi gerekmektedir. Plakanın uçuş ekseninin başlangıç durumuna göre değişmesi sonucunda VISAR hız ölçüm sisteminde gönderilen lazer ışını geri toplanamaz ve ölçüm gerçekleştirilemez. Patlayıcının infilakı ile birlikte oluşan detonasyon dalgası eğri biçimindedir. Patlayıcının kenarlarında hava ara yüzü olup

hareket eksenini boyunca akış dalgası şeklinde hareket eder. Akış dalgasının profili, laminar akış profilinde benzer şekilde orta kısımda en yüksek hız ile ilerlerken kenar noktalara gittikçe düşer. Yapısal olarak kontrolsüz basınç dalgası plaka uçuşu sırasında hız verisinin kontrolü oldukça zorlaştırır. Bu nedenle kontrolün sağlanması için dalga dalgasının düzlemsel olarak iletilmesi gerekmektedir.

Kararlı detonasyon yapısının oluşturulması ve düzlemsel basınç dalgasının iletilmesi için ateşleme sisteminde düzlemsel dalga merceği adı verilen bileşen tasarlanmıştır. Düzlemsel dalga merceği hızlı kararlı detonasyon yapısını sağlayan ateşleyici patlayıcı şekli ve düzlemsel dalga yapısını oluşturan dalga şekillendiricinin bir kombinasyonundan oluşur. Bu kombinasyonların en uygun olanı ve boyutları SPEED hidro kod programında yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. Analizlerde ilk olarak ateşleyici patlayıcı şekli için analizler yapılmış daha sonra dalga şekillendiricinin boyutsal analizleri yapılmıştır.

Ateşleme sistemindeki patlayıcı şekli için SPEED analizleri

Ateşleme sistemlerinde ana patlayıcıyı ateşlemek üzere şok basıncına daha duyarlı ve hızlı şekilde ateşlenebilen patlayıcılar kullanılmaktadır. Bu patlayıcılara yemleme şarjı adı verilir. Patlayıcılar genellikle şok basıncıyla infilak ettirilmektedir. Ateşleme sistemleri infilak ettirilecek patlayıcının aktifleşme enerjisine veya duyarlılığına göre ve boyutlarına göre farklı sistemler kullanılabilmektedir. Bunlardan en yaygın olanları silindirik yemleme şarjı ve koni biçimindeki yemleme şarjı ile ateşleme sistemleridir.

Parçacığın veya plakayı hızlandırmak için 1-boyutlu şok dalgası kaynağı olarak genellikle barut/gaz silahları kullanılır. Bu şekilde hızlandırılan plaka veya parçacığın orta noktasında hız en yüksek olur ve düzlemsel dalga istenen şekilde elde edilemez. Ayrıca bu şekilde en fazla 50 mm çapında ve yaklaşık 15 GPa basınca kadar çıkılabilmektedir. Plaka hızlandırma testlerinde patlayıcı boyutunun küçük olması nedeniyle kararlı detonasyonun oluşturulması zordur. Şok dalgasının patlayıcıya ulaşmadan daha önce düzlemselleştirilerek patlayıcıda oluşacak detonasyon dalgasının kontrol edilebileceği düzlemsel dalga mercekleri geliştirilmiştir. Bu patlayıcılar, daha duyarlı ve mühimmatlarda yemleme şarjı olarak kullanılır. İletilen şok basınç seviyesi patlayıcı ve plaka arasına koyulan, reaksiyona girmeyen (inert) bir malzeme yardımıyla ayarlanabilir.

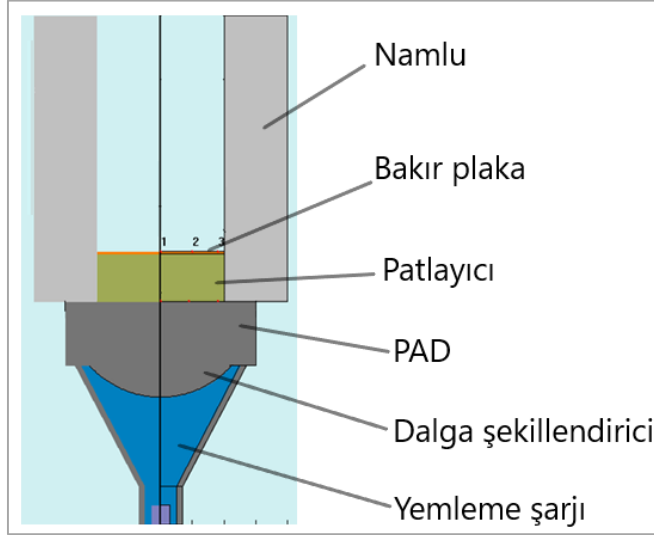
Ateşleme sisteminin düzlemsel dalga oluşturmalarıyla ilgili doğrulama yapmak için farklı boyutta modeller için hidrokod çözümleri yapılmıştır. SPEED hidrokodunda yapılacak çözümler için hızlandırma plakasının kalınlık analizlerinde kullanılan modele ateşleme sistemi modeli eklenmiştir. Bu modelde patlayıcı boyutları Ø40x15 mm ve patlayıcı malzemesi PBXN109, plaka boyutları Ø40x1 mm ve plaka malzemesi OFHC bakırdır. SPEED yazılımında yapılacak ateşleme sistemi analizleri için kullanılacak model boyutları aşağıda Çizelge 3.2 ile verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ateşleme sistemindeki patlayıcı şekli analizleri için model boyutları

Test Düzeneği Bileşeni	Şekil / Boyut [mm]	Dalga Şekillendirici Küre Çapı [mm]	PAD Kalınlığı [mm]
Model-4	Silindirik / Ø50x50	-	-
Model-5	Silindirik / Ø50x50	Ø30	-
Model-6	Silindirik / Ø50x50	-	20
Model-7	Silindirik / Ø50x50	Ø30	20
Model-8	Koni / Ø50-Ø10x50	-	-
Model-9	Koni / Ø50-Ø10x50	Ø30	-
Model-10	Koni / Ø50-Ø10x50	-	20
Model-11	Koni / Ø50-Ø10x50	Ø30	20

Ateşleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan iki farklı ateşleme şekli: silindirik yapıda yemleme şarjı ve konik biçiminde yemleme şarjı kontrol edilmiştir. Silindir şekilli yemleme şarjı boyutları için çap ve boy bilgisi ØÇap x Boy şeklinde verilirken koni şekilli yemleme şarjı için boyut bilgisi ØBüyük Çap-ØKüçük çap x Boy şeklinde verilmiştir. Silindirik ve koni şekilli yemleme şarjının etkileri farklı ateşleme sistemi çeşitleri için karşılaştırılmıştır. Bunlardan biri de dalga şekillendiricinin olduğu çeşitlerdir. Dalga şekillendirici, belirli bir yarı küre biçiminde detonasyon dalgasının eğriliğine göre direnç oluşturan bileşendir. Dalga şekillendiricinin kullanıldığı çeşitler için dalga şekillendirici küre çapı Ø30 mm olarak alınmıştır. Her bir yemleme şarjı şekli için yemleme şarjı ve patlayıcı arasında şok dalgasını geciktiren ve tampon görevi gören bileşen kullanılmıştır. Bu bileşenin literatürdeki ismi PAD olarak kullanılmıştır. Bu malzeme dalga şekillendirici ile aynı malzemede ve dalga şekillendiriciyle bütün şeklinde üretilmektedir. Dalga şekillendirici ve PAD malzemesi olarak teflon (PTFE) seçilmiştir. Teflon malzemesi görece yüksek empedans değeri, reaktif olmaması ve mekanik işleme kolaylığı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu tampon ile şok dalgasının daha kararlı bir yapıya ulaştıktan sonra patlayıcıya iletilebileceği

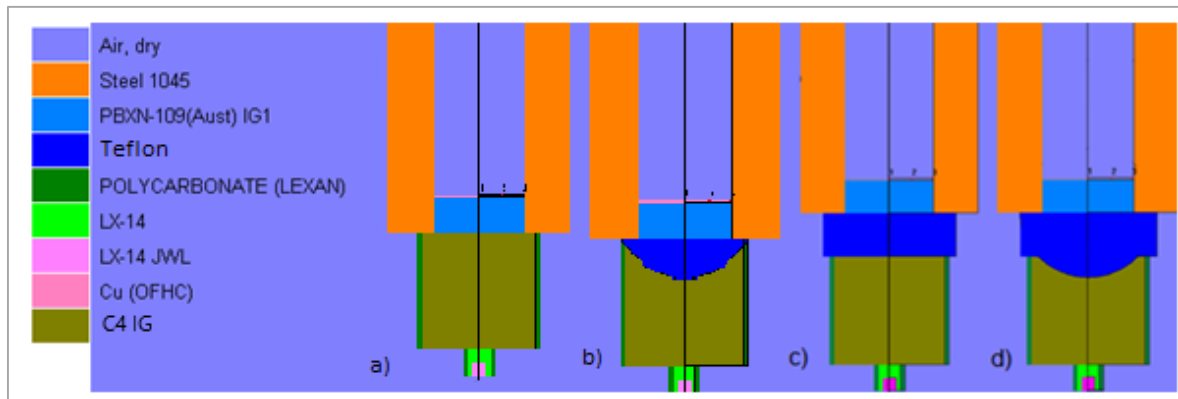
değerlendirilmiştir. Ateşleme sistemi çözümlerinde kullanılan modelin genel görüntüsü aşağıda Şekil 3.8 ile verilmiştir.



Şekil 3.8. Ateşleme sistemi analizlerinde kullanılan modelin genel görüntüsü

SPEED yazılımıyla yapılan bu çözümler 2-boyutlu ve eksenel simetrik olarak hazırlanmıştır. Modelin çözümlerinde kullanılan malzemeler için SPEED hidrokodunun veri tabanında yer alan parametreler kullanılmıştır.

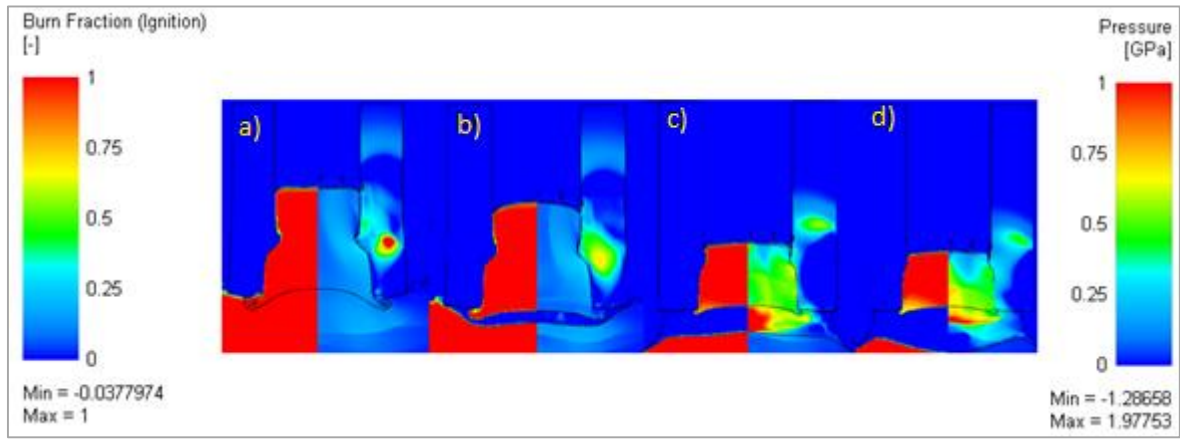
Silindirik ateşleme sistemi için çözümler modelleri Şekil 3.9 ile verilmiştir.



Şekil 3.9. Silindirik ateşleme sistemi 2-boyutlu model görüntüsü a) Model-4, b) Model-5, c) Model-6, d) Model-7

Yukarıda bahsedildiği üzere silindirik yemleme şarjı kullanılarak farklı ateşleme sistemleri için modeller hazırlanmıştır. Modellerde kullanılan malzemeler Şekil 3.9 ile verilen görüntünün sol tarafındaki malzeme renklerine göre renklendirilmiştir.

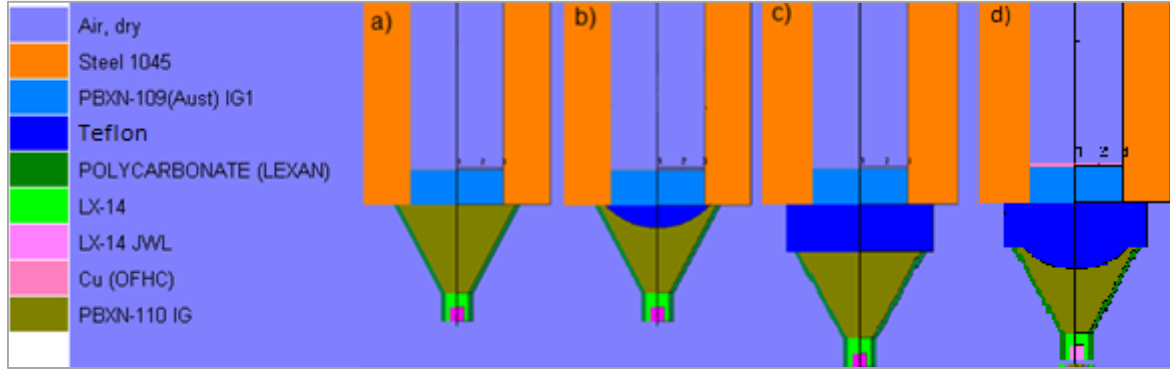
Silindirik şekilli ateşleme sistemleri için çözümlemeler sonucunda görüntüleri aşağıda Şekil 3.10 ile verilmiştir.



Şekil 3.10. Silindirik ateşleme sisteminin çözümlemesi sonucunda yanma oranı ve basınç dağılım görüntüsü a) Model-4, b) Model-5, c) Model-6, d) Model-7

Silindirik şekilli ateşleme sistemleri için çözümlemeler yapılmış ve her bir model ekseninden ikiye ayrılmıştır. Her bir model görüntüsünün (İng. Contour) sol yarısı patlayıcının yanma oranının bilgisini (İng. Burn Fraction), sağ yarısı ise basınç (İng. Pressure [GPa]) bilgisini vermektedir. Yanma oranı, malzemenin reaksiyona girme oranını 0 ile 1 arasında değer ile ifade etmektedir. 0 değeri hiç reaksiyona girmediğini belirtirken 1 değeri tamamen reaksiyona girdiğini ifade eder. Çözümleme sonucunda oluşan görsellerde 0 ile 1 arasında değişen renk ölçeği gösterilmektedir. Bu renk ölçekleri yanma oranı için sol tarafta ve basınç için ise sağ tarafta verilmiştir.

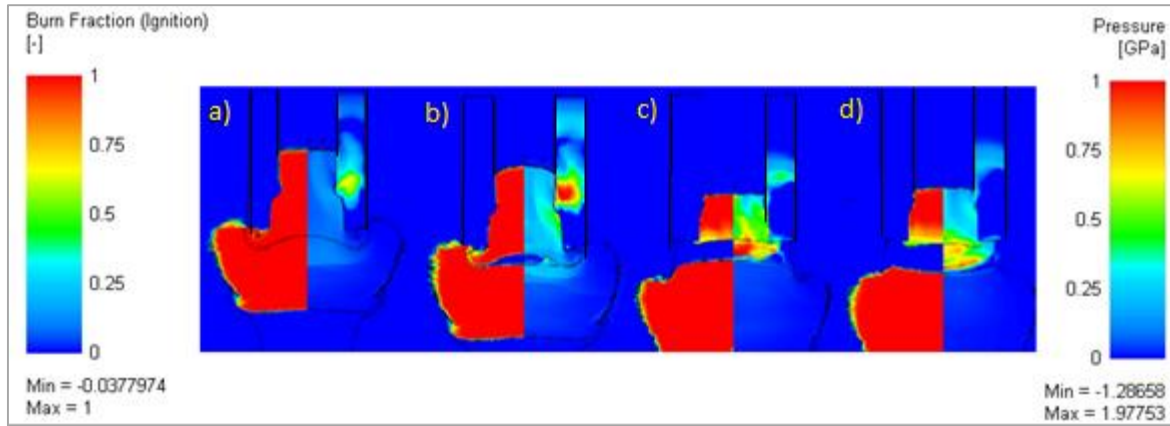
Konik ateşleme sistemi için çözümleme modelleri Şekil 3.11 ile verilmiştir.



Şekil 3.11. Konik ateşleme sistemi 2-boyutlu model görüntüsü a) Model-8, b) Model-9, c) Model-10, d) Model-11

Koni şekilli ateşleme sistemleri de silindir şekilli sistemde denenilen aynı ateşleme sistemi çeşitleriyle modeller oluşturulmuştur. Modellerde kullanılan malzemeler Şekil 3.11 ile verilen görüntünün sol tarafındaki malzeme renklerine göre renklendirilmiştir.

Koni şekilli ateşleme sistemleri için çözümlemeler sonucunda görüntüleri aşağıda Şekil 3.12 ile verilmiştir.



Şekil 3.12. Koni şekilli ateşleme sistemi çözümleme sonucu plaka görüntüsü a) Model-8, b) Model-9, c) Model-10, d) Model-11

Koni şekilli ateşleme sistemlerinin çözümleme sonucunda elde edilen görselleri de silindir şekilli görseller ile aynı şekilde iki yarıdan oluşacak şekilde ayrılmıştır. Yanma oranı renk ölçeği her bir modelin sol yarısında ve basıncın renk ölçeği ise her bir modelin sağ yarısında gösterilmektedir. Çözümleme sonucunda elde edilen görüntüler yaklaşık 20 μ s sonra alınan çözümleme görüntüleridir. Görüntülerdeki plakaların farklı konumlarda olmasının nedeni modelleme yapılırken dalga şekillendirici ve PAD bileşenlerinin kalınlıklarından dolayı

detonasyon dalgasında oluşturdıkları gecikmedir. Dalga şekillendirici malzeme kalınlığı arttıkça ateşleme sisteminde oluşan şok dalgasının ana patlayıcıya ulaşması gecikmektedir. Her iki şekilde yapılan farklı modellerde görüldüğü gibi düzlemsel plaka elde edilememiştir. Ayrıca farklı deformasyonlara neden olması ve alüminyumlu patlayıcının infilak ettirilmesi için boy/çap oranı düşük bir patlayıcıda kararlı bir detonasyon oluşması zor olması nedeniyle koni biçimindeki ateşleme düzeneğinin kullanılmasına karar verilmiştir. Buna göre modellerin plaka görsellerine bakıldığında en uygun modelin koni şekilli yemleme şarjı ile dalga şekillendirici ve PAD'in yer aldığı Model-11 olduğu değerlendirilmiştir.

Dalga şekillendirici küre çapı SPEED analizleri

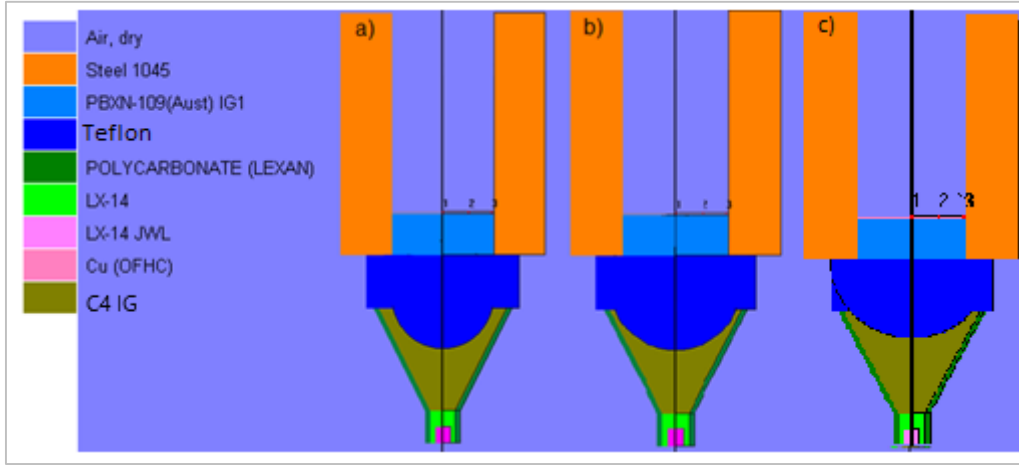
Konik şekilli ateşleme sistemi için kullanılacak en uygun dalga şekillendirici modelinin bulunması metal plaka üzerindeki deformasyonları en aza indirmesi açısından önemlidir. Bu nedenle şok dalgasının dalga şekillendirici üzerinden daha kararlı şekilde geçerek ana patlayıcıya ulaşması gerekir. Bu nedenle dalga şekillendiricilerin farklı küre çapları için model boyutları oluşturulmuştur. Bu boyutlar aşağıda Çizelge 3.3 ile verilmiştir.

Çizelge 3.3. Dalga şekillendiricinin küre çapı analizi için model boyutları

Test Düzeneği Bileşeni	Şekil	Dalga Şekillendirici Küre Çapı [mm]	PAD Kalınlığı [mm]
Model-12	Koni	Ø20	20
Model-13	Koni	Ø25	20
Model-14	Koni	Ø30	20

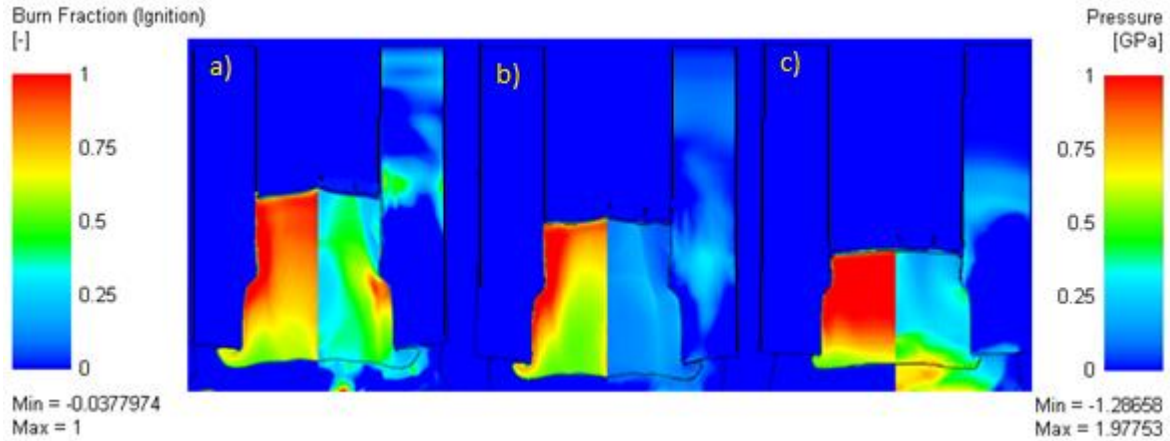
Koni şekilli ateşleme sistemleri için dalga şekillendiricinin farklı küre çaplarının plaka deformasyonuna etkisi için model oluşturulmuştur. Ana model için önceki analiz setinde Model-11 ile oluşturulan koni şekilli ateşleme sistemine sahip plaka hızlandırma test modeli üzerine ekleme yapılmıştır. Bu nedenle küre çapı dışındaki tüm bileşenler için Model-11'in verilen boyut ve malzemeler kullanılmıştır. Dalga şekillendiriciler için PAD olarak adlandırılan düzgün silindirik kısmın kalınlığı 20 mm olarak sabit alınmıştır. Bu kalınlıkta alınmasının sebebi yemleme şarjının infilakı sonrası oluşan dalgaların kararlı hale gelmesi ve oluşan gazların plaka hızlanması üzerinde etkisinin az olmasının istenmesidir.

Verilen boyutlara ait 2-boyutlu çözümleme modelleri aşağıda Şekil 3.13 ile verilmiştir.



Şekil 3.13. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı model görüntüsü a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14

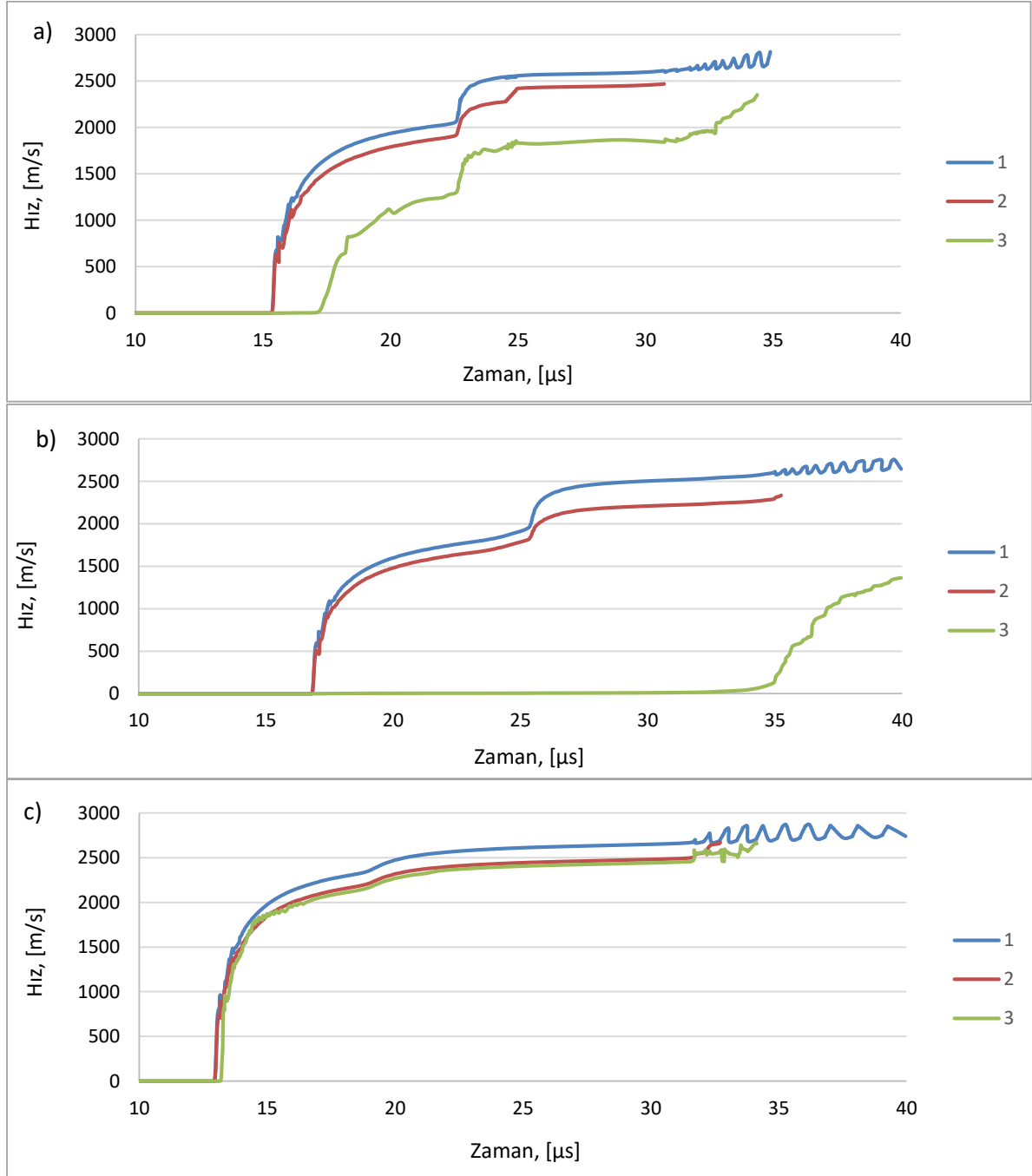
SPEED hidrokodunda oluşturulan 2-boyutlu aksenal simetrik modellerde kullanılan malzemelerin renkleri sol tarafta görülmektedir. Çözümleme sırasında kullanılan malzemelerin parametreleri için SPEED hidrokodunun veri tabanından yararlanılmıştır. Plakanın deformasyonu için plaka üzerine yerleştirilen duyargalardan alınan hız geçmiş verileri değerlendirilmiştir. SPEED analizleri sonucunda oluşan yanma oranı ve basınç dağılım görüntüleri aşağıda Şekil 3.14 ile verilmiştir.



Şekil 3.14. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı analiz sonucunda yanma oranı ve basınç dağılımı görüntüsü a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14

Önceki analiz set sonuçlarıyla benzer şekilde görseldeki her bir model iki yarım parçaya ayrılarak sol yarısı yanma oranını verirken sağ taraf basınç değişimini göstermektedir. Yanma oranı ve basıncın renk değişim ölçeği sırasıyla görselin sol tarafı ve sağ tarafında verilmiştir. Çözümleme modellerinde metal plakanın orta noktası (1), gövde cidarına en

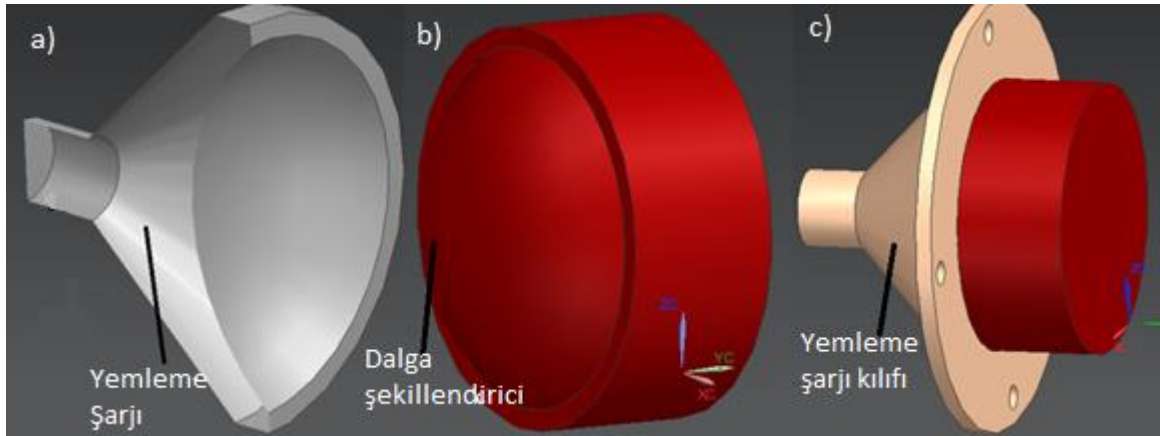
yakın noktası (3) ve ikisi arasındaki noktalara (2) duyargalar Şekil 3.4 ile gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu duyargalardan y-ekseni boyunca alınan zamana bağlı hız verileri Şekil 3.15 ile aşağıda verilen grafiklerde verilmiştir.



Şekil 3.15. Koni şekilli ateşleme sistemi için farklı küre çapı analiz sonucunda plaka üzerindeki duyargalara ait hız-zaman grafikleri a) Model-12, b) Model-13, c) Model-14

Analizler sonucunda plaka üzerindeki tüm duyargalardan elde edilen hız geçmişinin eş zamanlı ilerlemesi beklenmektedir. Plaka üzerindeki farklı noktaların hareketinin birbirine göre farklı olması durumunda hızlar sabit olsa bile konum farkının giderek açıldığı ve yüksek ivme farkına bağlı olarak kopmaların meydana geldiği düşünülebilir. Model-12 ve Model-13'ün çözümlmeleri sonucunda plaka kenarına yerleştirilen (3) numaralı duyargaya ait hız farklarının giderek açıldığı gözlenmektedir. Ancak Model-14 ile verilen grafikte tüm noktaların eş zamanlı hareket ettiği görüldüğünden Ø30 mm çapında küre kullanılarak modellenen dalga şekillendirici ile elde edilen metal plaka daha az deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak yapılan çözümlmelerle düzenek için en uygun ateşleme sistemi belirlenmiştir. Bu ateşleme sisteminde kullanılan düzlemsel dalga merceğine ait katı model resimleri üretim için çizilerek hazırlanmıştır. Modelleme sonucunda boyutlandırılan düzlemsel dalga merceği katı model görüntüsü aşağıda Şekil 3.16 ile verilmiştir.



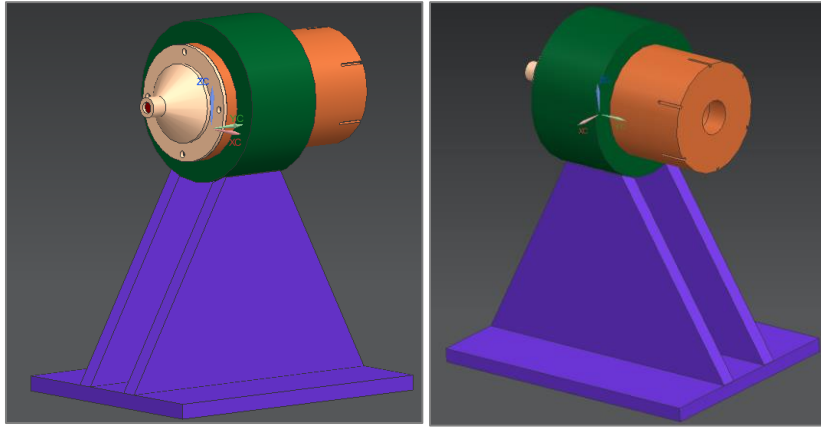
Şekil 3.16. Yemleme şarjı katı model görüntüsü a) yemleme şarjı, b) dalga şekillendirici, c) yemleme şarjı kılıfı

Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılacak olan bileşenler belirlenerek malzeme seçimi ve boyutlandırılması yapılmıştır. Test düzeneğine ait kullanılacak bileşenlerin listesi aşağıda Çizelge 3.4 ile verilmiştir.

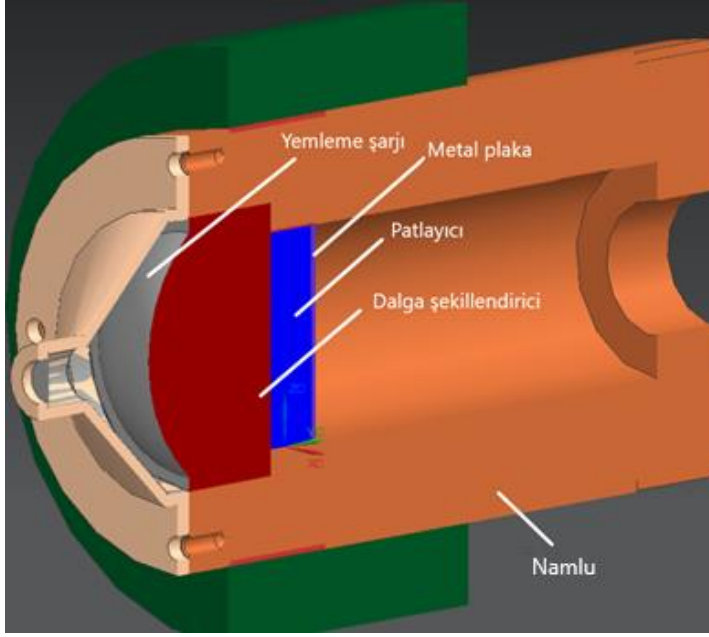
Çizelge 3.4. Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılacak malzeme ve bileşenler

BİLEŞEN/CİHAZ	MALZEME
Ana Test Kalemi	
Ateşleyici	Elektrikli Fünye
Yemleme Şarjı	C4
Dalga Şekillendirici	Teflon
Namlu	4140 Çelik
Plaka	OFHC Bakır
Enerjik Malzeme Bileşeni	
Patlayıcı Katkı Malzemesi	Küresel Alüminyum / LiF
Yüksek Enerjik Malzemesi	RDX
Bağlayıcı Malzeme	Polimer
Hız Ölçüm Cihazı ve Veri Toplama Cihazı	
Hız Ölçüm Cihazı	VISAR / PDV
Veri Toplama Cihazı	Osiloskop

Test düzeneğinde kullanılmak üzere tasarlanan ve üretilen nihai ana test kaleminin 3-boyutlu katı modeli ve kesit görüntüsü sırasıyla Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Ana test kalemi katı model görüntüsü



Şekil 3.18. Ana test kalemi katı model kesit görüntüsü

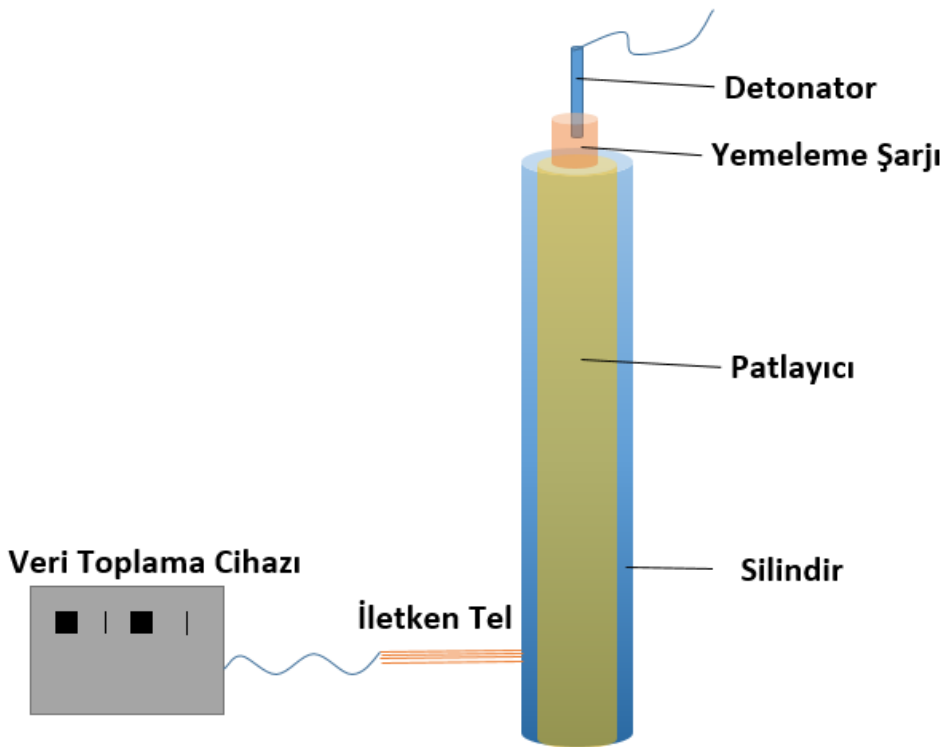
Plaka hızlandırma test düzeneğinde çelik gövde namlu şeklinde ifade edilerek gösterilmiştir. İçerisinde mavi renkte ana patlayıcı ve patlayıcıya bitişik halde OFHC bakır plaka bulunmaktadır. Namlu içindeki ana patlayıcı, düzlemsel dalga merceği yapısındaki ateşleme sistemiyle ateşlenir. Düzlemsel dalga merceği içerisindeki dalga şekillendirici kırmızı renkte gösterilmiştir. Bunun arkasında gri renkte görülen yemleme şarjı yer almaktadır. Ateşleme sistemi içerisinde daha düşük şok basınçlarına duyarlı yemleme şarjı olarak C4 patlayıcısı bulunmaktadır. C4 patlayıcısı standart tipte detonatörle ateşlenmektedir. Ateşleme sistemiyle başlatılan ateşleme zinciri sonunda ana patlayıcı infilak eder ve namlu içinde ürün gazlar oluşur. Bu gazlar genişerek plakaya itki sağlar. Yüksek hızlı plaka uçuşu sırasında hız ölçüm cihazı VISAR ile ölçüm sağlanarak veriler osiloskopta toplanması sağlanır.

3.5. Silindir Genleşme Test Düzeneği

Literatürdeki silindir genleşme çalışmalarında test düzeneği: patlayıcı doldurulmuş bakır silindir ve kontakt/iyonizasyon tellerinden (İng. pin) oluşmaktadır. Bakır silindir boru genellikle 1" çapında ve 304 mm boyundadır. Borunun et kalınlığı, silindir çapının 1/10 boyutunda seçilir. Hız ölçüm sisteminin bir parçası olan kontakt teller Dynasen şirketi tarafından üretilen CA 1041-C tipidir. Bu teller bir sinyal kutusuna bağlanarak metal parçacığın teması halinde kısa devre olarak 5-10 Volt sinyal üretir. Sinyallerin arasındaki zaman kaydedilir. Kontakt teller silindire 0,1-0,5 mm mesafeden başlayarak teller arasında,

radyal ekseninde 5-10 mm mesafelerde yerleştirilir. Genellikle 10 adet tel ile yapılan testlerde, konumu belirli olan tellerin sinyal zamanları arasındaki ilişki ile metal hızı tespit edilmektedir. İçi tümüyle patlayıcıyla doldurulan silindir borunun bir ucundan düzlemsel dalga merceği veya kademeli yemleme şarjı ile infilak ettirilir. Sinyal alınacak kontakt teller ise silindirin ateşleme yapılan ucundan 200-290 mm uzaklıklarda yerleştirilmektedir. Silindir çaplarına göre kontakt tel mesafeleri yaklaşık olarak Ø40 mm için 5 mm, Ø60 mm için 6 mm, Ø80 mm için 7,5 mm ve Ø100 mm için 9,5 mm şeklinde kullanılmıştır. Sinyal toplamak için veri toplayıcının veri toplama hızı 200 MS/s olması yeterlidir. Detonasyon hızı ölçümü için veri toplama hızı 2 GS/s olan bir osiloskop yeterli olmaktadır.

Tez kapsamında yapılan ikinci test çalışmasının düzeneği patlayıcı doldurulmuş metal silindir, izoleli iletken tel, silindir ve iletken tel tutma aparatı ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Silindir test düzeneğine ait şematik gösterim aşağıda Şekil 3.19 ile verilmiştir.



Şekil 3.19. Silindir genişleme test düzeneği şeması

Ateşleme sistemiyle ateşlenen patlayıcı detonasyonu silindir boyunca ilerlerken OFHC bakır silindir genişlererek iletken tellere temas eder ve devre kapanır. Bu şekilde önceden belirlenen mesafeler için bakır silindir ve tellerin temas zamanı kaydedilir. Temas eden tellerin arasındaki mesafe farkı oluşan sinyal zamanları arasındaki fark bölünerek bakır silindir

duvarının genleşme hızı bulunur. Bu bölümde silindir genleşme test düzeneği için kullanılan cihazlar, bileşenler ve bunların özellikleri anlatılmıştır.

3.5.1. Hız ölçüm sistemi

Silindir genleşme testlerinde en yaygın olarak kullanılan hız ölçüm sistemleri interferometre cihazları (örn. PDV), streak kamera ve kontakt tellerdir. Ancak bu sistemlerin hiç biri mevcut değildir ve çoğu pahalı cihazlardır. Bu nedenle mevcut imkânlar değerlendirildiğinde kontakt tellere benzer bir prensiple çalışan sistem kullanılmıştır. Sistemde uçları koparılan tellere elektrik verilerek açık uçlu devre oluşturulmuştur. Bu teller silindir duvarından belirli mesafelere yerleştirilerek silindir duvarının genleşmesi sırasında temas ederek devre kapanır ve elektrik sinyali elde edilmektedir. Testlerde kullanılan iletken tel ve klemens görüntüsü aşağıda Resim 3.4 ile gösterilmiştir.



Resim 3.4. İzoleli iletken tel ve klemens

Silindir genleşme test düzeneğinde hız ölçüm sistemi olarak bakır malzemeden iletken teller kullanılmıştır. Tellerin dışı elektriksel olarak yalıtkan film ile kaplanmıştır. Bu sayede yalnızca telin uçlarından elektrik iletimi sağlanmaktadır. İlk durumda açık devre halinde iken silindirin genleşmesi sırasında temas ettiği anda devre kapanmaktadır. Tellerin uçları klemensler ile veri toplama cihazının kablolarına bağlanmaktadır.

3.5.2. Veri toplama sistemi

Veri toplama sistemi iletken tel uçlarındaki klemens setlerine bağlanan 2 parçadan oluşmaktadır. Sensörlerden elektriksel verilerinin alınması, analiz edilmesi ve işlenmesi dijital bilgisayarlar ve işlemcilerle mümkün değildir. Bu nedenle, bu sistem, mikrodenetleyiciler ve mikroişlemciler gibi dijital işlemcilerle iletişim kurmak için analog verileri dijital verilere dönüştürmek için bir ara cihaza ihtiyaç duyar. Analogdan dijitale dönüştürücü (ADC), gerilim gibi analog sinyalleri 1'ler ve

0'lardan oluşan dijital veya ikili forma dönüştürmek için kullanılan elektronik bütünleşmiş devredir. ADC'lerin çoğu 0 ila 10 V, -5 V ila + 5 V gibi bir voltaj girişi alır ve buna uygun olarak bir tür ikili sayı olarak dijital çıktı üretir. Deneyde veri toplama cihazı olarak kompakt bir veri toplama sistemi kullanılmıştır. Sistemler, 160 dB dinamik aralığa ve kanal başına 200 kHz alım hızlarına sahip analog girişlere veya kanal başına 1 MHz'e kadar hızlara sahip isteğe bağlı yüksek hızlı amplifikatörlere sahiptir [48].

3.5.3. Ana test modeli ve bileşenleri

Ana test modelinde bakır silindir, silindir içerisine doldurulan patlayıcı, silindir ve iletken telleri tutmaya yarayan aparat ve ateşleme sisteminden oluşmaktadır. Sistemde yer alan bileşenlerin çoğu standart malzeme ve boyutlara sahiptir. Aşağıdaki bölümde bileşenlerin malzeme ve boyut seçimleri açıklanmıştır.

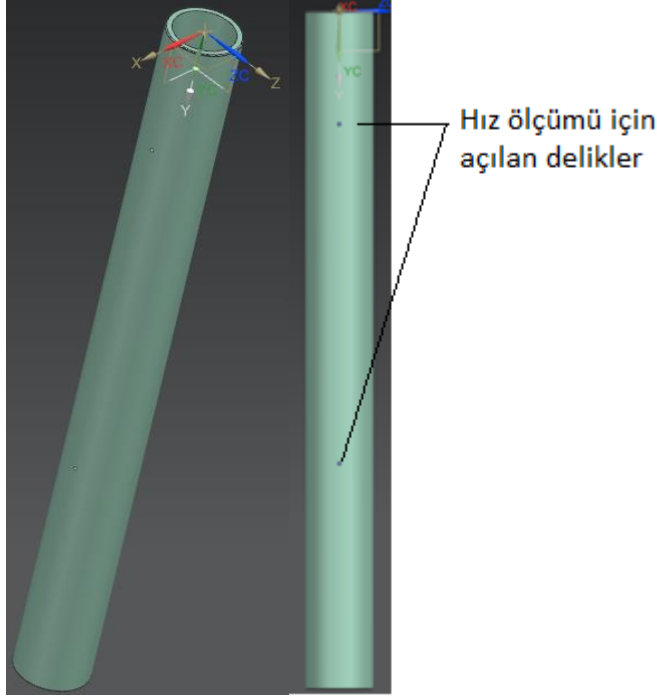
Patlayıcı

Tez çalışmasının amacı, patlayıcının detonasyonu sonrası gaz ürünlerinin genleşme durumunun incelenmesi olduğundan testlerde kullanılacak patlayıcının kütle ve yapısal özellikleri tüm test çalışmalarında aynıdır ve ayrıntıları Bölüm 3.1'de daha geniş şekilde açıklanmıştır. Silindir genleşme test düzeneğinde kullanılan patlayıcı çapının kararlı şekilde detonasyonu sağlayacak kadar büyük olmalıdır. Bu çapa kritik çap denilmektedir. Daha önce yapılan birçok çalışmada 25 mm çaptaki PBXN-109 patlayıcısının infilak ettirildiği bilinmektedir. Test maliyetlerinin en az olması istendiğinden literatürde önerilen en düşük patlayıcı çapı kullanılacaktır. Üretilen patlayıcı bakır silindir içerisine tamamen doldurularak infilak ettirilmek üzere kullanılmıştır.

Bakır silindir

İdeal patlayıcıların JWL parametrelerini belirlemek için kullanılan standart silindir genleşme test düzeneklerinde iç çapı Ø25,4 mm ve boyu 304 mm olan OFHC bakır silindirler kullanılmaktadır. Silindir et kalınlığı ise silindir yarıçapının 1/5'i kadar seçilmektedir. Oluşturulan silindir genleşme test düzeneğinin düşük maliyetle olması önemlidir. Kullanılan patlayıcı için alüminyum kütle oranı düşük olması nedeniyle literatür rehberliğinde ideal patlayıcılar için önerilen standart silindir boyutları seçiminin uygun olacağı düşünülmüştür.

Testlerde kullanılan OFHC bakır silindir modelinin görüntüleri aşağıda Şekil 3.20 ile verilmiştir.



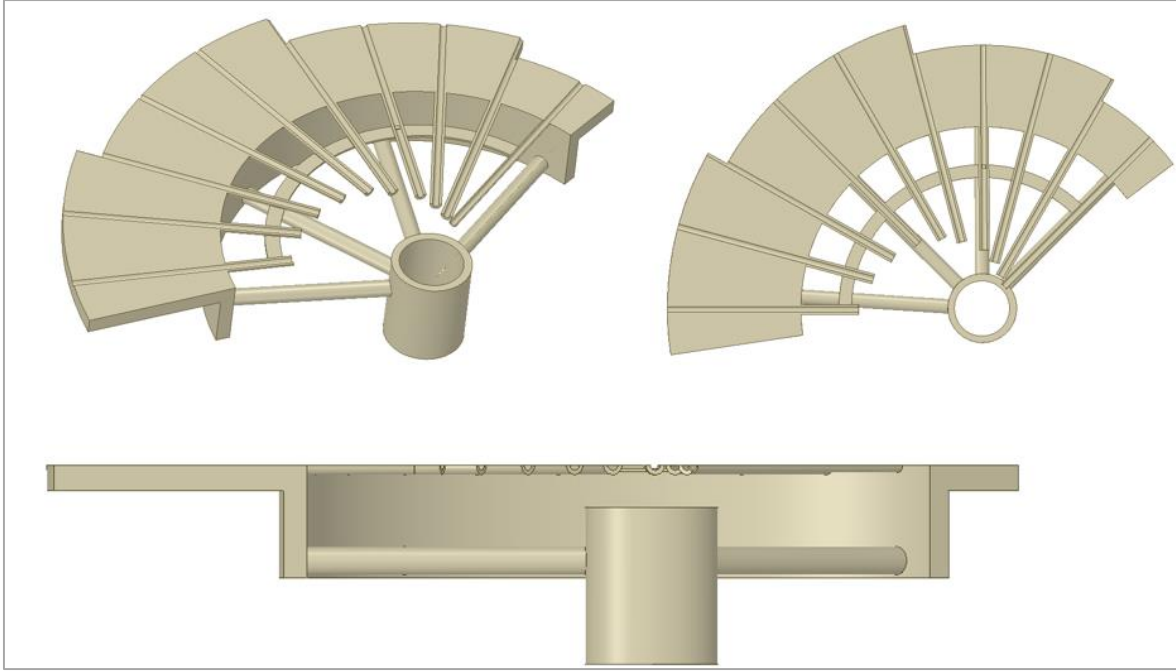
Şekil 3.20. Silindir genişleme testlerinde kullanılan OFHC bakır silindirin katı modeli

Silindirin gövdesi üzerine aralarında 150 mm mesafe olacak şekilde 2 delik açılmıştır. Bu delikler silindir genişleme testi sırasında detonasyon hız ölçümünün gerçekleştirilmesi için gerekli olacaktır. Detonasyon hız ölçümünde kullanılan prensip silindir duvar hızı ölçümü ile aynıdır. Detonasyon dalgası açık uçlu devreye geldiğinde devre kapanır ve sinyal üreterek iki delik arasındaki zaman farkı belirlenmiş olur.

Bakır silindir ve iletken tel tutucu

Silindir genişleme düzeneklerinde kullanılan yöntem oldukça düşük maliyetli ve üretimi kolaydır. Ancak düzenekte en kritik durum silindir genişleme sırasında silindir duvarı genişlerken iletken tellere dik olarak çarpmalı ve bu sırada tellerin doğrultusunun bozulmamasıdır. Ayrıca teller arasındaki mesafelerde hassas olarak korunmalıdır. İletken tellerin arasındaki mesafeyi belirleyen parçanın üretim tolerans aralığı hız ölçümlerinde tutarsızlıklara neden olabilecektir. Yerleştirilen teller arasındaki mesafe 0,1 mm kadar farklı olması durumunda ölçüm sonuçlarına 30-40 m/s kadar okuma hatasına neden olabilecektir. Ortalama ölçülecek hızlar dikkate alındığında bu oran %1-1,5 civarında olabilir. Silindir

genleşme düzeneğinde silindir tutucu ve hız ölçümünde kullanılan tellerin tutucu aparatı tek bir parçadan oluşmaktadır. Bu parça 3-boyutlu yazıcı üretilmiştir. Bu sayede silindiri iletken tellere göre daha hassas şekilde merkezlemek mümkün olmaktadır. Ayrıca iletken tellerin birbirine göre mesafeleri hassas olarak yerleştirilmesi daha kolay olmaktadır. Bakır silindir ve iletken tel tutucu model görüntüsü aşağıda Şekil 3.21 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Bakır silindir ve iletken tel tutucu modeli

Modelde görüldüğü üzere hız ölçümü yapmak üzere yerleştirilecek izoleli bakır teller için 10 adet yuva yer almaktadır. Bu yuvalar, silindir merkezinin etrafında radyal yönde belirli mesafelerde sonlandırılmıştır. Yuvaların ince olması ve düşük mukavemetli malzemeden üretilmesi düşey seviye farkına neden olabilecektir. Bu yüzden yuvaların silindir merkezine doğru uzanan uçları kendi içinde bir hatla bağlanarak düşey eksendeki seviyeleri eşitlenmeye çalışılmıştır. Silindirin yerleştirileceği merkez konum aparata kalın direklerle bağlanarak teller ile arasındaki mesafe sabitlenmiştir. Böylece düzeneğin kurulumu sırasında yapılacak konumlandırma hatalarının önüne geçilmiştir.

Ateşleme sistemi

Detonasyon reaksiyonunun kararlı hale gelmesinde en önemli etken patlayıcının boy/çap oranıdır. Boy/çap oranı yüksekse detonasyonun kararlı yapıya ulaştığı söylenebilir.

Patlayıcıların infilak hızı testlerinde bu oran genellikle boy/çap oranı 3 değerinin üzerindedir. Hız ölçümü yapan teller, ateşlemenin başlama noktasından 200-250 mm mesafeye yerleştirilmektedir. Bakır silindir iç çapı, yani patlayıcı çapı 25 mm olduğu düşünüldüğünde bu oran 8-10 arasında olmaktadır. Tellerin yerleştirildiği noktaya göre Sistemdeki patlayıcının boy/çap oranı oldukça yüksek olduğu için hız ölçüm sisteminin yerleştirildiği noktada kararlı detonasyona ulaşılacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle silindir genleşme testlerinde hız ölçümü sırasında özel ateşleme sistemi yerine daha basit silindirik yemleme şarjı ile ateşleme tercih edilmiştir. Silindir genleşme test düzeneğinde kullanılacak olan bileşenler belirlenerek malzeme seçimi ve boyutlandırılması yapılmıştır. Kullanılacak bileşenlerin listesi aşağıda Çizelge 3.5 ile verilmiştir.

Çizelge 3.5. Silindir genleşme test düzeneğinde kullanılacak malzeme ve bileşenler

BİLEŞEN/CİHAZ	MALZEME
Ana Test Bileşeni	
Ateşleyici	Elektrikli Fünye
Yemleme Şarjı	C4
Silindir tutma aparatı	Polimer
Silindir	OFHC Bakır
Enerjik Malzeme	
Patlayıcı Katkı	Küresel Alüminyum / LiF
Yüksek Enerjik Malzeme	RDX
Bağlayıcı Malzeme	Polimer
Hız Ölçüm Cihazı ve Veri Toplama Cihazı	
Hız Ölçüm Cihazı	Elektrik iletken tel
Veri Toplama Cihazı	Analog sinyal toplayıcı

Ana test bileşeni, ateşleyici yemleme şarjı, silindir ve silindir tutma aparatından oluşmaktadır. Elektrikli fünye kullanılarak patlayıcı üzerine silindir şeklinde konumlandırılan C4 patlayıcısı ateşlenmekte ve C4 ile bakır silindir içerisindeki ana patlayıcı ateşlenmektedir. Ana patlayıcının ateşlenmesi sonucunda oluşan ürün gazları silindir duvarına yüksek basınç uygulayarak genleşmesine neden olur. Genleşme sırasında silindir duvarı, radyal yönde yerleştirilen açık devre halindeki izoleli bakır tellere sırasıyla çarparak devreleri birer birer kapatır. Kapanan devreler sonucunda analog sinyal toplayıcı sistemde elektriksel sinyal verilerinin zaman göre değişimleri kaydedilir.

4. DENEYSEL VERİLERLE JWŁ PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ İÇİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu bölümde incelenen problemin sayısal metotla çözülmesi için gerekli tanımlamalar yapılmış, çözüm alanı ve çözümde kullanılan korunum denklemleri sunulmuştur. Bunlara ek olarak problemin sınır şartları ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Ayrıca çözümlerde kullanılan sayısal akışkanlar dinamiği paket programı ve çözüm yaklaşımı ile ilgili açıklamalar yapılmıştır.

Detonasyon ürünlerinin parametreleri arasındaki ilişki belirlenirken bazı varsayımlar yapılmıştır:

- Kinematik süreç, genleşme boyunca sabit kabul edilir.
- Metal plaka sıkıştırılmazdır.
- Detonasyon dalgası düzlemsel ve kararlı yapıdadır.
- Gaz ürünlerinin genleşmesi adyabatiktir.
- Patlayıcı malzemenin detonasyon ürünlerine dönüşümünde CJ teorisi kabul edilir.
- Gaz ürünlerinin viskozitesi ihmal edilir.

Sayısal çalışma kısmında, detonasyon ürünlerinin genleşme hareketinin momentum ve enerji denklemleriyle birbirini sağlaması gerekmektedir.

4.1. JWŁ Hal Denklemleri

Patlayıcı uygulamalarında test verilerini analiz etmek için hidrokokodlar kullanılmaktadır. Hidrokokod içerisinde patlayıcıları temsil eden hal denklemleri ise JWŁ denklemleri. Detonasyon reaksiyonu sonucunda genleşen ürün gazların basıncı, JWŁ denkleminin yardımıyla hesaplanarak hidrokokodlardaki şok dalgaları, yüksek uzamalar (İng. strain) ve yüksek uzama hızları (İng. strain rate) yüksek enerjili diğer fiziksel hesaplamalara girdi oluşturur. JWŁ parametrelerinin elde edilmesi için 2 farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi fizikokimyası temeline dayanan termokimyasal hesaplamalardır. Termokimyasal hesaplamalar daha temel bir yaklaşım kullanarak reaktif karışımların istatistiksel çarpışma mekaniği ve moleküller arası itme-çekme kuvvetlerinin ile belirlenir. İkincisi ise deneysel verilerle elde edilen grafiklerin analitik hesaplamalarla benzetilmesidir [22].

Patlayıcı performanslarının hassas bir şekilde çözebilmek için denklem ve parametrelerin malzeme davranışlarını tüm koşullarda temsil edebilmesi gerekmektedir. Detonasyon ürünlerinin adyabatik genişmesini belirlemek için birçok hidrodinamik hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamalar hassas bir şekilde sonuç vermemiştir. JWL denklemi, yüksek hassasiyet ve kolay veri elde edilmesi nedeniyle en sık kullanılan hal denklemdir. LLNL laboratuvarında Lee ve arkadaşları adyabatik genişme için Jones-Wilkins-Lee (JWL) hidrodinamik denklemini geliştirerek 1968 yılında günümüzde kullanılan standart haline getirmiştir [3, 49].

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v}\right)e^{(-R_1 \cdot v)} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v}\right)e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{\omega \cdot E_0}{v} \quad (4.1)$$

Bu denklemde p basınç ve v özgül hacimdir. v , genişen detonasyon ürünlerinin hacim oranını ifade eder. Bu oran, gazların anlık hacminin ilk katı faz hacmine oranıdır. ω , adyabatik üssel katsayısıdır. Gazların sıkışma oranının bir göstergesi olup, basınç atmosfer şartlarına yaklaştıkça değeri, politropik gaz sabitine, γ , yaklaşmaktadır. Genel olarak değeri $\gamma-1$ şeklinde ifade edilebilir. A ve B , basınç katsayılarıdır, birimleri GPa'dır. R_1 ve R_2 ise malzemenin eigenvalue değerleridir. E_0 detonasyon ürünlerinin iç enerjisini ifade eder. Patlayıcı kimyasal enerjisi, izentropik genişmenin başlangıcında izentropik genişme enerjisi ile eş değer olduğundan bazı kaynaklarda E_0 yerine E_s ifadesi kullanılabilmektedir. Enerjinin birimi GPa'dır. JWL denklemdeki üç terim farklı özgül hacim aralıklarında basıncı gösterir.

$$p = \underbrace{Ae^{(-R_1 \cdot v)}}_1 + \underbrace{Be^{(-R_2 \cdot v)}}_2 + \underbrace{Cv^{-(\omega+1)}}_3 \quad (4.2)$$

İlk terim genel olarak düşük hacimde, ikinci terim orta aralıkta ve son terim ise büyük hacimlerde katkı sağlar. JWL denkleminde ω , R_1 , R_2 , A ve B katsayıları genişmenin ilk anlarındaki enerjiyi temsil eder. JWL denkleminin adyabatik genişme süreci üç terim ile kontrol edilmektedir [3].

JWL denklemi, yüksek yoğunluk ve basıncıdaki detonasyon ürünü gazların davranışını iyi temsil edebilmesinin yanı sıra parametrelerinin kolayca elde edilebilmesi ve sayısal akışkan çözümlerinde matematiksel olarak daha kolay ifade edilebilmesi açısından da uygun bir

denklemdir. Ancak, alüminyum gazlaşma kinetiği bakımından yüksek enerjili patlayıcılara göre daha geç reaksiyona girdiği için toplam basınç değişimi ideal olmayan yapıda gerçekleşir. Bu nedenle patlayıcı performansını belirlemek daha zordur. Bu dinamik performansı JWL denklemi içerisinde ifade edebilmek için alüminyumun zamana göre değişen reaksiyon derecesini hesaba katmak gerekmektedir. Baker ve arkadaşları, alüminyumun detonasyon ürünlerinin genişlemesine katkısını ifade etmek için bir terim eklemiştir [50].

Bu ifade Eş. 4.3 ile gösterilmiştir.

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v}\right)e^{(-R_1 \cdot v)} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v}\right)e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{\omega \cdot (E_0 + \lambda \cdot Q)}{v} \quad (4.3)$$

Denklemden enerji malzemenin detonasyon enerjisine $\lambda \cdot Q_{Al}$ terimi eklenmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere JWL denkleminin 1. ve 2. Terimi sırasıyla yüksek basınçta ve düşük genişleme hızındaki eğri bölgesini ifade eder. 2. Terim ise orta yükseklikteki basınç bölgesine kontrol etmektedir. 3. Terim ise genişlemenin son aşamasını yani düşük basınçtaki ancak yüksek genişleme oranı olan bölgeyi kontrol etmektedir. Alüminyum yanma reaksiyonu detonasyon ürünleri ile olduğundan bu enerjinin büyük çoğunluğu son aşamada ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden genişleme enerjisine katkı olarak $\lambda \cdot Q_{Al}$ ifadesi genişleme enerjisine eklenmiştir. Burada λ , alüminyumun yanma derecesini, Q_{Al} ise alüminyumun toplam reaksiyon enerjisini ifade etmektedir. E_0 değeri ise patlayıcının kimyasal enerjisi olarak herhangi bir değişime uğramadığı varsayılmaktadır [51]. Ancak alüminyum reaksiyon sırasında detonasyon ürünlerinin bir kısmını önce tükettiği göz ardı edilmemelidir. Böylece alüminyum reaksiyonu sırasında daha büyük enerji açığa çıkarmadan önce bir miktar enerji absorbe ettiği düşünülebilir.

4.1.1. JWL parametrelerinin deneysel verilerle hesabı için çözüm yaklaşımı

Klasik silindir genişleme testi verilerinden basınç ve özgül hacim bulunması birçok çalışmada ayrıntılı olarak verilmiştir [3, 22, 24, 52-54]. Ancak plaka hızlandırma testi sonucunda da silindir genişlemede olduğu gibi Newton'un basit hareket kanunundan ve Gurney enerji ifadesinden yararlanılmıştır.

Silindir genleşme testinin deneysel verileriyle JWL parametrelerinin hesaplanması için çözüm yaklaşımı

Deneysel çalışmada yöntem; geometrisi belirlenen bakır silindirlerin içindeki patlayıcıların infilak ettirilmesi sonucu bakır silindir duvarının hareket hızı ölçülmesi şeklindedir. Bakır silindir duvarların hızı Bölüm 3.3’de anlatılan tekniklerle ölçülebilmektedir.

Silindir genleşmesi sırasında gazların hacmi silindirin iç yarıçapı ile ifade edilmelidir. Ancak ölçümler dış yarıçapından alınan verilerle gerçekleştirildiği için silindir duvarının hızı, silindir dış yarıçapının, Δr_2 , zamana bağlı değişimi ile elde edilir.

$$\Delta r_2 = r_2 - r_{20} \quad (4.4)$$

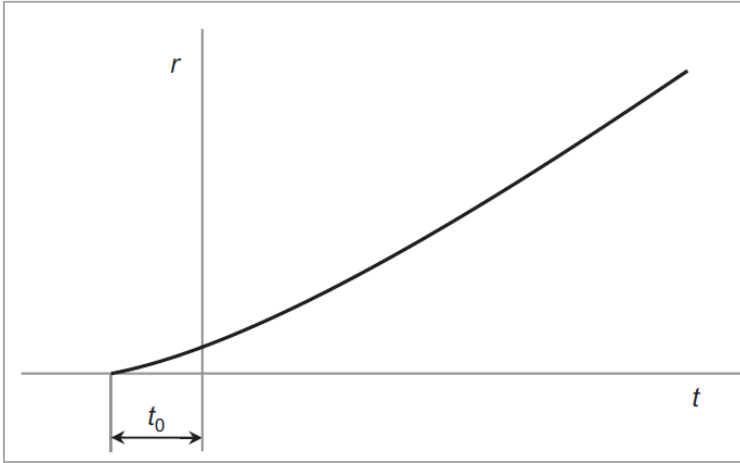
r_2 , silindir dış duvarının anlık yarıçapı ve r_{20} , silindir dış duvarının ilk yarıçapıdır. Ancak silindir genleşmesi sırasında duvar kalınlıkları da değişir ve her noktada aynı değildir. Bu durum silindir genleşme sırasında her iki silindir yüzeyinin de farklı radyal hızlara sahip olduğundan anlaşılmıştır. Ancak katı silindirin sıkıştırılmaz olduğu varsayılırsa silindirin kesit alanı sabittir. Bu nedenle hesaplamalarda ortalama yarıçapı alınmaktadır [53]. Bu nedenle silindirin iç yarıçapı, r_1 ve dış yarıçapı r_2 ’nin ortalaması alınarak ortalama yarıçapı, r_m ile hesaplamalar yapılmaktadır.

$$r_2^2 - r_m^2 = r_m^2 - r_1^2 = \frac{1}{2}(r_{20}^2 - r_{10}^2) \quad (4.5)$$

$$r_m = \sqrt{r_2^2 - \frac{1}{2}(r_{20}^2 - r_{10}^2)} \quad (4.6)$$

$$\Delta r_m = r_m - r_{m0} \quad (4.7)$$

Bu ifadelerle daha önceden belirlenen çaplar için ortalama yarıçaplar hesaplanabilmektedir. Silindir genleşme sırasında hesaplanan ortalama çapların zamana göre değişimi grafik üzerinde gösterildiğinde aşağıda Şekil 4.1 ile gösterilen grafiğe benzer bir eğri elde edilir.



Şekil 4.1. Silindir dış çapının zamana bağlı değişimi [22]

Hesaplamaların başında bu grafiğin doğru ve hassas olarak elde edilmesi, bundan sonraki yapılacak hesapların doğru olması açısından önemlidir. Belirlenen ortalama çapların zamana bağlı değişimi uygun bir fonksiyonla en küçük kareler yöntemiyle belirlenebilmektedir. Literatürde önerilen fonksiyon aşağıda Eş. 4.8 ile verilmiştir.

$$\Delta r_m = a.t - \frac{1}{b}(1 - e^{-b.t}) \quad (4.8)$$

Deneysel verilerle elde edilen konum-zaman eğrisi, Eş. 4.8 ile çizilen eğri ile ifade edilmeye çalışılarak aradaki fark en aza indirilmeye çalışılır. En küçük kareler yöntemiyle benzetilerek a ve b sabitleri bulunur. Elde edilen zamana bağlı konumun zamana göre diferansiyeli alınarak duvar hızı ifadesi elde edilir.

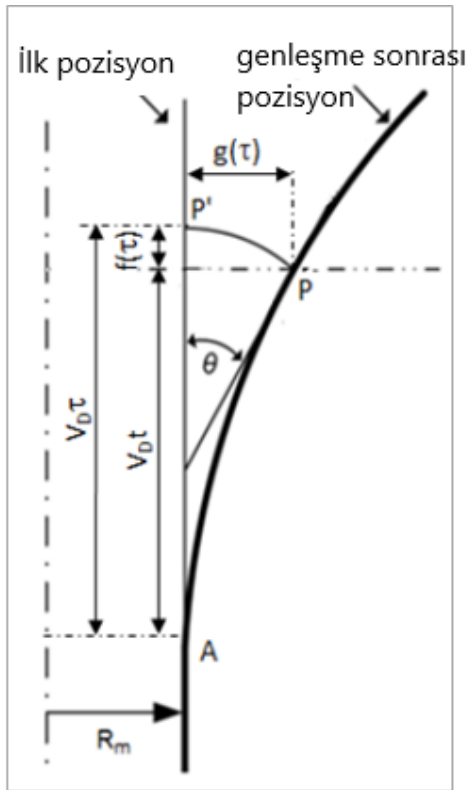
$$V_r = a. \left[\frac{1}{b}(1 - e^{-b.t}) \right] \quad (4.9)$$

$$V_r = \frac{d\Delta r_m}{dt} = a. \left[\frac{1}{b}(1 - e^{-b.t}) \right] \quad (4.10)$$

Yerleştirilen elektriksel izoleli tellerle ölçülen duvar merkezindeki radyal duvar hızı, zamana bağlı değişen fonksiyon yardımıyla ifade edilmiş olur. Silindirin radyal yöndeki hızı, tüm zaman değerleri için hassas şekilde analitik olarak hesaplanabilir. Elde edilen duvar hızı silindirin sabit bir noktasının hızı değildir. Tüm veriler farklı zamanlarda ancak aynı silindire

göre eksenel konumdan alınmaktadır. Silindir duvar hızı, radyal olarak genleşme hızı ile silindire göre eksenel yönde ilerleyen detonasyon hızının etkisiyle bu iki hızın bileşimi yönünde hareket etmektedir. Detonasyon hızı ile duvar hızı arasındaki bu açığa silindir duvarının eğim açısıdır.

Duvar hızının bulunabilmesi için duvarın eğim açısı bulunmalıdır. Bahsedildiği üzere duvar hızı, detonasyon hızı ile radyal yöndeki genleşme hızının bileşenidir. Bu nedenle bu iki hızı vektör kabul edersek aynı zamanda aldıkları mesafe oranı eğim açısını verir. Bu eğim açısının şematik gösterimi aşağıda Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Silindir duvar eğim açısı [22]

Silindir duvarının seçilen noktası, P' için, P noktasından geçen detonasyonun t zaman sonra A noktasına ulaşmıştır. Bu sırada ilk pozisyonu P' olan nokta P noktasına geldiğinde elektriksel telle ölçüm alındığı noktadır.

Buna göre eğim açısı;

$$g(t) = r_m \cdot t - r_{m0} \quad (4.11)$$

$$f(t) = V_D \cdot (\tau - t) \quad (4.12)$$

$$\tan \theta = \frac{d(g(\tau))}{d(V_D \cdot t)} = \frac{d(r_m \cdot t - r_{m0})}{d(V_D \cdot t)} = \frac{1}{V_D} \cdot \frac{dr_m}{dt} \quad (4.13)$$

$$\tan \theta = \frac{V_r}{V_D} \quad (4.14)$$

Sonuç olarak gerçek duvar hızı V_w , $g(\tau)$ ve $f(\tau)$ vektörlerinin hipotenüsüdür. Pisagor teoremi içerisinde Eş. 4.11 ve Eş. 4.12 yerine yazılarak çözümlenir.

$$V_w = \sqrt{\left(\frac{dg(\tau)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{df(\tau)}{dt}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{d(r_m \cdot t - r_{m0})}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{d(V_D \cdot (\tau - t))}{d\tau}\right)^2} \quad (4.15)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 + \frac{1}{V_D} \cdot \left(\frac{d(r_m \cdot t)}{dt}\right)^2} = \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = \sec \theta = \frac{1}{\cos \theta} \quad (4.16)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \cos \theta \quad (4.17)$$

Buna göre Eş. 4.15 yeniden yazılırsa;

$$V_w = \sqrt{\left(\frac{dg(\tau)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{df(\tau)}{dt}\right)^2} = \sqrt{(V_r \cdot \cos \theta)^2 + (V_D \cdot (1 - \cos \theta))^2} \quad (4.18)$$

Eş. 4.14, Eş. 4.18 içerisinde yerine yazılarak tekrar düzenlenirse;

$$V_w = V_D^2 \cdot (2 - 2 \cdot \cos \theta) \quad (4.19)$$

$$V_w = 2V_D \cdot \frac{\sin \theta}{2} \quad (4.20)$$

Böylece deneysel veriler kullanılarak gerçek silindir duvar hızı bulunmuştur. JWL denklemi genişleyen gazın yoğunluğuyla değişen basınç denklemidir. Basınç ise kinetik enerji ile doğrudan ilişkilidir. Kinetik enerjiyi bulmak için metalin duvar hızı kullanılmıştır.

JWL denklemi basınç, özgül hacim ve enerji kavramları ile ifade edilmektedir. Bu denklemin elde edilmesi için detonasyon ürünlerinin metal parçacıkları hızlandırması sonucu hız geçmişinin belirlemek temel prensiptir. Ronald Wilfred Gurney 1940 yılında detonasyon ürünlerinin genişmesi ile metal parçacıklara karşı iş yaparak kazandığı hız, patlayıcının karakteristik özelliği olarak sunmuştur. Parçacık hızına Gurney hızı ve kinetik enerjisine ise Gurney enerjisi olarak ifade edilmiştir. Birçok araştırmada Gurney hızı veya Gurney sabitinin silindir genişleme hesaplarındaki duvar hızına eşit olduğu söylenebilir. Ancak Gurney hızı patlayıcının karakteristik özelliği olarak kabul edilir ve parçacık hızının %99'una eşit olduğu anlık bir hız ifadesidir. Gurney hız ilişkisi Eş. 4.21 ile verilmiştir.

$$V_G = \sqrt{2.E_G} \quad (4.21)$$

Gurney enerji, E_G , detonasyon ürünlerinin genişmesi sırasındaki parçacık hızının kinetik enerjisidir. R.W. Gurney, patlayıcının detonasyonu sonucunda oluşan enerjinin metal duvara aktarılması ile metal kütesinin patlayıcı kütesine oranıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur [55]. Gurney enerji ifadesi Eş. 4.22 ile hesaplanabilmektedir.

$$E_G = \frac{V_w^2}{2} \left(\frac{M}{C_e} + \frac{1}{2} \right) \quad (4.22)$$

M, parçacık kütlesi, C_e , patlayıcı kütlesi ve V ise parçacık hızıdır.

$$M = \pi \cdot \rho_m \cdot (r_{20}^2 - r_{10}^2) \quad (4.23)$$

$$C_e = \pi \cdot \rho \cdot (r_{10}^2) \quad (4.24)$$

Silindir genişleme sırasında zamana bağlı veriler işlenerek parametreler bulunurken farklı hacim durumları için Gurney enerjiden yararlanılmaktadır. Gurney enerjisi, patlayıcının detonasyon ısı ve genişleme enerjisi gibi enerji türleriyle karıştırılmamalıdır. Detonasyon

ısı, CJ noktasındaki denge halinde, patlayıcının reaksiyon sonucu detonasyon ürünlerine dönüşürken oluşan ısıdır. Detonasyon ürünlerinin genleşme enerjisi ise patlayıcının kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünün bir oranını veren patlayıcı parametresidir. Gurney enerjisi ise birim patlayıcı kütlesi başına genleşen ürünlerin ve metal parçacığın son kinetik enerjisidir.

Deneyisel veriler kullanılarak JWL hal denklemi parametrelerinin elde edilmesi için genel denklemlerin verilmesi

JWL parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri Souers tarafından önerilen iterasyon şeklidir [52]. Hesaplama yapılırken genel JWL denklemi, enerji denklemleri cinsinden yazılarak bilinen terimlerle ifade edilerek bazı parametreler hesaplanabilmektedir. JWL parametreleri çözümlenirken CJ teorisinden yararlanılarak CJ noktasındaki sınır şartları kullanılmaktadır. Silindirin genleşme durumu izentropik kabul edilmektedir. Bir sürecin izentropik olabilmesi için çevreyle enerji alış verişinde bulunmadığı durumdur. Ancak detonasyon sonrası silindir duvarlarında ilerleyen şok dalgası enerji değişimi sağlamasına rağmen çok hızlı gerçekleştiği ve kaybettiği enerji çok düşük olduğu için izentropik kabul edilmektedir. İzentropik genleşme sırasında farklı hacim yüzdeleri için izentropik genleşme enerji hesaplanarak; özgül hacme bağlı basının fonksiyonu olan JWL denkleminin diferansiyeli elde edilmektedir. Temel olarak bu eşitlikten ve diğer hidrodinamik denklemlerden yararlanarak parametreler elde edilebilmektedir.

Genel JWL denklemi;

$$p = Ae^{(-R_1 \cdot v)} + Be^{(-R_2 \cdot v)} + Cv^{-(\omega+1)} \quad (4.2)$$

Eş. 4.2 ile verilen JWL denkleminin özgül hacme göre integrali alınırsa detonasyon ürünü gazların iç enerjisi elde edilir. Bu ifade aşağıda Eş. 4.25 ile verilmiştir.

$$E_s = \left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{C}{\omega \cdot v^\omega} \quad (4.25)$$

Bu denklem ile genişleme enerjisi JWL denklemi parametreleriyle elde edilmiş olur. Bu denklemden C katsayısı çekilerek elde edilebilir.

$$C = \omega \cdot v^\omega \cdot \left[E_s - \left(\left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} \right) \right] \quad (4.26)$$

Bununla birlikte JWL denklemi iç enerji cinsinden ifade edilebilir.

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{\omega \cdot E_s}{v} \quad (4.27)$$

JWL denkleminin enerji cinsinden ifade edilmesi

Detonasyon enerjisini hesaplayabilmek için 2 farklı yöntem vardır: a) CJ noktasındaki detonasyon ürünlerinin iç enerjisinden ve detonasyon ürünlerinin şok ile sıkışma enerjisinden türetilir ve b) JWL modeli uygulanarak detonasyon ürünlerinin izentropik genişlemesinden yararlanılarak türetilmektedir. Ancak silindir testi sonucu hesaplanan JWL parametreleriyle elde edilen detonasyon enerjileri, CJ noktasındaki detonasyon ürünlerinden doğrudan elde edilen detonasyon enerji değerlerinden daha düşük iken, izentropik genişleme üzerinden elde edilen detonasyon enerjileriyle örtüşmektedir [55].

Souers, denklemlerinde toplam kimyasal enerjiyi, E_0 , iç enerjiyi, E_s , genişleme enerjisini, E_d ve sıkıştırma enerjisini, E_c , olarak ifade etmektedir. Buna göre başlangıçta $E_0 = E_s$. CJ noktasında enerji eşitlikleri;

$$E_s(v_{CJ}) = E_0 + E_c(v_{CJ}) \quad (4.28)$$

Sıkıştırma enerjisi, E_c , detonasyon ürünü gazların silindir duvarına yaptığı basınç ve özgül hacim cinsinden verilebilir.

$$E_c(v_{CJ}) = \frac{1}{2} \cdot p_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (4.29)$$

Eş. 4.29, Eş. 4.28 içerisinde yerine yazılırsa;

$$E_s = E_0 + \frac{1}{2} \cdot p_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (4.30)$$

E_0 patlayıcının içinde bulunan kimyasal enerjidir. Ancak detonasyon ürünlerinin genişmesi sonsuza ulaştığında tamamen açığa çıkar. Silindirin genişmesi sırasında açığa çıkan enerji hesabı aşağıdaki şekilde yapılır.

$$E_d(v) = [E_s(v_{CJ}) - E_s(v)] + E_c(v_{CJ}) \quad (4.31)$$

Eş. 4.31, Eş. 4.30 ile verilen genişleme enerjisi ile birlikte CJ şartları için çözüldüğünde CJ noktasındaki basınç için aşağıda verilen Eş. 4.32 bulunur.

$$p(v_{CJ}) = A(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v})e^{(-R_1 \cdot v)} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v})e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{\omega}{v} \left(E_0 + \frac{1}{2} \cdot p_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \right) \quad (4.32)$$

Bu denklem tekrar düzenlenirse;

$$p(v_{CJ}) = \frac{A(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v_{CJ}})e^{(-R_1 \cdot v_{CJ})} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v_{CJ}})e^{(-R_2 \cdot v_{CJ})} + \frac{\omega \cdot E_0}{v_{CJ}}}{1 - \frac{\omega \cdot (1 - v_{CJ})}{2 \cdot v_{CJ}}} \quad (4.33)$$

Buna göre JWL denklemi patlayıcının kimyasal enerjisi cinsinden elde edilmiştir.

Detonasyon enerjisinin JWL denklemi cinsinden ifade edilmesi

Patlayıcının kimyasal enerjisi detonasyon sırasında detonasyon enerjisine dönüşür ve hacim sonsuza ulaştığında tüm kimyasal enerji detonasyon enerjisine (negatif) eşit hale gelir. Ancak genişleme anında izentropik genişleme enerjisi azalır ve genişleme hacmi sonsuza ulaştığında sıfır olur.

$$E_d(v) = E_0 - E_s(v) \quad (4.34)$$

İzentropik genleşme enerjisi ise JWL parametreleriyle Eş. 4.25'teki gibi ifade edilmektedir. Bu ifade Eş. 4.34 içinde yerine yazıldığında kimyasal enerji JWL parametreleri cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E_d(v) = E_0 - \left[\left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{C}{\omega \cdot v^\omega} \right] \quad (4.35)$$

Detonasyon enerjisi, E_d , sıkıştırma enerjisine dönüşerek, E_c , silindir genleşme sırasında metal duvarın hızlandırılmasını sağlamaktadır. Önceki bölümlerde açıklanan Gurney enerjisi ise Eş. 4.35 ile verilen E_d , detonasyon enerjisine eşittir. Bu eşitlikten yararlanarak JWL parametreleri bulunur. Silindir genleşme sırasında genleşmenin %25, %50, %75 ve %100 olduğu durumlar için eşleştirme yapılmaktadır. Bu genleşme oranları $v=2,2, 4,4, 7,2$ ve 10 değerlerine tekabül eder [52]. Belirli hacim miktarlarında elde edilen detonasyon enerjileri ile verilen Gurney enerji denklemi ile belirlenir.

Rayleigh ilişkisi kullanılarak CJ noktasındaki basıncın detonasyon hızı cinsinden ifade edilmesi

JWL parametrelerini doğrulamak için sınır koşullarından faydalanılır. Genleşmeye başlama noktası CJ durumu olduğundan CJ noktasındaki detonasyon parametreleri JWL parametreleri cinsinden ifade edilebilmelidir. CJ teoremine göre şok dalgası patlayıcı üzerinde kararlı detonasyon reaksiyonunu gerçekleştirmeye başladığı nokta CJ basıncı olarak adlandırılmaktadır. Bu da Hugoniot denklemlerinden faydalanılarak aşağıda Eş. 4.36 ile verildiği şekilde yazılır.

$$P_{CJ} = \rho \cdot V_D^2 \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (4.36)$$

Bu denklem Rayleigh eğrisini ifade eder. Eş. 4.36 ve Eş. 4.33 patlayıcının CJ basıncı için verilen iki denklem olarak elde edilmiştir. Eş. 4.36, detonasyon hızı gibi ölçülebilen değerler içermektedir. Bu iki eşitlik birbiri ile kıyaslanarak CJ basıncı sınır şartı kabul edilerek JWL parametreleri kontrol edilebilir.

Diğer taraftan detonasyon hızının JWL parametreleri cinsinden ifade edilebilmesi için Eş. 4.2 ile Eş. 4.36'nın özgül hacme göre türevi alınarak birbirine eşitlenebilir.

$$\frac{dp}{dv} = -A.R_1.e^{(-R_1.v)} - B.R_2.e^{(-R_2.v)} - C.(\omega+1).v^{-(\omega+2)} \quad (4.37)$$

$$\frac{dp_{CJ}}{dv} = -\rho.V_D^2 \quad (4.38)$$

Bu denklemler eşitlenerek düzenlendiğinde Eş. 4.39 elde edilir.

$$V_D = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \cdot [A.R_1.e^{(-R_1.v)} + B.R_2.e^{(-R_2.v)} + C.(\omega+1).v^{-(\omega+2)}]} \quad (4.39)$$

Deneysel ölçüm sonucunda elde edilen detonasyon hızı, Eş. 4.39 ile hesaplanan detonasyon hızı ile karşılaştırılır.

Eş. 4.33 ve Eş. 4.36 ile CJ noktasındaki basınçlar karşılaştırılırken deneysel olarak ölçülen detonasyon hızı, Eş. 4.39 ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucunda aradaki fark oranları JWL parametrelerinin yeni değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Fark oranları aşağıda Eş. 4.40, Eş. 4.41, Eş. 4.42 ve Eş. 4.43 ile verilen eşitliklerle hesaplanır;

$$\alpha = \frac{100.(V_{D(hesaplanan)} - V_{D(ölçülen)})}{V_{D(ölçülen)}} \quad (4.40)$$

$$\beta = \frac{100.(p_{CJ(hesaplanan)} - p_{CJ(ölçülen)})}{p_{CJ(ölçülen)}} \quad (4.41)$$

$$\delta(v) = \frac{100.(E_{d(hesaplanan)} - E_{d(ölçülen)})}{E_{d(ölçülen)}} \quad (4.42)$$

$$\delta = \frac{\delta(2,2) + \delta(4,4) + \delta(7,2)}{3} \quad (4.43)$$

Hesaplanan fark oranlarıyla yeni parametreleri hesaplamak için aşağıda verilen Eş. 4.44, Eş. 4.45 ve Eş. 4.46 kullanılmaktadır.

$$bhe_{yeni} = bhe_{eski} + 0,01.\delta \quad (4.44)$$

$$A_{yeni} = (1 - 0,03.\alpha).A_{eski} \quad (4.45)$$

$$B_{yeni} = (1 - 0,03.\beta).B_{eski} \quad (4.46)$$

Bu hesaplar iteratif olarak tekrar ederek fark oranları belirli bir değerin altına inene kadar devam etmektedir. Souers bu oranları $\alpha, \beta < 0,0002$ olarak önermektedir [52]. Ancak adım aralıkları hesaplamalarda farklı alınarak hassasiyet değiştirilebilir. JWL parametreleri hesaplanırken A, B, R1 ve R2 parametrelerinin başlangıç değerleri için literatürde bulunan değerler kullanılabilir. Bu sayede hesaplama yapılırken yüksek iterasyon sayılarına gerekmez ve daha hızlı yakınsayarak sonuç alınabilir. İterasyonlar sırasında R1 ve R2 değerleri sabit alınarak A ve B değerleri belirlenir. Daha sonra hassas değişim için R1 ve R2 değerlerinde değişim yapılabilir.

Genleşmenin başında CJ durumunda olan gazlar, genleşme ilerledikçe ideal gaz durumuna yaklaşır. Bu durumda JWL denkleminin 3. Terimi içerisinde yer alan Gruneisen katsayısı ω , daha baskın hale gelerek genleşme eğrisini kontrol etmektedir. Kesin bir değeri olmamasına rağmen Hornberg bu değerin $0,3 \leq \omega \leq 0,4$ olarak önermiştir [54]. Başlangıç değeri termokimyasal kodlarla belirlenen ω değeri, iterasyonlar tamamlanarak hata oranları belirlenen değerlerin altına düştüğünde aşağıda Eş. 4.47 ile verilen ifadenin logaritması alınarak tekrar hesaplanır.

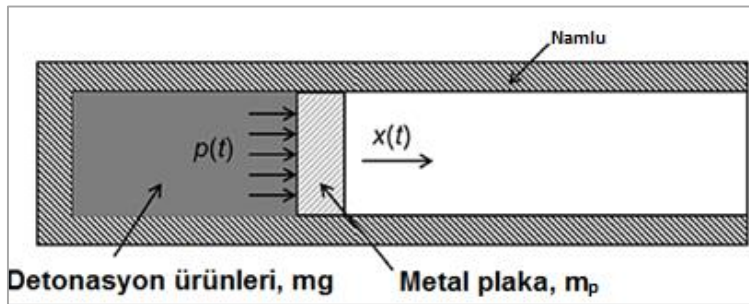
$$0,7^\omega = \frac{E_0 - E_d(v=10)}{E_0 - E_d(v=7)} \quad (4.47)$$

Geleneksel silindir genleşme testi verileriyle JWL parametrelerinin elde edilmesi için yaygın olarak kullanılan algoritmada sınır şartlarını oluşturması bakımından CJ teorisi ile Gurney enerji teorisi önemli yer tutmaktadır. JWL parametrelerinin elde edilmesinde alternatif olarak yol sunan bazı çalışmalar yapılmıştır. Buna göre metal silindirin mukavemet özellikleri kullanılarak detonasyon ürünlerinin basınç değişimi ve enerji değişimi bilgisinden yararlanarak JWL parametrelerini elde etmiştir [22]. Bir başka yöntem ise termokimyasal kod ile hesaplama yöntemidir [56]. Bununla birlikte JWL parametrelerinin

etkinlik analizinin kullanıldığı çalışmalar da yapılmıştır [57]. Ancak tez çalışmasında geleneksel algoritma kullanılmıştır [22, 52, 58]. Buna göre diğer JWL parametreleri sabit tutularak her bir parametrenin değişimiyle basınç-ölgül hacim grafiğinin değişimi incelenmiştir.

Plaka hızlandırma testinin deneysel verileriyle JWL parametrelerinin hesaplanması için çözüm yaklaşımı

Buna göre detonasyon reaksiyon sonucu ürünler genişirken plakaya uyguladığı basınç ile iterek hızlandırırlar. Bunun gösterimi aşağıda Şekil 4.3 ile verilmiştir.



Şekil 4.3. Detonasyon sonrası plakaya etkiyen basınç ve plakanın hareketi

Plaka yüzey alanı biliniyorsa plakaya uygulanan basınç aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir [14].

$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} = p(t) \cdot A_s \quad (4.48)$$

Buradaki basınç detonasyon basıncı değildir, genişleme basıncıdır. CJ şartlarındaki detonasyon şok hızı ile ilerlerken genişleme başlamadan önce plakaya ilk olarak detonasyon basıncı etkir. Bu basınç çok yüksek değerlerde olduğundan plaka üzerinde bazı fiziksel değişimler meydana getirmektedir. Metalin yüzeyine gelen basınç ilk önce elastik dalga oluşturarak diğer yüzeyden yansıyarak geri döner, daha sonra oluşan plastik dalga ile karşılaştığı noktada oluşan basınç eğer metalin mukavemetinden yüksekse bu bölgede parçalanma (İng. spall) oluşturur.

Detonasyon ürünlerinin ölgül hacmi de basit olarak hesaplanabilmektedir. Metal plakanın hız geçmişinin zamana göre integrali alındığında zamana göre konum verileri elde edilebilir.

$$V_p(t) = \frac{dx}{dt} \quad (4.49)$$

Eğer plaka ve detonasyon ürünleri deforme olmayan bir silindir namı içerisnde ise detonasyon ürünlerinin hacmi plaka yüzey alanının aldığı mesafe ile hesaplanabilir [14].

$$v(t) = \frac{x(t).A_s}{m_p} \quad (4.50)$$

4.2. Miller Modeli: Alüminyum Yanma Derecesi Modeli

Eş. 4.3 ile verilen genişletilmiş JWL ifadesindeki λ terimi enerjik malzeme içerisindeki alüminyumun yanma derecesini ifade etmektedir. Bir başka deyişle reaksiyona giren alüminyum kütlelerinin reaksiyona girmeyen alüminyum kütlelerine oranıdır. Bu ifade zamana bağlı değişim gösterdiği için reaksiyon hızı olarak tanımlanabilir. Philip J. Miller ve Guirguis 1993 yılında ortaya atılan bu ifade aşağıda Eş. 4.51 ile verilmiştir.

$$\frac{d\lambda}{dt} = a.(1-\lambda)^m.(p/p_u)^n \quad (4.51)$$

Denklemin zamana bağlı olması nedeniyle λ değerinin dinamik olarak değiştiği genişletilmiş JWL denkleminde TD-JWL (time dependent JWL) olarak adlandırılmıştır. İfadedeki a, m ve n reaksiyon hız ifadesinin sabitleridir. Denkleminde a enerji sabitidir ve alüminyumun tane boyutuna bağlıdır. m, enerji çıkış kuvveti ve n basınç kuvvetidir. Bu sabitler alüminyumun tane şekline bağlıdır p_u referans basıncıdır ve 0,1 Pa olarak alınır. Miller, alüminyum veya amonyum perklorat (AP) kullanılan katkılı patlayıcılarda $m=0,5$ ve $n=0,1667$ vermiştir [51].

4.2.1. Alüminyum yanma derecesi parametrelerinin deneysel verilerle hesabı için çözüm yaklaşımı

Alüminyumun reaksiyona girmesi için hem detonasyon ürünlerinin yeterince oluşması hem de aktifleşme enerjisinin sağlanması gerekmektedir. Genellikle alüminyum reaksiyonunun genleşmeye katkısı reaksiyonun CJ şartlarına ulaşmasından 2-3 μs sonra başlar ve 10-20 μs civarında en yüksek seviyeye ulaşır. Bu zaman aralığı alüminyumun tane boyutuna bağlı

olarak değişim gösterse de ideal detonasyon boyunca $\lambda=0$ kabul edilir. Bu zaman içerisinde alüminyum yalnızca detonasyon ürünleriyle reaksiyona girer ve patlayıcı üretiminde kullanılan askeri standartlardaki konvansiyonel alüminyumun %10-30 kısmı tükenir. Bu bölgedeki reaksiyona anaerobik reaksiyon veya yanma sonrası/ikinci (afterburn/secondary) reaksiyon denir.

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere alüminyum ve amonyum perklorat gibi ideal davranış göstermeyen katkılar detonasyon reaksiyonundan daha sonra detonasyon ürünleriyle reaksiyona girer. Silindir genleşme testi için yüksek enerjik malzemelerin detonasyon süresi 17 μ s zaman sonra tamamlanır. Ancak alüminyum ve amonyum perklorat gibi katkıların reaksiyon süresi 5-100 μ s zaman arasında gerçekleşir [27].

Alüminyum yanma derecesinin belirlenebilmesi için LiF katkılı patlayıcı ve alüminyum katkılı patlayıcı olarak aynı kütleli oranda iki farklı patlayıcı üretilmektedir. LiF detonasyon sırasında inert kabul edilir ve yalnızca fiziksel olarak alüminyum yerine kullanılmaktadır. Bu ikisi arasındaki enerji farkı alüminyum reaksiyonundan gelir. İki farklı patlayıcı ile yapılan iki testten elde edilen plaka hızları için kinetik enerji farkından ve alüminyumun yanma reaksiyon enerjisinden yararlanılır.

$$\Delta E(t) = \eta \cdot Q_{Al} \cdot \omega \cdot \alpha \cdot \lambda(t) \quad (4.52)$$

$Q_{Al}=20,126$ MJ/kg, alüminyum oksidasyon reaksiyon enerjisidir. ω , hazırlanan patlayıcının kalitesidir, α , alüminyumun patlayıcı içerisindeki kütleli oranıdır ve η ise plaka hızlandırma testinin verimidir.

$$\eta = \frac{E_k}{Q_{exp}} \quad (4.53)$$

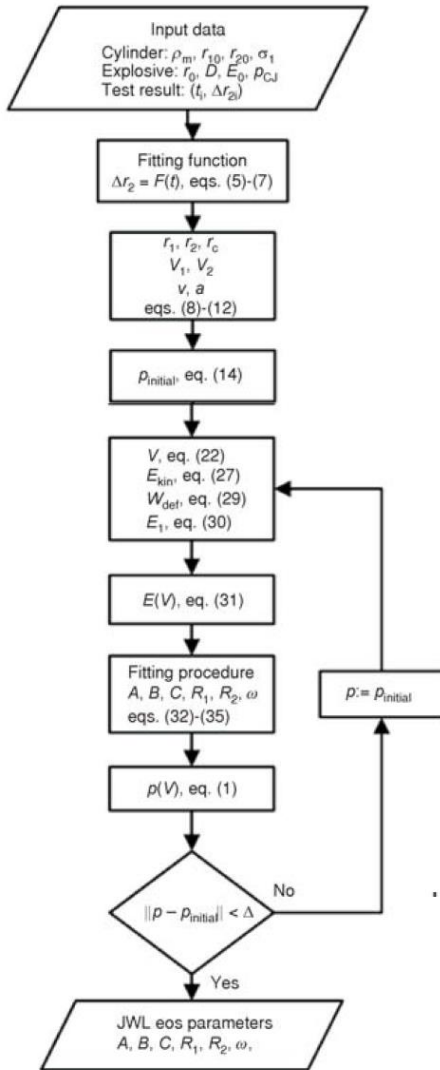
E_k , plakanın en yüksek hıza ulaştığı andaki kinetik enerjidir ve Q_{exp} ise patlayıcının tamamının reaksiyona girdiği patlama reaksiyonu (İng. heat of explosion) enerjisidir. Genellikle 0,173 kabul edilmektedir.

$$\lambda(t) = \frac{1}{2} \frac{m}{\eta \cdot Q_{Al} \cdot \omega \cdot \alpha} (u_{Al}^2(t) - u_{LiF}^2(t)) \quad (4.54)$$

Bu denklem ile zamana bağlı yanma derecesi grafiği çizilebilmektedir. Buradan λ 'nın zamana göre değişimi (diferansiyeli) alınarak $\frac{d\lambda}{dt} - \lambda$ değerlerinin grafiği çizilerek Miller denkleminin a katsayısı bulunur.

4.3. Deneysel JWL Parametrelerinin Hesabı için Matematiksel İşlem Sınırları

JWL parametrelerinin belirlenmesi için gerekli denklemler ve çözümleme algoritması Souers tarafından verilmiştir [52]. Hesaplama adımları aşağıda Şekil 4.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4. JWL parametreleri hesaplama adımları [22]

JWL denklemi deneysel bir denklemdir. Genel olarak genleşme başlangıcı ve belirli bölümlerinden verilerden yararlanılarak parametre sağlanması yapılmaktadır. Patlayıcı detonasyonu gerçekleşirken reaksiyon CJ şartlarında gerçekleşir. Burada reaksiyon şok hızında ilerler ve kısmen dengededir. CJ noktası detonasyon ürünlerinin genleşmesi için bir sınır şart oluşur ve CJ teorisine göre bu denge reaksiyon üzerinde çözümlenmesi daha kolay olacaktır. CJ noktasında, metal parçacığın Gurney enerjisinden yararlanılarak detonasyon ürünlerinin genleşme modeli ile eşleştirilir. Detonasyon ürünlerinin genleşmesi izentropik olarak kabul edilir. Ancak Gruneisen tipi bir genleşme ideal gaz yaklaşımında olduğu için izentropik olmaktan uzaktır. Bu nedenle JWL denkleminde Gruneisen katsayısı ω yerine adyabatik kuvvet olarak kullanılan $(\omega+1)$ ifadesi kullanılmıştır.

Souers iterasyonlardaki fark oranı katsayılarının 0,03 ve 0,05 olmasını önermiştir. Bu sayılar ne kadar büyükse daha büyük adımlarla iterasyon ilerler. Ancak bu şekilde sonuçların ıraksaması gibi problemler çıkabilir. Bu nedenle bu değerlerin küçük seçilmesi iterasyon sayısını arttırmasına rağmen daha güvenli ilerlemesini yardımcı olur. Bu çalışmada hata oran katsayıları 0,003 ve 0,005 olarak alınmıştır. İterasyonların α ve β değerleri $< 0,0002$ değerine ulaşınca kadar devam edilmesi önerilmektedir. İterasyonlar sırasında öncelikle A, B, R1, R2 ve ω değeri tahmin edilir V_{CJ} değeri ise başlangıç değeri olarak termokimyasal koddan bulunan bir değer olarak alınır. R1, R2 ve w değeri ilk tahminler olarak sabit bırakılır. Her iterasyonda hata oranlarına göre A, B ve V_{CJ} değerleri değiştirilir. Başlangıç değerlerinin olabildiğince sağlıklı seçilmesi sonuçların ıraksamasını ve daha çabuk sonuca ulaşmasını sağlar. Alınan değerlerin temel kriterler aşağıda sunulmuştur.

Bunlardan;

- $R1 > R2$,
- $R1 + R2 \sim 6$
- $V_{CJ} < 0,91$
- E_0 değeri sabittir,
- E_s değeri giderek azalır (genleşme kapasitesi olarak düşünülebilir). Sonuçta $E_s = 0$ değerine yakınsar.
- E_d değeri başlangıçta sıkıştırma enerjisidir ve negatiftir. Genleşme boyunca giderek artar ve E_0 değerine yakınsar.

- $B > 0$ ve $C > 0$
- $E_0 < Q_e$

Eğer parametrelere göre eğri deneysel veriler ile örtüşmüyorsa R_1 ve R_2 değeri aşağı ve yukarı olarak 0,1 adımlarla değiştirilebilir. ω değeri yukarı ve aşağı 0,01 adımlarla değiştirilebilir. Eğer patlayıcı yoğunluğu yüksekse $R_1 \sim 4,6$ ve $R_2 \sim 1,4$ olabilirken patlayıcı yoğunluğu daha az ise $R_1 \sim 5$ ve $R_2 \sim 1$ alınabilir. Ancak bunlar başlangıç noktalarıdır. Buradan başlayarak $R_1 \sim 6$ ve $R_2 \sim 2,5$ değerlerine de ulaşılabilir. Burada esas önemli olan gazların genleşmesi sırasında %25, %50 ve %75 hacimsel artış noktalarındaki enerji yoğunluğunun ve CJ noktası şartlarının doğru belirlenmesidir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alüminyum katkılı patlayıcıların TD-JWL parametrelerini elde edebilmek için deneysel çalışmalar iki farklı yöntemle yapılmıştır. Bu testler ve testlerin başarılı olması için ek uygulamalar sırasıyla aşağıda verilmiştir;

- Plaka Hızlandırma testleri
 - Empedans eşleştirme
 - PDV cihazı
- Silindir genleşme testleri

Bu çalışmalar ilk olarak daha düşük maliyetle, daha hızlı bir şekilde ve aynı testle daha çok veri alınabilen plaka hızlandırma testleri yapılmıştır. Plaka hızlandırma testinde metal plaka hızının zamanla değişimi belirli bir süre ölçülerek patlayıcının detonasyon ürünü gazlarının genleşme enerjisi hesaplanmaktadır. Bu genleşme enerjisi ise bazı matematiksel formülasyonlarla ifade edilerek JWL hal denklemi elde edilir. Test maliyetlerini etkileyen en önemli malzemelerden biri patlayıcı miktarıdır. Maliyet kalemlerinin başında patlayıcı malzemesinin tedarik edilmesi ile hazırlanması için tahsis edilen cihazlar ve iş gücü gelmektedir. Ayrıca ölçümün belirli test miktarı kadar tekrar kullanılabilen namı içinde olması ve hız ölçüm sisteminde sarfiyatın olmaması maliyeti düşüren diğer etkenlerdir. Bununla birlikte hız ölçümü için kullanılan VISAR cihazı oldukça hassas ölçüm yapabilmektedir. Kullanılan VISAR cihazı 0,4 ns aralıklarla veri alınmasını sağlamaktadır. Bu veri alma sıklığı plakanın en yüksek ivmeye sahip olduğu ilk 5 μ s süresince 0 m/s hızdan 2000 m/s hıza çıktığı durum için yeterli hassasiyeti sağlayabilmektedir. Hız ölçümü metal plakanın serbest yüzeyinin hareketini ifade etmektedir. Ancak yüksek basınçla karşılaşan metal malzemelerde elastik ve plastik dalgalar meydana gelerek ani elastik ve plastik deformasyonlar meydana gelir. Bu durum ise hassas ölçüm yapan bir cihaz için serbest yüzey hızı ile bu dalga hızlarının da birlikte ölçümünü gerçekleştirir. Ancak elastik dalgaların mekaniği gereği ani yüksek ivmelenme sonrasında geri çekilmeler meydana gelmektedir. VISAR cihazı gibi yüksek veri alma hızına sahip interferometre cihazlarında bu ivmelenme görülerek plakanın bazı mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bu yönüyle plaka hızlandırma test yöntemi ilk olarak denenmiştir. Test düzeneğinin kurulumu kapsamında namı, metal plaka, patlayıcı ve düzlemsel dalga merceği gibi birçok parça SPEED hidrokodunda çözümlemeleri yapılarak uygun

boyutlandırmalar yapılmış, katı model programlarında tasarlanarak üretilmiştir. Kurulan test düzeneğinde yapılan test çalışmaları neticesinde başarılı sonuçlar alınamamıştır.

VISAR cihazı ürettiği lazer ışınını gönderip yansıma yüzeyinden gelen ışın ile birlikte iki ışının arasındaki dalga boyu farkından yararlanarak ölçüm gerçekleştirilmektedir. Ölçüm sistemi olarak kullanılan VISAR cihazının metal plakanın uzun uçuş süresince oluşan deformasyon ve eksen bozulması nedeniyle metal plaka üzerinden yansıyan lazer ışını toplanamamış, ölçüm gerçekleştirilmediğinden başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Test düzeneğinin kurulumu ve sağlıklı veri almak için bazı ek düzeltmeler yapılarak geliştirmeye çalışılmıştır. Bunun için düzlemsel dalga merceği ve empedans eşleştirme yöntemi denense de uygulamada sağlıklı sonuç alınamamıştır. VISAR hız ölçüm sisteminin plaka hızlandırma gibi uzun veri alma sürelerinde veri alabilmesi mümkün olmadığından test düzeneği için daha uygun olan PDV cihazı alternatif olarak önerilmiştir. Bu cihaz yüksek maliyeti ve tedarik durumundaki diğer problemler nedeniyle test çalışmasına dâhil edilemeyerek diğer bir test düzeneği için çalışmalar yapılmıştır.

Deney çalışmaları kapsamında kurulan diğer bir düzene silindir genleşme test düzeneğidir. Silindir genleşme test düzeneği JWL hal denkleminin parametrelerini bulabilmek için geliştirilmiş, ilk kullanılan test yöntemidir. Kurulumu basit ve birçok çalışmada doğrulaması yapılmıştır. Bu test yönteminde silindir duvar hızı ölçülerek genleşme enerjisi elde edilmektedir. Genleşme enerjisi, plaka hızlandırma test sonucunda olduğu gibi aynı matematiksel formülasyonlarla ifade edilerek JWL hal denklemi elde edilir. Silindir genleşme test düzeneği basit olmasına rağmen alüminyum katkılı patlayıcılar için çok sık kullanılmamaktadır. Alüminyumlu patlayıcıların kritik çapı, yani ateşlemek için gereken en düşük çap, katkılı olmayan patlayıcılara göre daha yüksek olduğundan test maliyetleri artabilmektedir. Gelecek dönemde daha yüksek alüminyum kütle oranına sahip patlayıcıların testleri yapılabileceği düşüncesiyle bu yöntemin test maliyetlerini arttırabileceği düşünülmektedir. Ayrıca plaka hızlandırma test düzeneğinde başarılı sonuçlar alınamayan VISAR cihazı bu test düzeneğinde de kullanılamamıştır. Bu nedenle test maliyetlerinin düşürülmesi ve hassas sonuçlarına alınabilmesi için özel bir model ve hız ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu hız ölçüm sistemi oldukça basit ve infilak hızlarında kullanılan dış yüzeyi elektriksel olarak yalıtkan bakır tellerden oluşmaktadır. Standart testlerde bu bakır teller yerine daha hızlı veri alınmasını sağlayan iyonizasyon telleri (İng. pin) kullanılmaktadır. Test düzeneğinin daha basit olması için bakır telleri ve patlayıcı dolu

silindiri bir arada tutan aparat modellenmiştir. Bu aparat katı model programında tasarlanarak 3-boyutlu yazıcıda üretimi gerçekleştirilmiştir. Silindir genleşme testleri sonucunda başarılı veriler alınmış, deneysel verilerle JWL parametreleri hesaplanmıştır. Farklı tipteki patlayıcılarla yapılan testlerle test yöntemi pekiştirilerek test yöntemi kolay uygulanabilir hale getirilmiştir.

5.1. JWL Parametreleri Belirlenecek Olan Patlayıcılar ve Test Matrisi

Başarılı veri alınan silindir genleşme testlerinde JWL hal denklemini bulmak için farklı tipte patlayıcılarla çalışılmıştır. Tez çalışmasının nihai amacı alüminyum katkılı patlayıcıların zamana bağlı JWL hal denkleminin parametrelerinin bulunmasıdır. Alüminyum katkılı patlayıcıların detonasyon sonrası genleşmeleri sırasında ideal olmayan davranış gösterdiklerinden aynı testler ideal davranış gösteren patlayıcılarla da denenmiştir. Yapılacak test çalışmalarının sayısı, patlayıcı tipleri ve patlayıcıların içerdiği katkı malzemelerinin tane boyutları Çizelge 5.1 ile verilmiştir.

Çizelge 5.1. Patlayıcı üretiminde kullanılacak malzeme özellikleri

No.	Test Sayısı	Patlayıcı Tipi	Benzer Patlayıcı Tipi	Al/LiF Tane Boyutu [μm]
1	3	S110	PBXN110	-
2	3	S109 (Al)	PBXN109	10
3	3	S109 (LiF)	-	60

Yüksek enerjik malzeme içeriğine sahip olan ve detonasyonu sonrası ideal davranış gösteren S110 patlayıcısı kullanılmıştır. S110 patlayıcısı literatürde PBXN110 olarak bilinen patlayıcının benzeri olarak üretilmiştir. S109 patlayıcıları ise literatürde PBXN109 olarak bilinen patlayıcının katkı malzemesine göre farklı çeşitleridir. S109 (Al) patlayıcısı alüminyum katkısına sahip ve ideal olmayan davranış gösteren bir patlayıcı olarak üretilmiştir. S109 (LiF) ise aynı patlayıcının alüminyumlu aynı kütleli orana sahip ancak LiF katkısına sahip olan patlayıcıdır. S109 (LiF) içerdiği LiF içeriği alüminyum fiziksel olarak temsil eden ancak alüminyum gibi reaktif olmayan bir katkı malzemesidir. Bu yönüyle S109 (LiF) patlayıcısı ideal davranış göstermesi beklenir.

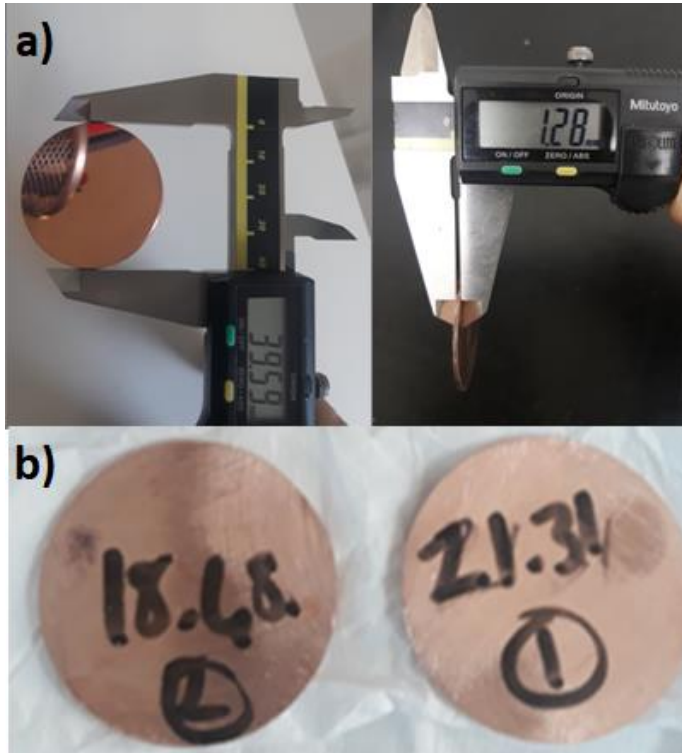
Bu patlayıcılar için deneysel sonuçlar kullanılarak JWL hal denkleminin parametreleri elde edilmiştir. Deneysel JWL parametreleri ile birlikte benzer patlayıcı tipleri için hem

termokimyasal kod hem de literatürden JWL parametreleri bulunarak SPEED hidrokoduna girdi olarak sağlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.2. Plaka Hızlandırma Testleri

Plaka hızlandırma testlerinde kullanılan tüm bileşenler tasarlanarak boyutlandırılmıştı. Bu bölümde tasarlanan parçaların üretimleri yapılarak test düzeneğinin kurulumu ve testlerin yapılmaya başlanması anlatılmıştır. OFHC bakır plaka malzemesi nedeniyle görece zor tedarik edilmektedir. Ø40 mm çapında OFHC bakır malzemeden bakır silindirin tedarik süreci başlatılmıştır. Bununla birlikte patlayıcı üretimleri, namlunun üretimi SAGE altyapısında gerçekleştirilmiştir. Ateşleme sistemindeki bazı parçalar yine SAGE altyapısında 3-boyutlu yazıcıda polimer malzemelerden üretilmiştir. Bazı parçaların malzemesinin tedariki beklenirken malzemeleri mevcut olan parçaların üretim süreci başlatılmıştır.

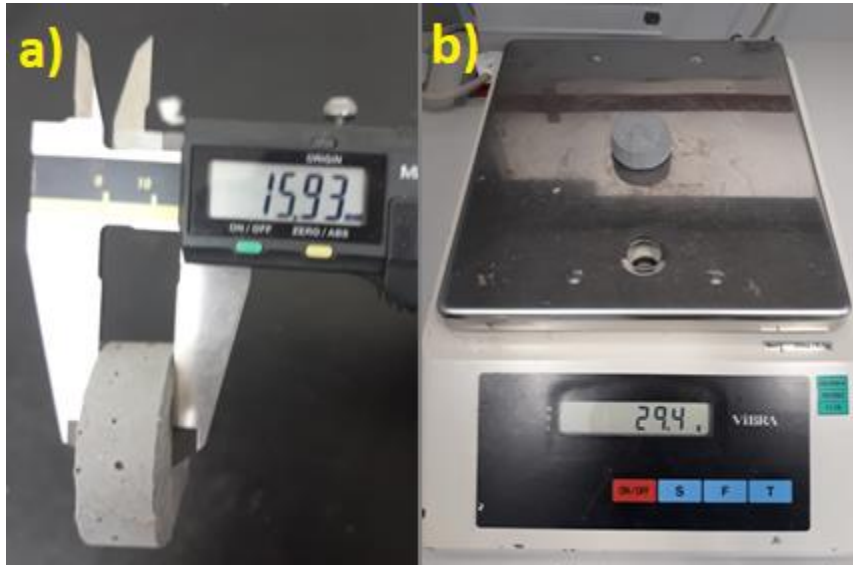
OFHC bakır plaka tasarlandığı boyutlarda üretimi gerçekleştirilmiştir. Bakır plaka boyutları ve ağırlık değerleri sırasıyla aşağıda Resim 5.1 ile verilmiştir.



Resim 5.1. Plaka hızlandırma testi öncesinde üretilen OFHC bakır plakanın a) boyut ölçümleri b) kütle ölçümleri

Üretilen bakır plaka için çap değeri, namlu iç çapına uygun olarak Ø40 mm olarak belirlenmiştir. Ancak namlu içine yerleştirilirken serbest hareketin sağlanması için 0,3-0,5 mm eksi tolerans ile daha düşük çapta üretilmiştir. VISAR cihazından ölçüm alınabilmesi için plakaların bir yüzeyi zımpara ile parlatılarak daha yansıtıcı bir yüzey elde edilmiştir. Plakanın kalınlık değerleri, plakanın kesilmesi ve sonrasında yapılan zımparalama işlemi nedeniyle 1 mm kalınlık elde edilememiştir. Kalınlığı 1-1,4 mm arasında üretilmiştir. Plakaların kütleleri de ölçülerek parlak olmayan yüzeyine kaydedilmiştir. Plaka kütle bilgisi hız ölçüm sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde plakanın kinetik enerjisi hesaplanabilecektir. Plaka kinetik enerjisi ise patlayıcının detonasyonu sonrasında ürün gazların genleşme enerjisinin elde edilmesi için kullanılacaktır.

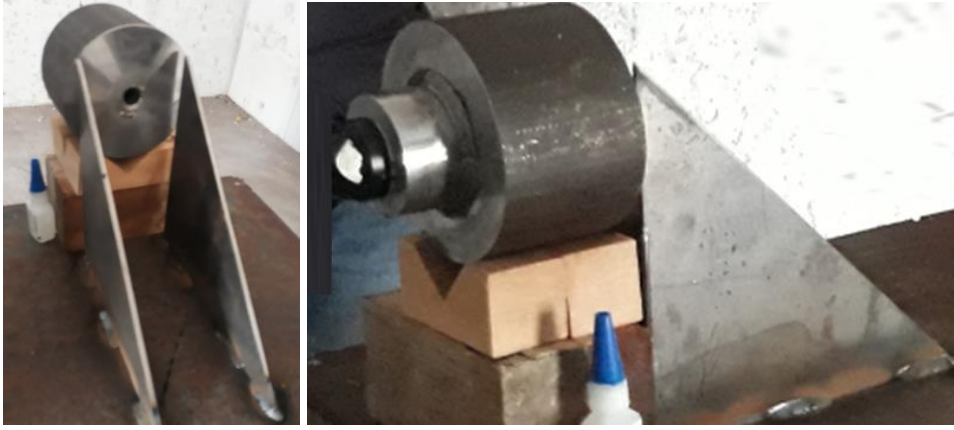
Plaka hızlandırma testlerinde kullanılan patlayıcının boyut ve kütle ölçümleri aşağıda Resim 5.2 ile verilmiştir.



Resim 5.2. Plaka hızlandırma testi öncesinde patlayıcının a) boyut ölçümleri b) kütle ölçümleri

Plastik bağlı patlayıcı malzemeler döküm yoluyla üretildiği için boyutları çok hassas olmamaktadır. Bu nedenle test şartlarına uygun olacak şekilde son boyut verilebilmektedir. Patlayıcı kütlesi bu boyutlara göre değişim gösterebildiğinden belirli bir değerde bulunamayabilir. Ancak karşılaştırma yapılacak LiF katkılı patlayıcıların aynı kütlede olması beklenmektedir.

Plaka ve patlayıcı bitişik halde hazırlanarak plakanın parlak yüzeyi namlu dışına bakacak şekilde namluya yerleştirilir. Plaka hızlandırma düzeneğine ait namlunun görüntüsü aşağıda Resim 5.3 ile verilmiştir.



Resim 5.3. Plaka hızlandırma test düzeneğinde kullanılan namlu

Namlu çelik malzemeden üretilmiş ancak üretimi hurda parçalardan yapılmıştır. Hurdaya ayrılan parçanın çapı, tasarlanan modelin çapından daha büyük olduğundan kullanım için uygun görülmüştür. İç çap olarak tasarım modeline bağlı kalınan parçanın et kalınlığı tasarım modelinden daha büyük olması nedeniyle namlu içinde oluşan patlama esnasında daha az hasar görmesi ve tekrar kullanılabileceği test sayısının artacağı düşünülmüştür.

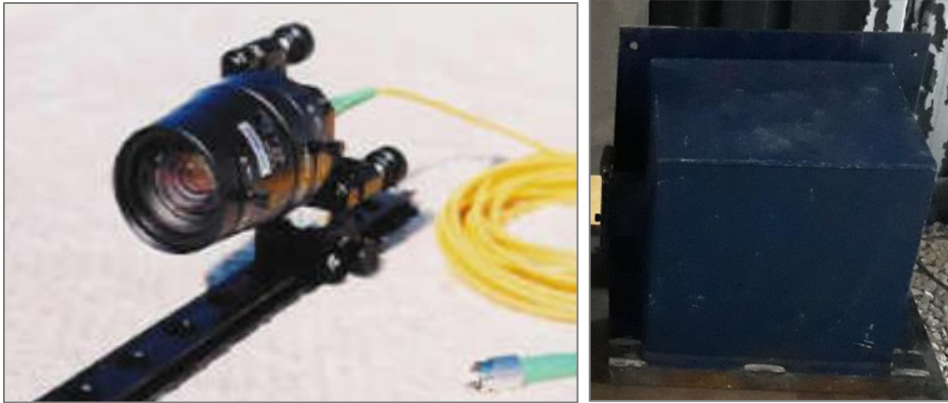
Patlayıcının ve metal plakanın namlu içerisine yerleştirilmesi sonrasında ateşleme sistemi namlunun diğer ucuna takılarak teste hazır hale getirilmiştir. Testlerde kullanılan düzlemsel dalga şekillendirici görüntüleri aşağıda Resim 5.4 ile gösterilmiştir.



Resim 5.4. Düzlemsel dalga merceğine ait yemleme şarjı kılıfı ve dalga şekillendirici

Yemleme şarjı kılıfı, yemleme şarjı ve dalga şekillendiricinin bir bütün olarak düzlemsel dalga merceğini oluşturmaktadır. Yemleme şarjı kılıfı koni şeklinde tasarlanarak detonasyonun daha hızlı şekilde kararlı hale getirilmesi hedeflenmiştir. Yemleme şarjı kılıfının küçük çaplı ucunda yemleme şarjını ateşlemek üzere detonator bağlanmaktadır. Kılıfın içine şok basıncına daha duyarlı patlayıcı koyularak üzerine dalga şekillendirici kapatılması ile bütünlenir. Dalga şekillendirici için düz silindirik kısım olan PAD ve yarı küresel şekille bir bütün olarak tasarlanarak üretilmiştir. Dalga şekillendiricinin amacı plakaya düzlemsel bir şok dalgasının iletilmesini sağlayarak plakanın uçuş sırasında düzleminin bozulmaması hedeflenmiştir. Hem yemleme şarjı kılıfı hem de dalga şekillendirici üretimleri SAGE’de 3-boyutlu yazıcı ile yapılmıştır.

Patlayıcı ve plaka birlikte namlu içerisine yerleştirilerek VISAR cihazının lazer ışınını gönderdiği lensi ile hizalanmıştır. VISAR cihazının optik lens görüntüsü aşağıda Resim 5.5 ile verilmiştir.



Resim 5.5. VISAR cihazına ait optik lens ve optik lensin koruma kutusu

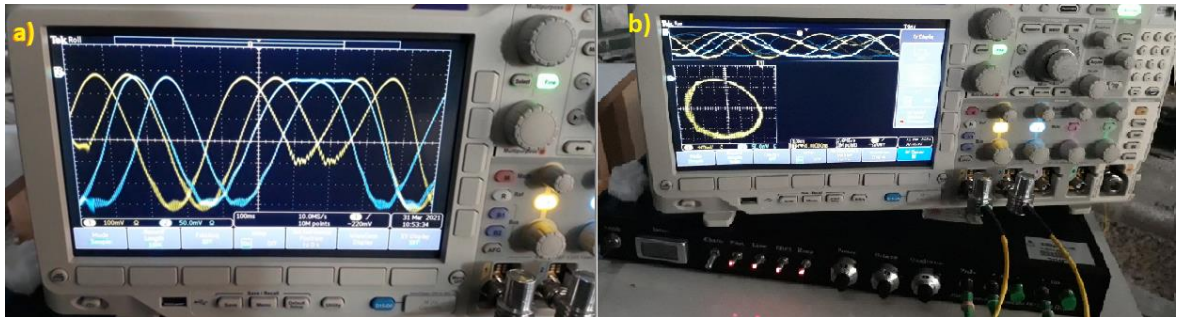
Testte kullanılan VISAR cihazı, optik lens, fiber optik kablolar ile osiloskop cihazı patlama sonucundaki basınç dalgalarından etkilenmemesi için koruyucu önlemler alınmaktadır. Bunun için optik lens çelik koruma kutusu içerisine koyularak önüne balistik cam koyulmuştur. Ancak patlama sonrası basınç dalgası daha geniş bir alanda yayılarak sisteme zarar verebilmektedir. Bu nedenle lens ve plaka hızlandırma sistemi arasında 10 mm kalınlıkta plaka koyulmuştur. Plaka üzerinde lazer ışınının gönderilip yansıyan ışının dönebileceği küçük bir açıklık bırakılmıştır. 10 mm kalınlığındaki koruyucu plakaya ait görüntü aşağıda Resim 5.6 ile gösterilmiştir.



Resim 5.6. 10 mm kalınlığında koruyucu plaka

VISAR hız ölçüm sisteminin lazer ışını gönderen ve toplayan lens sarf edilebilir olmadığından çok sayıda koruyucu önlemler alınmıştır. Bunlardan biri de namlu ve lens arasına kaynakla sabitlenen 10 mm kalınlığında çelik plakadır. Namlu içinden saçılan bakır plaka parçacıkları lense zarar verebilmektedir. Yukarıda Resim 5.6 ile gösterilen görüntüde plakanın ortasından yalnızca lazer ışınının gidip geri dönebileceği açıklık bırakılmıştır. Açıklık çevresindeki tahribatsa deneme testleri sırasında namlu içinden kurtulan plakanın parçaları neden olmuştur.

VISAR cihazından gönderilerek parlatılmış OFHC plakadan yansıyan lazer ışının oluşturduğu sinüs ve kosinüs dalgaları osiloskop cihazında görüntülenmiştir. Osiloskop cihazındaki dalgaların görüntüsü aşağıda Resim 5.7 ile verilmiştir.

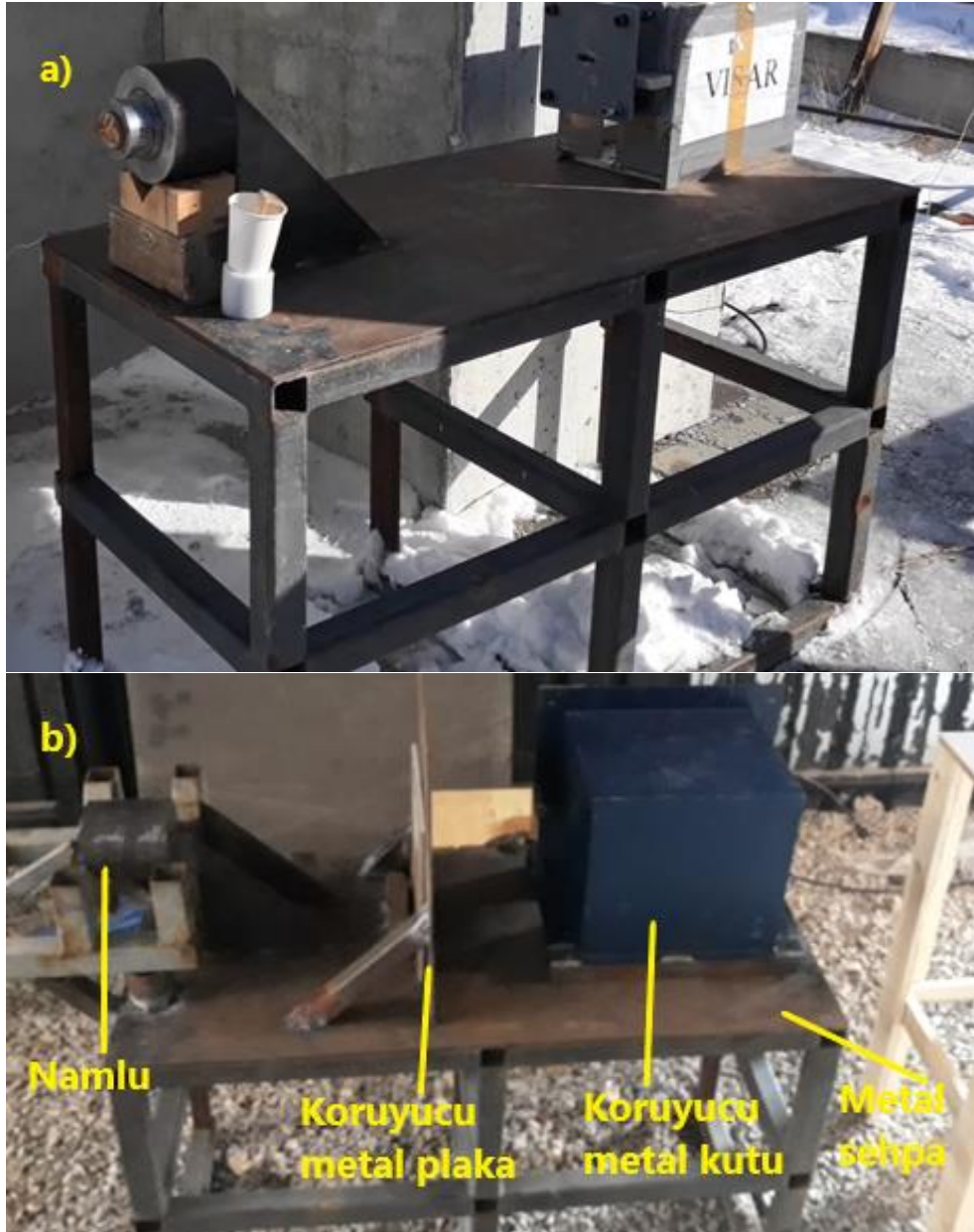


Resim 5.7. Lazer ışınının yansıması sonucu osiloskopta okunan a) sinüs ve kosinüs dalgaları b) Lissajous şekli

Sinüs ve kosinüs dalgaları arasında 45° kadar faz farkı olduğu görülmektedir. Bu durum ölçüm alınabilmesi için uygun konumda olduğunu gösterir. Dalga genlikleri ise gelen sinyalin yeteri kadar güçlü olduğunu ifade eder. Dalga çizgilerinin üzerinde oluşabilecek

kalınlaşmalar sinyalin gürültülü olduğunu ve ölçüm hassasiyetinin düşük olabileceğini belirtmektedir. Ancak yukarıda görülen Resim 5.7 ile verilen görüntüde gürültünün çok düşük olduğu görülmektedir.

Plaka hızlandırma test düzeneği aşağıda Resim 5.8 ile verilen görüntüde gösterilmiştir.

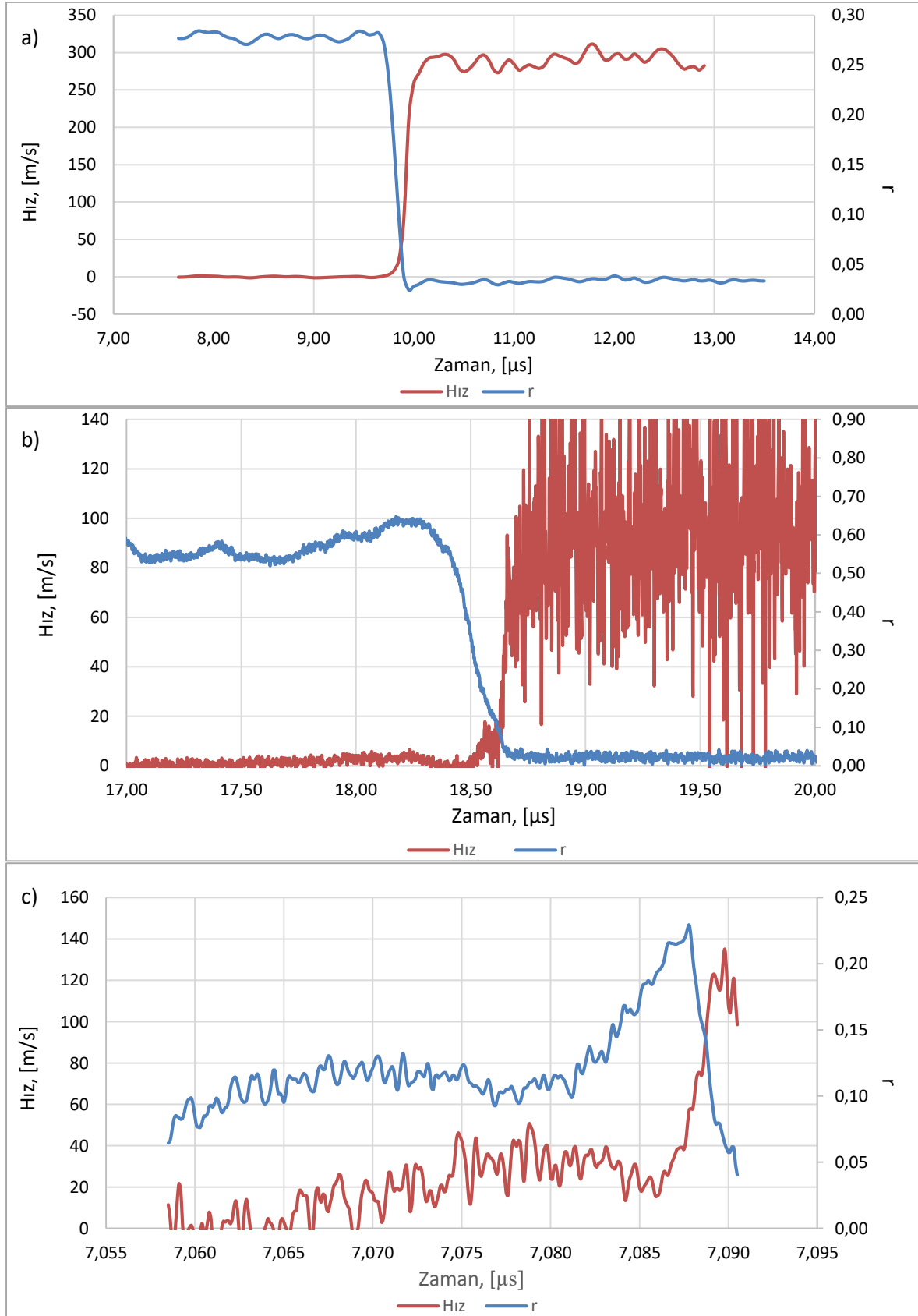


Resim 5.8. Plaka hızlandırma test düzeneği a) düzeneğin ilk durumu, b) düzeneğin son durumu

Namlu içerisinde daha önceki deney düzeneklerinin tasarımı kısmında anlatıldığı üzere patlayıcı ve bakır plaka bulunmaktadır. Ateşleme sistemi ise çevre güvenliği nedeniyle

yalnızca test aşamasında takıldığından fotoğrafta görülememektedir. Sehpanın orta kısmında Resim 5.6 ile gösterilen koruyucu plaka, test düzeneğinin ilk kurulumu sırasında bulunmazken (bkz. Resim 5.8 (a)) deneme testleri sonrasında lensin metal koruyucu kutusu hasar gördüğünden yerine yenisi, mavi renkte koruyucu metal kutu ürettirilmiştir. Bu kutu içerisinde VISAR cihazının lensi muhafaza edilmektedir. Bunun üzerine ek önlem olarak koruyucu metal plaka üretimi yapılmıştır. Koruyucu plakanın üzerindeki tahribattan anlaşılacağı üzere bakır plaka parçaları lens tarafına geçebilmektedir. Bu nedenle bir tane daha koruyucu önlem olacak şekilde metal kutu ve metal kutu ile lens arasına balistik cam koyulmuştur. Alınan önlemlerle oluşturulan düzeneğin son durumu Resim 5.8 b) ile gösterilmiştir.

Plaka hızlandırma test düzeneğiyle yaklaşık olarak 9 deneme testi yapılmış ve her birinde başarısız olunmuştur. Bu testlerden çok kısa bir süre içinde anlamlı veri oluşan 3 testte veri alınabildiği görülmüştür. Yapılan testler sonucunda alınan VISAR cihazının 4 kanalından alınan gerilim verileri normalizasyon kodunda çalıştırılarak işlenmiştir. Aşağıdaki grafiğin r katsayısı ve zaman geçmişi ile ilgili veri alınabilen 6, 8 ve 9 testlerine ait grafikler aşağıda Şekil 5.1 ile verilmiştir.



Şekil 5.1. Test 4 için r katsayısının zamana bağlı değişimi a) test6, b) test8, c) test9

VISAR veri işleme kodunda anlamlı verinin elde edildiği gösteren r katsayısı vardır. Yansıma sonucu VISAR cihazına geri dönen lazer ışının anlamlı veri noktasında verinin doğru olduğunu gösteren r katsayısı bulunmaktadır. Hesaplama sonucunda $r < 0,05$ değeri altına düştüğünde hesaplanan hız verilerinin doğru olarak kabul edilmemektedir.

Grafikler incelendiğinde, detonasyon dalgasının plakaya çarpması sonrası plakada oluşan stres dalgasının dağılarak elastik basamak görülebilmektedir. İkinci basamak olarak ise plastik dalganın görülmesi beklenmekte ancak plastik dalga görülememektedir. Daha önce açıklandığı üzere plakanın hareket etmesini sağlayan elastik dalgalarıdır. Elastik dalga serbest yüzeye çarpıp geri döndüğünde plaka hareket etmeye başlamaktadır. 1 μ s boyunca beklenen verinin alınması sonrasında hız verilerinin düzensiz hal aldığı ve yansıtıcılığın bozulduğunu düşünülmektedir.

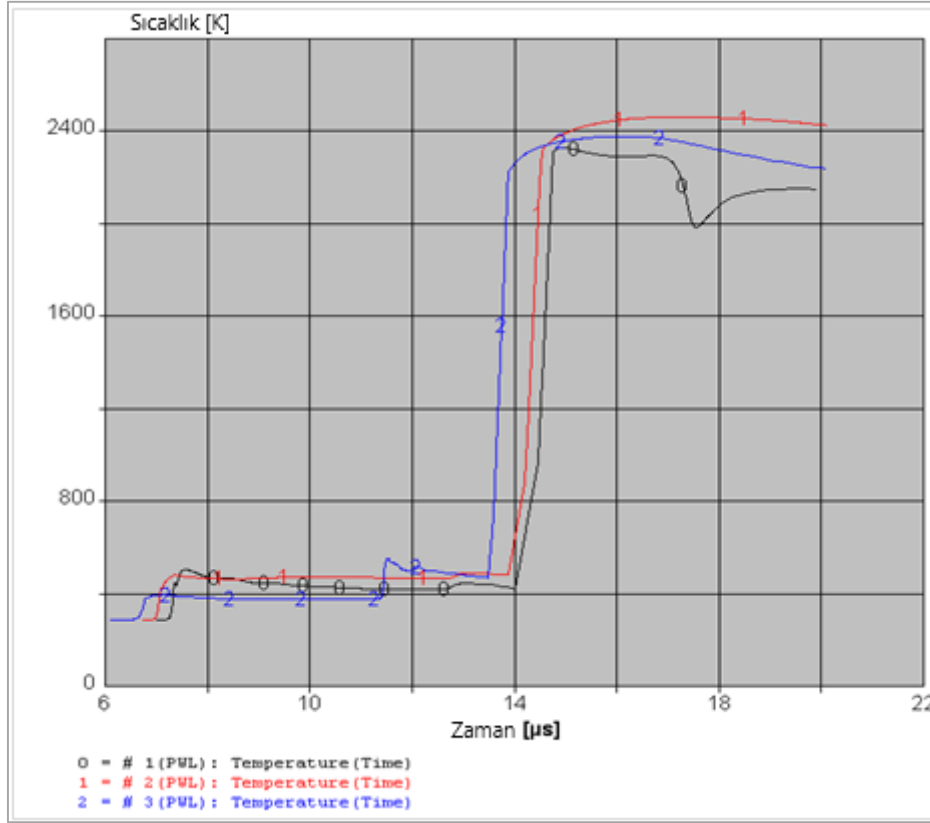
Yapılan 9 denemenin çoğunda benzer grafiğin elde edilmesi nedeniyle test düzeneğinde kullanım şeklinde veya veri işlemede hatalar aranmıştır. Test düzeneği daha önce metal malzemelerin karakterizasyon çalışmalarında kullanılması ve elde edilen verilerin doğrulanması nedeniyle çalışma sisteminde ve veri işleme kodunda hata olmadığı düşünülmüştür. Ancak yapılan araştırmalar sonucunda detonasyon dalgasının düzlemselliğinin yanı sıra yüksek şok basıncının plaka yüzeyinde bölgesel erime oluşturduğu anlaşılmıştır. Erime sırasında yüzeyin yansıtıcılığının bozulmasına neden olmuştur.

Detonasyon dalgasının düzlemselleştirilmesi için ateşleme sistemi üzerinde çalışmalar yapılarak düzlemsel dalga merceği geliştirilmiştir. Bu nedenle plaka yüzeyindeki erimelerden kaynaklanan bozulmalar engellenmesi için çalışma yapılması gerekmektedir. Bunun için serbest yüzeye iletilen şok basıncı aynı empedansta farklı bir malzemeye aktararak erime etkisinin azaltılması gerekir.

5.2.1. Empedans eşleştirme yönteminin uygulaması

Şok dalgası, malzeme üzerine gelen yükün elastik limitlerinin üzerinde oluştuğunda malzeme kalınlığı boyunca ilerlemektedir. Şok dalgası malzemenin serbest ucuna ulaştığında dalganın bir kısmı serbest alana geçerek ilerlerken bir kısmı da yansiyarak geri döner. Serbest uç tarafına iletilen dalga şiddeti, bitişik olduğu serbest alandaki malzemenin empedansına bağlıdır. Eğer bitişik malzemenin empedansı, dalganın geldiği malzemenin empedansından düşükse şok dalgasının büyük bölümü yansiyarak geri döner. Yansıma basınçları iletilen basınçtan daha yüksektir ve sonraki iletilen dalgalarla karşılaştığında da bölgesel olarak çok yüksek basınçlara ulaşılabilir. Malzemenin termodinamik özellikleri nedeniyle yüksek basınç sonucu kristal yapısı değişerek oluşan sıcaklık erime sıcaklığının üstüne çıkabilmektedir. Ayrıca malzeme üzerinde yansıma sonucu ilerleyen şok dalgası gelen şok dalgaları ile karşılaştığı noktalarda çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler mukavemet değerlerinin üzerindeyse malzeme içinde parçalanmalar (İng. spall) meydana getirir.

Plaka serbest yüzeyinde oluşabilecek erime şüpheleri üzerine testlerde kullanılan mevcut plaka hızlandırma test düzeneği modellenerek SPEED programında 2-boyutlu eksenel simetrik çözümleme yapılmıştır. Bu çözümlemelerde plakanın uçuşu sırasında plaka yüzeyindeki sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Çözümlemeler sonucunda plaka üzerinde elde edilen sıcaklık geçmişi aşağıda Şekil 5.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Mevcut sistemin SPEED yazılımındaki analizi sonucu plaka serbest yüzeyi üzerindeki sıcaklık grafiği

OFHC bakır malzemenin erime sıcaklığı yaklaşık olarak 800 °C'dir. Analiz sonucunda elde edilen değerler plaka modeli üzerindeki Şekil 3.4 ile gösterilen duyargalardan alınmıştır. Bu duyargalar plakanın merkezi (1), kenarı (3) ve ikisi arasındaki nokta (2) ile temsil edilmektedir. Grafiğe göre sıcaklıklar plakanın serbest yüzeyinde erime sıcaklığının üzerine çıktığı görülmektedir. Metal plaka yüzeyine ulaşan şok basıncı, empedansı daha düşük olan hava ara yüzüyle karşılaştığında iletilen dalganın büyük bir kısmı havaya geçmeden geri yansıyor ve ölçüm yüzeyi üzerinde bölgesel, şiddetli ani basınç yüklemeleri oluşturur. Şok basıncı yükseldiğinde malzeme davranışı elastik-plastik bölgenin çok üzerine çıkar. Bu bölgede malzeme ergiyerek akışkanlaşır. Bozulan aynalı yüzey ışığı dağıtır ve tek bir noktadan iletemez. Bu nedenle VISAR cihazının lens odağında veri işlemeyi gerçekleştirmeye yetecek kadar saçak toplanamaz.

Plaka hızlandırma testleri sonucunda bakır plaka bazen eriyerek silindirik gövdesi içerisinde kalmaktadır bazen de gövde dışına çıkarak çevreye saçılmaktadır. Ancak testlerden birinde parçalar bulunmuştur. Plakanın göbek kısmı ve çevresi şeklinde ayrıldığı görülmüştür.

Testlerden birinde tesadüfen elde edilen plaka parçasının büyük bir kısmının görüntüsü aşağıda Resim 5.9 ile gösterilmiştir.

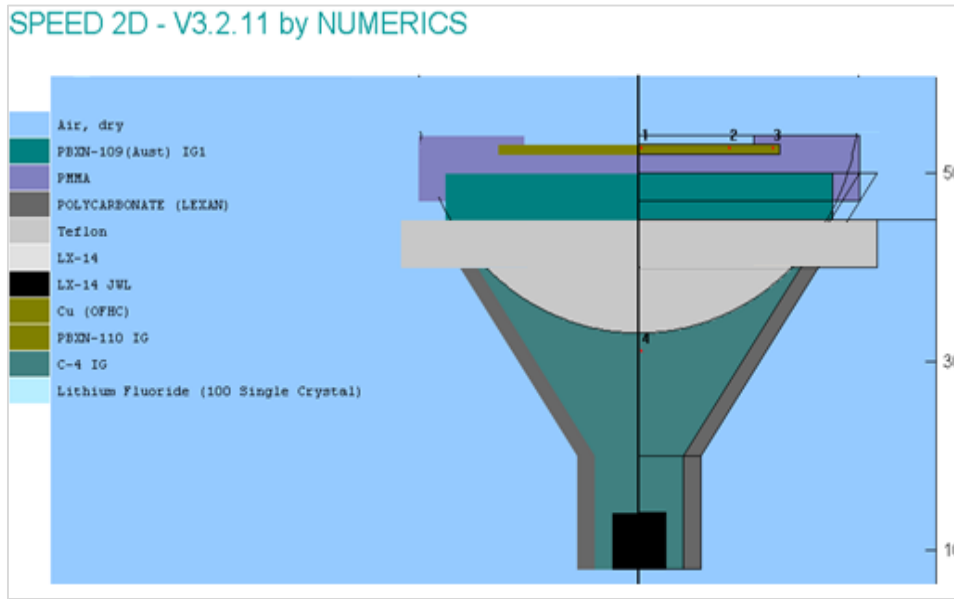


Resim 5.9. 5. Plaka hızlandırma testi sonrası bulunan plaka üzerindeki erime görüntüsü

Malzeme üzerine gelen yük ile oluşan fiziksel değişimler hal denklemi ile belirlenir. Ancak düşük yüklerde katı malzemelerin termodinamik özellikleri ihmal edilmektedir. Yüksek şok yükleri izentropik olduğu varsayılır ve bu yüklerle karşılaşıldığında termodinamik özellikler de hesaba katılmalıdır. Yüksek basınçlarda oluşacak sıcaklık artışı katı malzemelerin faz değişimine neden olabilmektedir. Yüzeyde oluşan yüksek şok basıncına bağlı yüksek erime sıcaklıkları plaka önüne koyulan saydam malzeme üzerinden optik radyometri tekniği ile ölçülebilmektedir. Ancak malzemenin opak olması ölçümü engeller.

Bu durumu önlemek için metal plaka yüzeyinde empedansı yüksek bir malzeme olmalıdır. Böylece yüzeydeki şok dalgası iletilerek yansıyan şok dalgası basıncının azaltılması amaçlanmıştır. Şok deneylerinde tek kristal yapılı saydam lityum florür malzemesi sıkça kullanılmaktadır. LiF ses hızının yüksek olması nedeniyle empedansı yüksek olurken 20 GPa basınca kadar saydam özelliğini korumaktadır. Ancak LiF malzeme mevcut olmadığından farklı bir polimer tercih edilmesi gerekmiştir. SPEED analizlerinde kullanılacak polimer plakanın malzeme seçimi ve boyut tasarımı yapılmıştır. Ancak pratikte kullanılabilecek malzemelerin belirli özelliklerde olması gerekmektedir. Malzeme metal seçimi durumunda ikinci bir metal plaka parçalanmayarak detonasyon ürünü gazlar için ekstra yük oluşturacağından tercih edilememektedir. Bu durumda polimer malzemeler

değerlendirilmektedir. Empedansın ($Z=Pc$,) yüksek olması için yoğunluk ve ses hızı yüksek olmalıdır. Ancak yaygın olarak kullanılan polimer malzemelerin birçoğunun yoğunluğu ve ses hızı düşüktür. Malzeme olarak PMMA (polimetil metakrilat) diğer polimerlere göre biraz daha yüksek empedansa sahip olması ve 3-boyutlu yazıcıda istenilen boyutta üretilebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. PMMA malzemesi kullanılarak hidrokod modeli oluşturulmuştur. SPEED simülasyonunda kullanılan model görüntüsü aşağıda Şekil 5.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Empedans eşleştirme çalışmasında SPEED analiz modeli

Modelleme yapılırken patlayıcı ve bakır plaka namlu içinden çıkartılarak düzlemsel dalga merceğine doğrudan bağlanmıştır. Namlu içindeki sistemden farklı olarak düzlemsel dalga şekillendiricideki PAD kalınlığı azaltılmıştır. Bakır plaka üzerindeki basınç yükünün biraz daha azaltılması için patlayıcı miktarı da düşürülmüştür.

Yapılan boyutlandırma analizinde model ve serbest yüzeyde oluşan sıcaklık geçmişi grafiği Şekil 5.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Empedans eşleştirme çalışmasında SPEED analizi sonucunda plakanın serbest yüzey zamana bağlı sıcaklık grafiği

SPEED programında yapılan analiz sonucunda bakır plakanın serbest yüzeyindeki sıcaklık ölçümü için plaka üzerinde Şekil 3.4 ile belirtilen duyargalar kullanılmıştır. Plakanın üzerinde sıcaklığı ilk yükselen nokta merkez bölgesinde olmasına rağmen kısa bir zaman sonra plakanın kenar noktalarında daha yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Bunun nedeni plakanın kenar noktalarındaki yansımalarından dolayı basıncın buralarda daha yüksek olması olabilir. Ancak ilk model ile yapılan anali sonucundaki sıcaklıklara kıyasla plaka yüzeyindeki sıcaklıkların önemli ölçüde düşürüldüğü gözlenmiştir. Buna göre empedans eşleştirme çalışması kapsamında üretilen PMMA malzemeden plakalar aşağıda Resim 5.10 ile gösterilmiştir.



Resim 5.10. Empedans çalışmasında SPEED yazılımı ile boyutlandırılan PMMA malzemeden üretilen plakalar

Buna göre analiz modelinin boyutları dikkate alınarak PMMA malzemeden yeni bileşenler üretilmiştir. Üretimin hassas olması için 3-boyutlu yazıcıda üretim yapılmıştır. Bu tasarım ile yeni plaka hızlandırma test düzeneği görüntüsü aşağıda Resim 5.11 ile verilmiştir.



Resim 5.11. Empedans eşleştirme yöntemi sonucunda oluşturulan yeni plaka hızlandırma test düzeneği

Düzenek; metal plakanın önüne ve arkasına polimer malzeme gelmesi nedeniyle ve patlama basıncının namlu gövdesi üzerinden yansıma olmaması için namlu içinde yapılmamıştır. Mekanik işleme toleranslarından dolayı şeffaf tuz plakası ve metal plaka arasında en az 1 μm kalınlığı kalabilmektedir. Bu da şok dalgasının metal plakanın serbest yüzeyinden yüksek basınçla yansımasına neden olarak ölçüm yapılmasını engellemektedir [15]. Bu nedenle yapılan deneme testlerinde erime engellenememiş ve yeterli veri toplama gerçekleştirilememiştir. Metal plaka önüne ve arkasına yerleştirilen polimer plakalar ile şok dalgasının düzgün şekilde iletimine izin verecek ara yüzün oluşturulamamasından meydana geldiği düşünülmektedir. Uygulamada sonuç alınamamasına rağmen SPEED yazılımı ile yapılan ideal modellerde farklı malzemeler arasında boşluk bulunmamasından dolayı hata alınmamıştır.

Plaka tarafında bozulmaların engellenememesi durumundan dolayı VISAR cihazının topladığı düşük saçak sayısının arttırılamadığından VISAR cihazının plaka hızlandırma testleri için uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

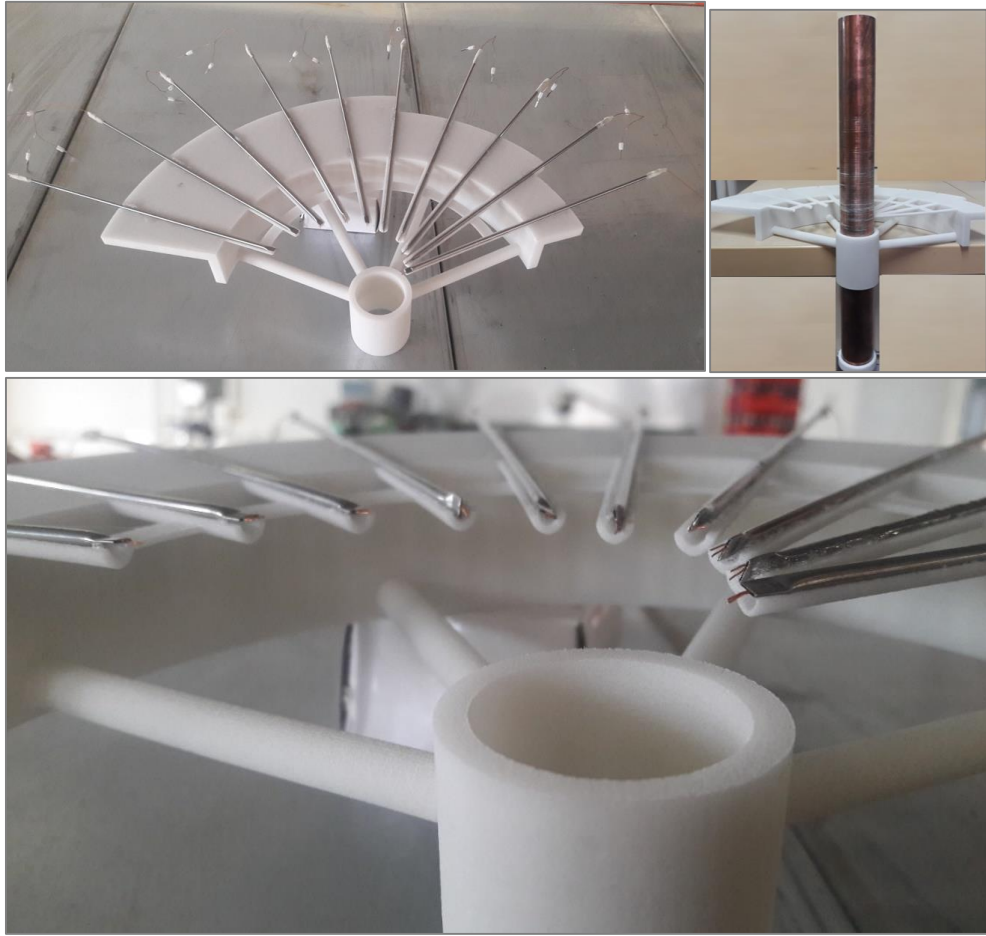
5.2.2. Alternatif ölçüm tekniği: PDV (Photon Doppler Velocimeter)

Bu durumun çoğunlukla VISAR sistemlerinin dar bir aralıktaki optik dalga boyunda çalışmasından dolayı oluşan çoklu Doppler frekansının oluşumundan kaynaklanmaktadır. Genellikle Fabry-Perot ve VISAR cihazlarının dar dalga boyu aralığında çalışması sonucu karşılaşılan bu etkinin ortadan kaldırılması için geniş dalga boyu band aralığında kayıt alma ve yüksek hızlı optik iletişim teknolojilerinin gelişmesi sonucu PDV cihazı ortaya çıkmıştır. Bu yönüyle PDV cihazı çoklu Doppler frekansı içeren hızları ölçmek için VISAR cihazından daha etkindir. Ayrıca hızını ölçtüğü numunenin erime noktası üzerinde de iyi bir dalga profili ve stres bulgusuna ulaşılabilir. Şok fiziği çalışmalarında kullanılmak üzere TÜBİTAK-SAGE, PDV cihazı satın alımı için kaynak ayırmıştır. Ancak tez çalışması döneminde NATO ülkelerinin Türk savunma sanayiine yapılan ihracat izinleri, pandemi nedeniyle yaşanan tedarik sorunları nedeniyle PDV cihazının satın alım süreci oldukça uzadığından süreç devam ederken başka yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir.

5.3. Silindir Genleşme Testleri: Nihai ve Başarılı Deneysel Çalışma Sonuçları

Plaka hızlandırma test düzeneğinde tüm parçaların detaylı analizleri ve boyutlandırılması yukarıda detaylarıyla anlatıldığı gibi yapılarak üretilmiştir. Hazırlanan test düzeneğiyle yapılan testlerde başarılı sonuç alınamaması nedeniyle bazı ek düzeltmeler yapılsa da VISAR cihazının ölçüm sistemi olarak uygun olmaması nedeniyle testlerde başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Bunun üzerine silindir genleşme test yöntemi geliştirilerek daha basit bir hız ölçüm sistemi kullanılmıştır. Hız ölçüm sistemi ve patlayıcı dolu bakır silindiri merkezleyen özel bir aparat tasarlanarak silindir genleşme test yöntemiyle testler yapılmış ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Bu başarılı sonuçlar ideal davranış gösteren ve ideal davranış göstermeyen patlayıcılar için denenerek test yönteminin uygunluğu kanıtlanmıştır.

Silindir genleşme test düzeneği çalışmaları kapsamında bakır silindirin ve iletken tellerin belirli bir mesafede tutulması için 3-boyutlu yazıcıda üretilen aparat kullanılmıştır. İzoleli bakır tellerin konumlarının sabit olması ve uygulama sırasında değişmemesi için daha rijit metal borular içerisine yerleştirilmiştir. Aparat üzerindeki bakır silindir ve veri toplamak için hazırlanan izoleli bakır teller, konumları merkezden belirli uzaklıklara aşağıda Resim 5.12 ile gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Resim 5.12. Bakır silindir ve iletken tel tutucu

İzoleli bakır tellerin bir ucu veri toplama cihazına bağlanırken diğer ucu kısa devre olmayacak şekilde ayrılarak silindirin genişlemesi sırasında silindire temas etmek üzere konumlandırılmıştır. İletken tel numaraları ve her bir telin silindir duvarına olan uzaklıkları aşağıda Çizelge 5.2 ile verilmiştir.

Çizelge 5.2. Silindir genişleme testi için iletken tel numaraları ve silindir duvarına göre konumları

Tel No	Silindir Merkezinden uzaklık (mm)
T-1	0,50
T-2	4,00
T-3	10,50
T-4	17,00
T-5	23,50
T-6	30,50
T-7	37,00
T-8	43,50
T-9	50,00
T-10	56,50

Alüminyum katkılı patlayıcıların detonasyonu sırasında reaksiyon mekanizması farklı olduğundan alüminyumun yanma reaksiyonu daha geç gerçekleşmektedir. Bu nedenle alüminyum reaksiyon miktarı göz önünde bulundurularak daha uzun süre veri alınması gerekebilir. İletken bakır tellerin konumları alüminyum katkılı patlayıcı doldurulmuş silindirin genişmesi sırasında hızını tespit edecek kadar genişleme süresi dikkate alınarak yaklaşık 6,5 mm aralıklarla yerleştirilmiştir.

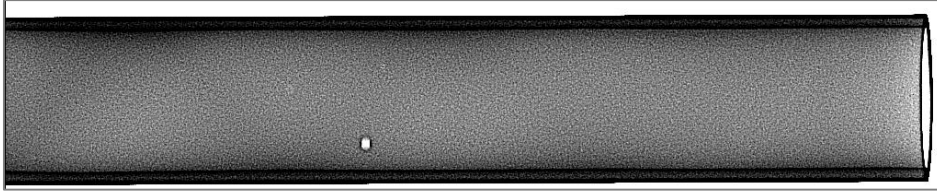
Testler sonucundaki elde edilen verilerde, üretimden, test şartlarından veya ölçüm cihazlarından kaynaklanan hatalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle testler sonrasında elde edilen verilerin doğrulanması olası hataların giderilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca alınan verilerin benzer çıkması test güvenilirliğini arttırmış olacaktır. Doğrulama ve güvenilirlik için her bir patlayıcı için 3'er adet bakır silindir dolumu yapılmıştır. Üretimi yapılan test kalemlerinin içerdiği patlayıcı ve silindirin boyut ve kütsel özellikleri aşağıda Çizelge 5.3 ile verilmiştir.

Çizelge 5.3. Patlayıcı doldurulmuş test kalemi özellikleri

Patlayıcı	ρ [kg/m ³]	d [mm]	L [mm]	s [mm]	C [g]	M/C
S110	1670	25,12	300	2,5	248	2,29
S109 (Al+RDX)	1660	25,12	300	2,5	248	2,29
S109 (LiF+RDX)	1560	25,12	300	2,5	232	2,44

Patlayıcı dolumu katı enerjik malzemelerin çeşitli kimyasal ve katalizörlerle akışkan hale getirilmesi sayesinde döküm yapılabilir. Ancak buna rağmen oldukça viskoz yapı oluşarak içerde hava boşlukları kalmasına neden olabilir. Bu tür boşluklar kararlı detonasyon oluşmasını engelleyerek süresizlik sağlar. Kararsız detonasyon patlayıcının karakteristik özelliği olan detonasyon hızı ve basıncının değişmesine yol açarak elde edilecek parametrelerin değişmesine neden olabilir. Patlayıcı içerisinde hava boşluğu veya homojenliğin sağlandığının görülmesi için yoğunluk farkından yararlanarak x-ray görüntüleri çekilmiştir.

Alüminyum katkılı patlayıcı ile doldurulmuş bakır borulardan birinin x-ray görüntüsü aşağıda Resim 5.13 ile gösterilmiştir.

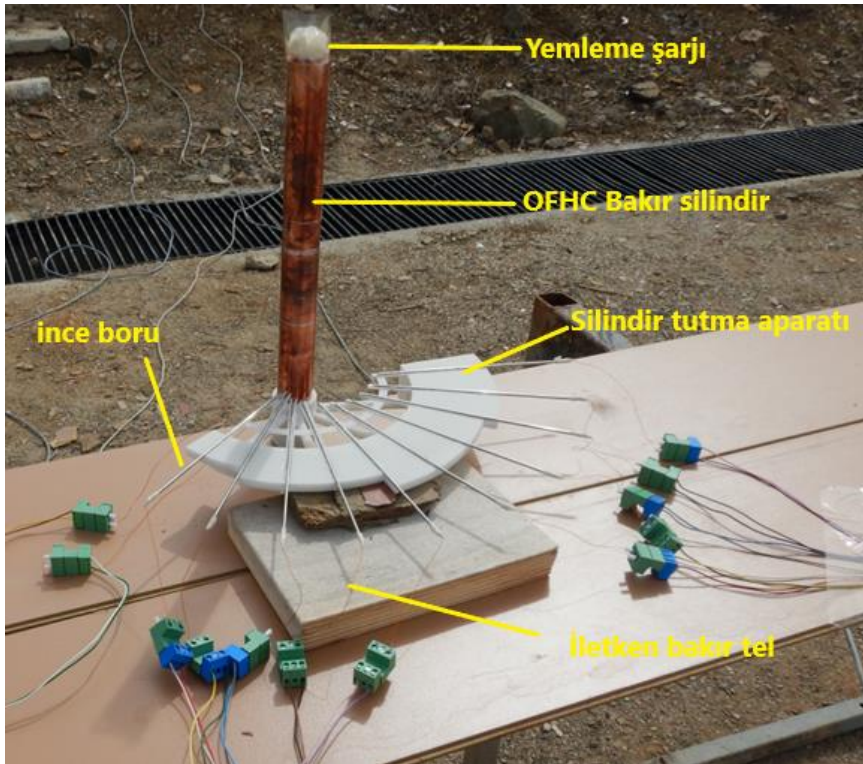


Resim 5.13. Alüminyum katkılı patlayıcı ile doldurulmuş bakırın x-ray görüntüsü

S109 (Al) doldurulmuş bakır silindirin x-ray görüntüsü incelendiğinde patlayıcının oldukça homojen dağılım gösterdiği, herhangi bir hava boşluğu olmadığı görülmektedir. Görüntünün üzerinde görülen düzgün dairesel leke, bakır silindir üzerinde detonasyon hızının ölçümü için açılmış deliği göstermektedir.

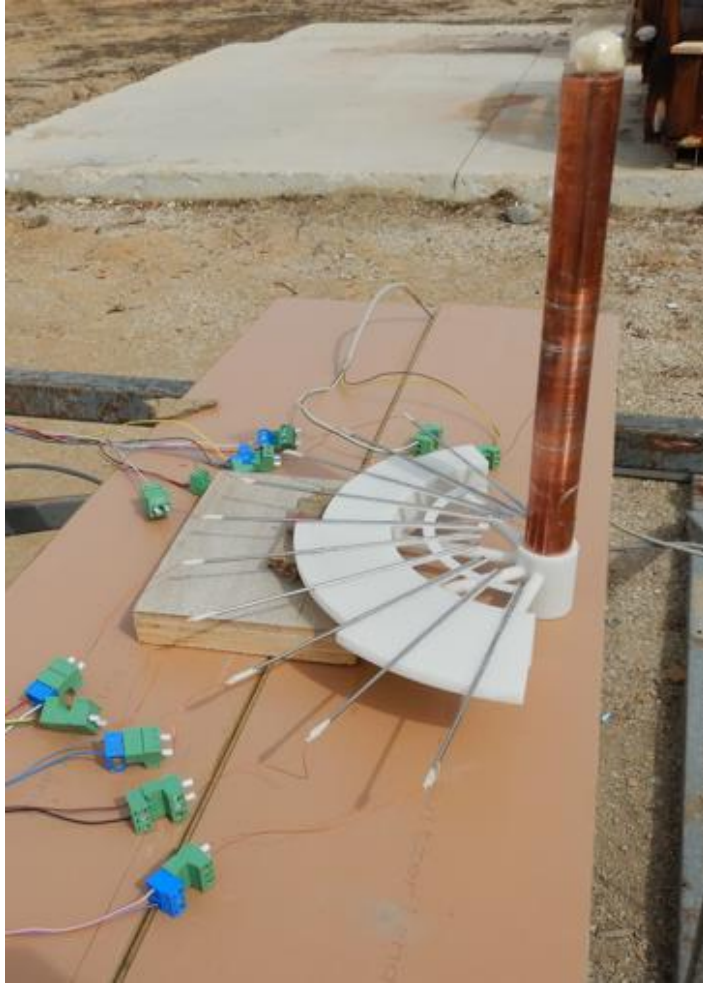
Testler öncelikle ideal davranış gösteren bir patlayıcı olan S110 ile yapılmış, sonrasında S109 patlayıcısının alüminyum katkılı olan S109 (Al) ve alüminyumun yerine inert malzeme olarak kullanılan LiF katkılı olan S109 (LiF) patlayıcılarıyla testler yapılmıştır.

Silindir genleşme testlerinde kullanılan düzeneğin genel görüntüsü aşağıda Resim 5.14 ile verilmiştir.



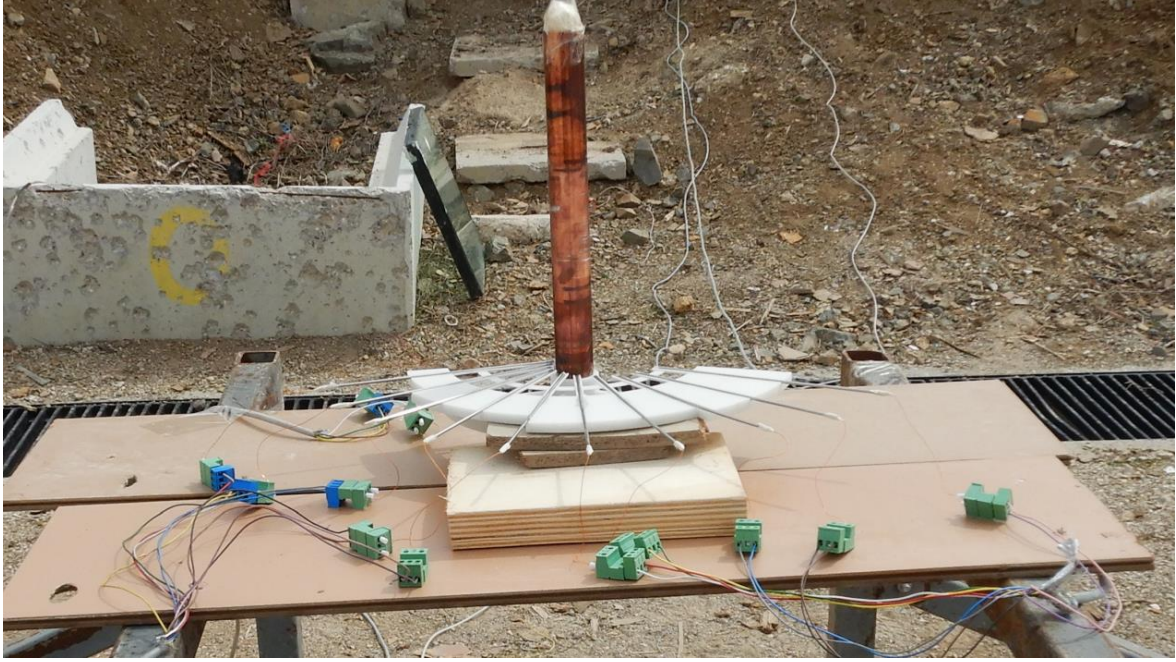
Resim 5.14. Silindir genleşme test düzeneğinin genel görüntüsü

Patlayıcı doldurulmuş bakır silindir, aparatın merkezine yerleştirilerek konumlandırılmıştır. Hız ölçümünü yapacak bakır teller ise aparatın teller için oluşturulan yuvalarına daha düzgün şekilde yerleştirilmesi için alüminyum borular kullanılmıştır. Teller ince borular içinden geçirilerek uç kısımları kesilmiş ve açık uçlu devre haline getirilmiştir. Silindir genleşme test düzeneğinin yan açıdan görüntüsü aşağıda Resim 5.15 ile gösterilmiştir.



Resim 5.15. Silindir genleşme test düzeneğinin yan açıdan görüntüsü

Tellerin diğer uçları klemenslere bağlanmaktadır. Klemenslerin karşı uçlarında veri toplama sisteminin elektriksel sinyal gönderen kablolarla bağlı olan klemenslere bağlanmaktadır. Silindir genleşme test düzeneğinin arka açıdan görüntüsü aşağıda Resim 5.16 ile gösterilmiştir.



Resim 5.16. Silindir genleşme test düzeneğinin arka açıdan görüntüsü

Düzeneğin test hazır hale getirilmesi sonrasında patlayıcı doldurulmuş bakır silindir üst kısmından başlayarak ateşlenmektedir. Bunun için bakır silindirin üst ucuna silindirik şekilde yemleme şarjı bağlanmıştır. Yemleme şarjının malzemesi olarak C4 kullanılmıştır. C4 patlayıcısının ateşlenmesi ise standart tipte elektrikli detonatör ile yapılmaktadır.

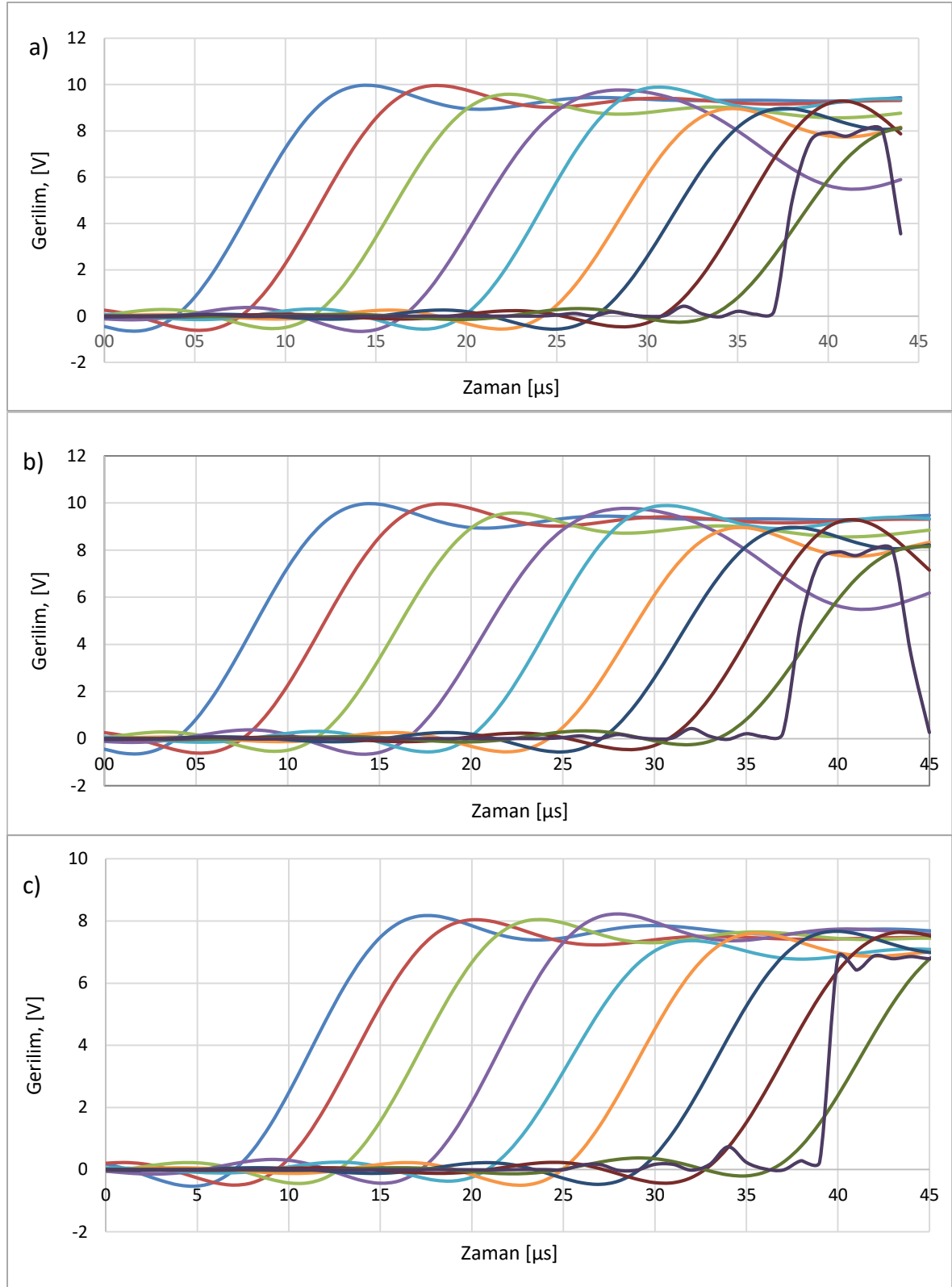
Test kalemleri üzerinde 150 mm mesafe ile açılan 2 adet deliğe yine bakır iletken teller yerleştirilmiştir. Bakır teller üzerinden geçen detonasyon dalgası açık devreyi kapatarak sinyal alınmasını sağlamaktadır. Delikler arasındaki mesafenin sinyal zamanları farkına bölünerek detonasyon hızı ölçülmüştür. Testler sırasında ölçülen detonasyon hızları aşağıda Çizelge 5.4 ile verilmiştir.

Çizelge 5.4. Detonasyon hızları

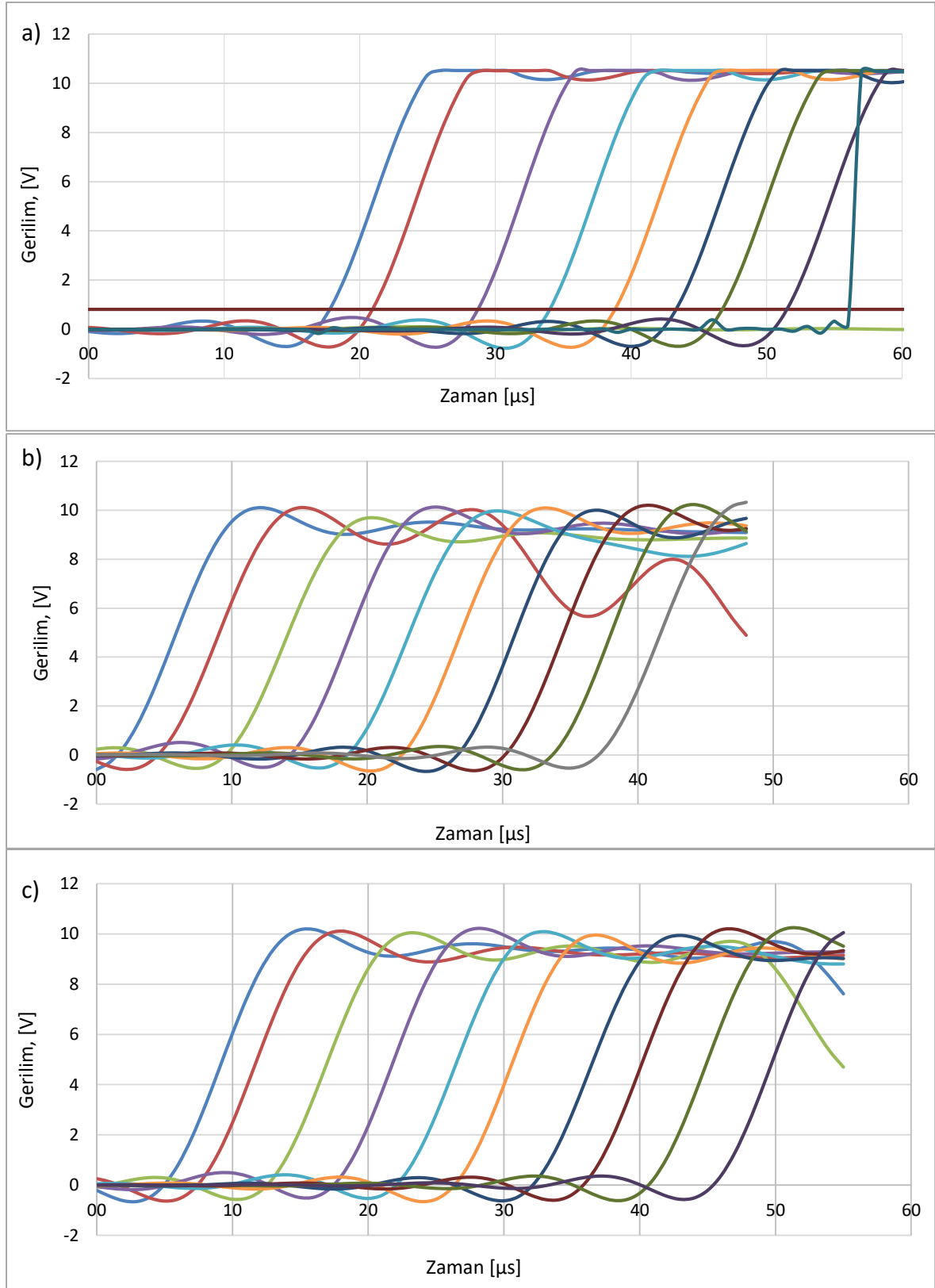
Test No	Patlayıcı	Detonasyon Hızı [m/s]
1	S110	7980
2	S110	7980
3	S110	7980
4	S109 (Al+RDX)	7500
5	S109 (Al+RDX)	7400
6	S109 (Al+RDX)	7500
7	S109 (LiF+RDX)	7075
8	S109 (LiF+RDX)	7075
9	S109 (LiF+RDX)	7075

Silindir genleşme testleri 3 farklı patlayıcı için 3'er defa yapılarak veriler toplanmıştır. Her bir patlayıcı için her testte detonasyon hızı ölçülmüştür. Buna göre her patlayıcının detonasyon hızları kendi içinde çok yakın sonuçlar elde edilmiş ve doğrulanabilmektedir. PBXN110 patlayıcısının detonasyon hızının değeri 7900-8100 m/s arasındadır. Buna göre PBXN110 patlayıcısının benzeri olarak üretilen S110 patlayıcısının detonasyon hızı literatür verisiyle örtüşmektedir. PBXN109 patlayıcısının detonasyon hızının literatürdeki değeri 7500-7600 m/s arasındadır. Buna göre PBXN109 patlayıcısının benzeri olarak üretilen S109 (Al) patlayıcısı için yakın bir detonasyon ölçümü yapılmıştır. S109 (LiF) patlayıcısının literatürde karşılığı olmadığından detonasyon hız değeri karşılaştırılamamaktadır.

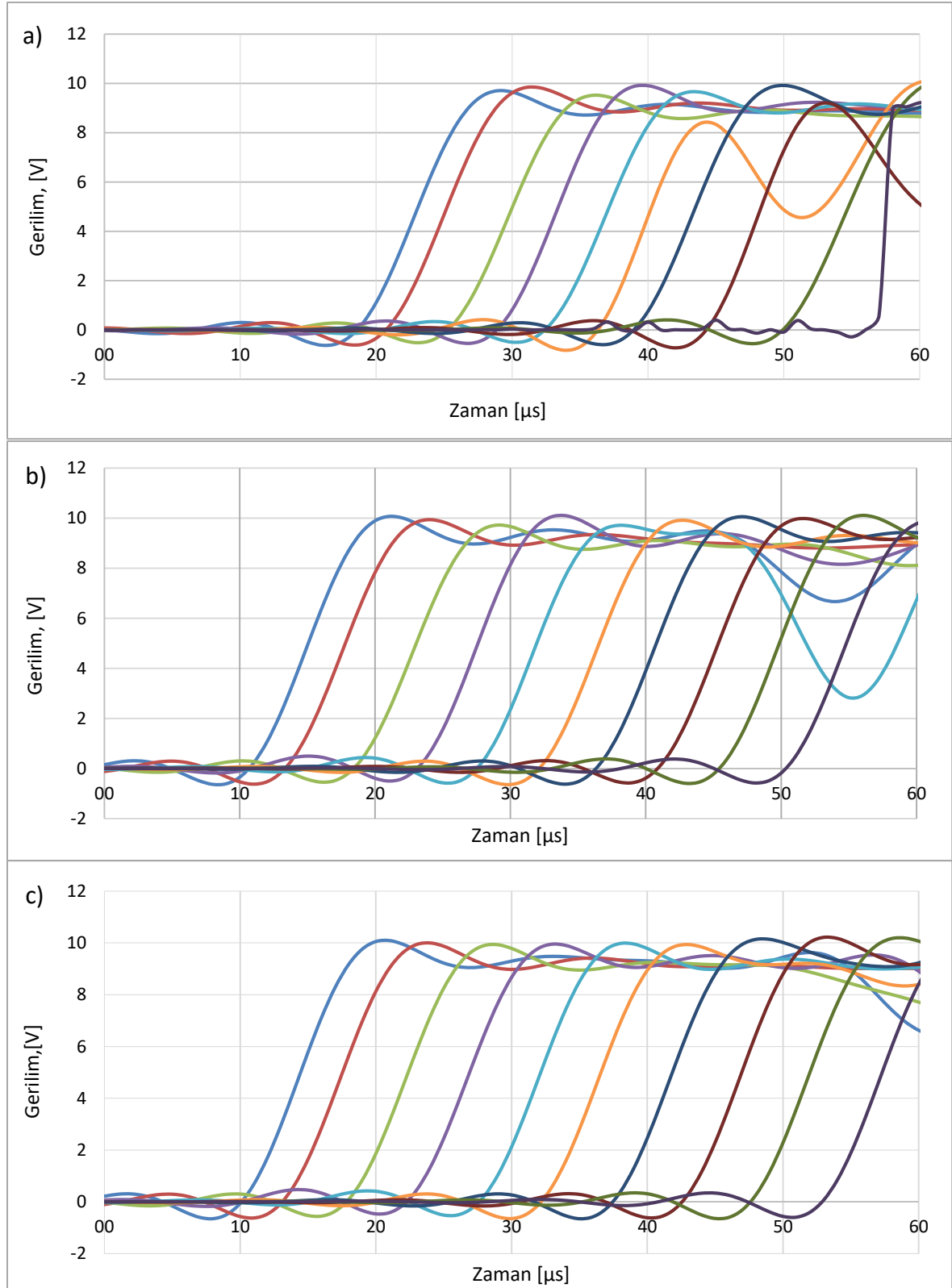
9 adet test çalışması sonucunda veri toplama cihazından aşağıda Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ile verilen elektriksel sinyal verileri alınmıştır.



Şekil 5.5. S110 patlayıcısının silindir genişleme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri
a) test1 b) test2 c) test3



Şekil 5.6. S109 (Al) patlayıcısının silindir genişme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri a) test1 b) test2 c) test3



Şekil 5.7. S109 (LiF) patlayıcısının silindir genişleme testlerinde alınan elektriksel sinyal verileri a) test1 b) test2 c) test3

Ateşleme sonrası silindir duvarı genişterek iletken bakır tellere çarparak tek tek devrelerin kapanmasını ve elektrik sinyallerinin üretilmesi sağlamıştır. Veri grafiklerindeki her bir eğri silindir genişleme test düzeneğinde hız ölçümü için yerleştirilen her bir bakır telin sırasıyla gerilim değerinin zamanla değişimini ifade etmektedir. İletken bakır teller sıralı olarak yerleştirildiği ve her bir telden kayıp olmadan veri alındığı için grafiklerde 10 adet eğri görülmektedir. İletken tellerden elektriksel sinyaller alınırken her bir telin kapasitansı 10 μ s zamanda dolmaktadır. Bu nedenle dolum sırasında 1 veri/ μ s sıklığında veri alınırken her bir tel için gerilim 10 μ s sonunda 10 V değerine ulaşır. Ancak iletken tellerin devre kapanma sırasındaki kapasitans dolum biçimleri yukarıdaki gibi “S” harfi şeklinde olduğundan harekete başlama anı devrenin kapandığı an olarak kabul edilir. Ayrıca harekete başlama ve bitiş zamanları arasındaki veri sayısı her bir tel için aynı olduğundan veri almak için herhangi bir gerilim noktası seçilebilir. Tellerden alınan gerilim verileri için aşağıdaki tablo ile zamana bağlı konum eğrileri elde edilmiştir. Sabit konumlardaki sinyal zamanları aşağıda Çizelge 5.5 ile verilmiştir.

Çizelge 5.5. S110, S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcıları için silindir genişleme testlerinde alınan konumlarına göre zaman ölçüm sonuçları

Konum, [mm]	Zaman, t [μ s]								
	S110			S109 (Al)			S109 (LiF)		
	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	4,00	2,00	3,40	3,20	3,10	2,50	2,20	2,70	3,00
10,50	8,00	5,25	7,10	7,10	8,20	7,70	6,90	7,95	7,85
17,00	13,00	10,00	10,20	10,90	12,90	12,58	10,30	12,60	12,35
23,50	16,50	14,00	12,65	16,20	17,15	17,22	14,00	16,90	17,65
30,50	21,00	17,50	14,85	21,00	21,05	21,40	17,40	21,45	22,25
37,00	23,50	22,00	17,60	25,30	25,10	27,22	20,40	25,70	27,35
43,50	26,95	24,95	19,30	28,90	28,65	30,95	25,50	30,30	32,50
50,00	30,95	29,95	21,40	33,50	32,17	35,75	31,50	34,80	37,50
56,50	34,95	34,95	24,10	38,10	35,73	40,51	36,40	39,77	42,95

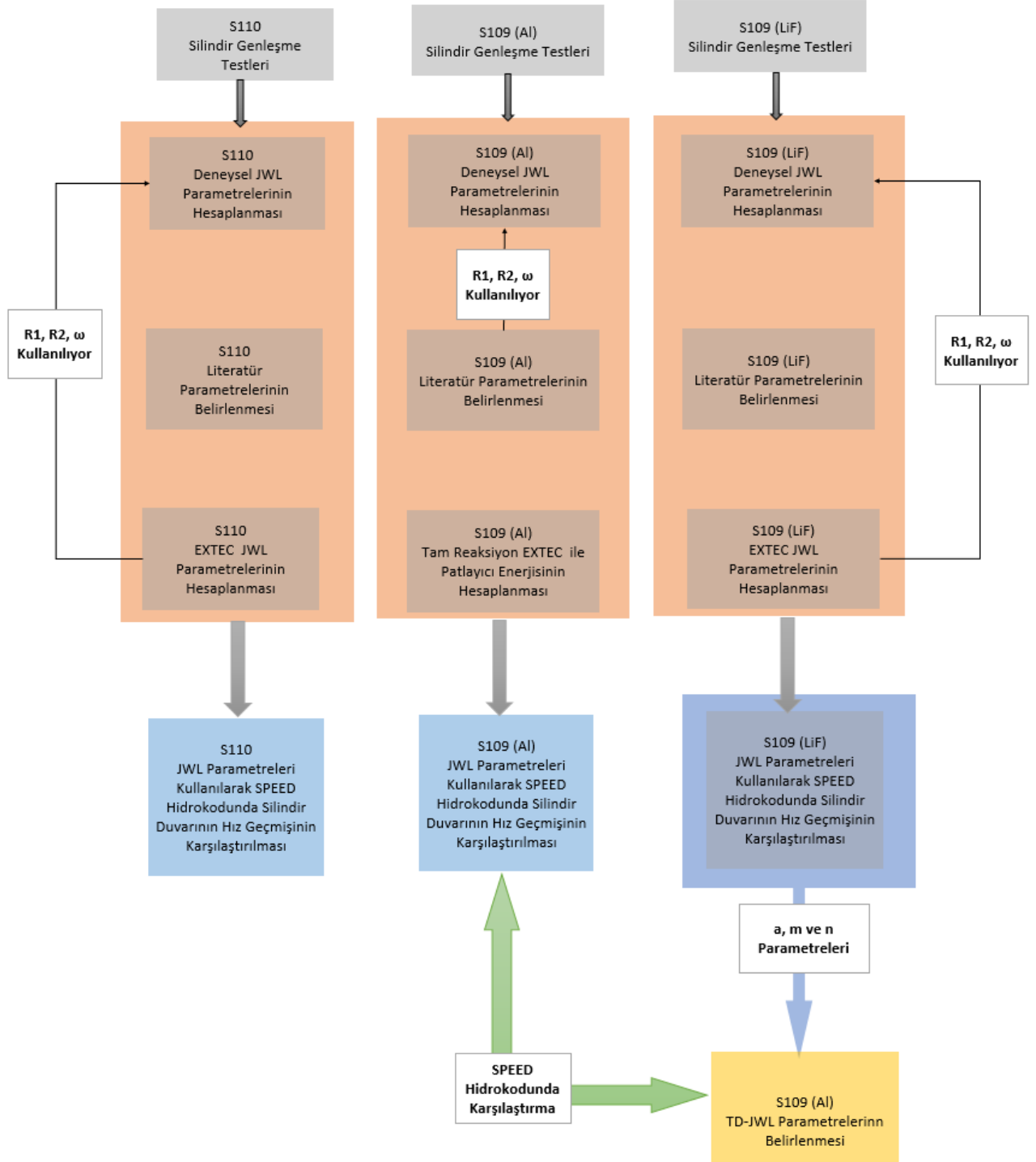
Yukarıdaki çizelgede verildiği üzere 3 farklı patlayıcı için 3'er testten elde edilen 10'ar adet verinin zaman değerleri konumlarına göre kaydedilmiştir. Ölçüm sırasında bakır tellerin konumlarının başlangıçta belirlenen ile aynı olduğu ve herhangi bir etken olmadığı varsayılmaktadır. Sonraki bölümde sabit konum verileri ölçülen zaman değerlerine göre grafiklere geçirilerek deneysel verilerden JWL hal denkleminin parametrelerinin hesaplanması için matematiksel hesaplamalar yapılmıştır.

6. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bu bölüme kadar alüminyum katkılı patlayıcıların JWL hal denkleminin parametrelerini elde etmek üzere bazı test düzenekleri kurularak test çalışmaları yapılmıştır. Silindir genişleme test düzeneğiyle başarılı sonuçlar alınarak 3 farklı tipte patlayıcı için 3'er adet test yapılmış ve silindir duvar hız verileri elde edilerek kaydedilmiştir. Bu bölümde, elde edilen deneysel verilerle önceki bölümlerde ayrıntıları açıklanan matematiksel işlem adımları izlenerek JWL parametreleri bulunmuştur. Deneysel yöntemle elde edilen JWL parametrelerinin doğru olduğunu değerlendirmek için farklı kaynaklardan bulunan parametrelerle karşılaştırması yapılmıştır. JWL hal denkleminin parametrelerini deneysel yöntemden başka termokimyasal kod ile hesaplanabilmektedir. Bu termokimyasal kodlar herhangi bir deneysel işlem gerektirmeden, moleküler çarpışma mekaniği prensibiyle hesaplayarak JWL parametrelerini belirler. Bunu yapabilen bazı ticari termokimyasal kodlar mevcuttur. SAGE kurumunda bu kodlardan biri olan EXTEC termokimyasal kodu kullanılmaktadır. JWL parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan bir diğer kaynak ise literatürdür. Literatür çalışmalarında yapılan farklı testler ve uygulamalarla JWL parametreleri elde edilmiş ve çeşitli kaynaklarda kullanılarak doğrulanabilmektedir. Tez çalışması kapsamında deneysel verilerle elde edilen JWL parametrelerinin karşılaştırılması için SPEED hidrokodu veri tabanında bulunan literatür verileri kullanılmıştır. Veri tabanındaki bu parametreler, birçok kaynakta yer alması ve SPEED hidrokodunun geliştirilmesi sırasında doğrulama aracı olarak kullanması nedeniyle literatür kaynağı olarak kullanılmıştır.

Böylece 3 farklı tipte patlayıcı için 3 farklı JWL kaynağı bulunmuştur. Deneysel kaynaklı, EXTEC termokimyasal kaynaklı ve literatür kaynaklı JWL parametrelerinin karşılaştırması ise sonraki bölümde SPEED hidrokodu yardımıyla yapılmıştır.

Test sonucunda elde edilen veriler ve bu verilerin doğrulanmasına yönelik izlenen yöntem aşağıda Şekil 6.1 ile verilmiştir.



Şekil 6.1. JWL parametrelerinin karşılaştırılması ve TD-JWL parametrelerinin elde edilmesi için izlenen yöntem

Yukarıdaki şekilde 3 adet farklı tipte patlayıcı için JWL parametrelerin elde edilme yolları sırasıyla gri kutularda verilmektedir. S110, S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcıları için JWL parametreleri sırasıyla deneysel, literatür ve EXTEC kodu ile hesaplanmaktadır. Gri kutular ile verilen parametrelerin elde edilme yolları, kırmızı renkteki kutuyla birleştirilerek gösterilmiştir. Kırmızı renkteki kutular içinde gösterilen yöntemlerle elde edilen JWL parametreleri, SPEED hidrokodunda patlayıcının hal denklem modeli olarak girilerek analiz edilmektedir. Yukarıda verilen şematik gösterimde analizler mavi renkteki kutularda gösterilmiştir. SPEED hidrokodunda yapılan analizlerin modeli silindir genleşme test düzeneğidir. Analiz modelinin çözümü sonucunda karşılaştırılacak veri ise silindir duvarı üzerinde belirlenen bir noktanın zamana bağlı radyal yöndeki hız geçmişi'dir. Son olarak tez çalışmasının nihai amacı olan zamana bağlı JWL (TD-JWL) denkleminin Miller modelinin parametreleri için S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcılarının JWL parametreleri ile analiz edilen silindir duvar hızları karşılaştırılmıştır. S109 (LiF) patlayıcısının SPEED analizi sonucunda elde edilen silindir duvarının hız eğrisine SPEED hidrokodunun Miller modeli için deneme yanılma yoluyla girdi yapılarak S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleriyle elde edilen silindir duvarının hız eğrisi elde edilmiştir. SPEED analiz modeli ve verilerin karşılaştırılması 7. Bölümde anlatılmıştır.

6.1. Termokimyasal Kod (EXTEC) ile JWL Hesaplamaları

Detonasyon enerjisini hesaplayabilmek için termokimyasal kodlar kullanılabilir. Moleküllerin çarpışma teorisi prensibine göre hesaplama yapan kodlardan en yaygın olarak kullanılan 2 tanesi EXPLO5 ve EXTEC yazılımlarıdır. EXPLO5 yazılımı, silindir genleşme testi verilerinden yararlanarak detonasyon enerjilerini hesaplamaya çalışan Souers ve Kury tarafından geliştirilen yeni bir kodu esas alır. Bu kodlar kimyasal denge halindeki kararlı detonasyon modeli temel alarak hassas bir şekilde detonasyon enerjisini ve JWL parametrelerini hesaplayabilmektedir. Kodlar içinde detonasyon ürünü gazlar için Becker-Kistiakowski-Wilson (BKW) hal denklemini kullanır. Katı karbon için ise Cowan-Fickett hal denklemini kullanır. Kod içinde denge halindeki detonasyon ürünlerinin kompozisyonları, Gibbs enerjilerinin minimizasyon metodu uygulanarak elde edilir [57].

EXTEC kodu içerisine patlayıcı içeriği kütle oranlarıyla birlikte girilerek patlayıcı bileşimi belirlenir, patlayıcının yoğunluk değeri de hesaplama için gerekli girdi parametrelerinden biridir. Verilen bileşim maddelerine göre EXTEC programı otomatik

olarak muhtemel reaksiyon ürünlerini sunar. Reaksiyonun doğası gereği oluşan ürünler seçilerek, hesaplama sonucuna etkisi ihmal edilen bileşim çıkarılır ve hesaplama başlatılır. Bu şekilde yapılan hesaplamada CJ teorisi ile birlikte izentropik genleşme varsayımları esas alınır. EXTEC kodu ile hesaplanan JWL değerleri ve patlayıcının CJ noktasındaki değerleri aşağıda Çizelge 6.1 ile verilmiştir.

Çizelge 6.1. EXTEC Termokimyasal kodu ile hesaplanan JWL parametreleri ve detonasyon özellikleri

PATLAYICI	S110	S109 (LiF)
A [GPa]	1867,7	1157,5
B [GPa]	22,01	12,46
C [GPa]	1,30	0,88
R1	5,90	5,85
R2	1,47	1,47
ω	0,41	0,36
ρ [kg/m ³]	1670	1560
Q [GPa]	8,47	3,544
P _{CJ} [GPa]	27,8	17,23
V _D [m/s]	8662	7092

EXTEC programından elde edilen bu parametrelerin bir kısmı deneysel verilerle JWL hesaplanmasında da kullanılmaktadır. EXTEC kodu yardımıyla elde edilen ve deneysel verilerin hesaplanmasında başlangıç değerleri olarak kullanılan parametreler aşağıda Çizelge 6.2 ile verilmiştir.

Çizelge 6.2. JWL parametrelerinin deneysel olarak hesaplanması için EXTEC kodu ile hesaplanan bazı parametreler

Patlayıcı	V _{CJ}	R1	R2	ω
S110	0,466	5,90	1,47	0,41
S109 (Al)	0,461	6,26	1,34	0,17
S109 (LiF)	0,520	5,85	1,47	0,36

Çizelge 6.2’de bulunan değerlerin bulunması için EXTEC termokimyasal kodu kullanılmıştır. Yalnızca S109 (Al) patlayıcısı için kullanılan değerler için SPEED hidrokodunun veri tabanından yararlanılmıştır. EXTEC termokimyasal kodu ideal davranış gösteren patlayıcılar için çözümleme yaparken alüminyum katkılı ideal olmayan davranış gösteren patlayıcılar için çözüm sunmamaktadır. Gerçek durumda alüminyum katkılı patlayıcıların detonasyonu sırasında alüminyum partiküllerinin bir kısmı detonasyon

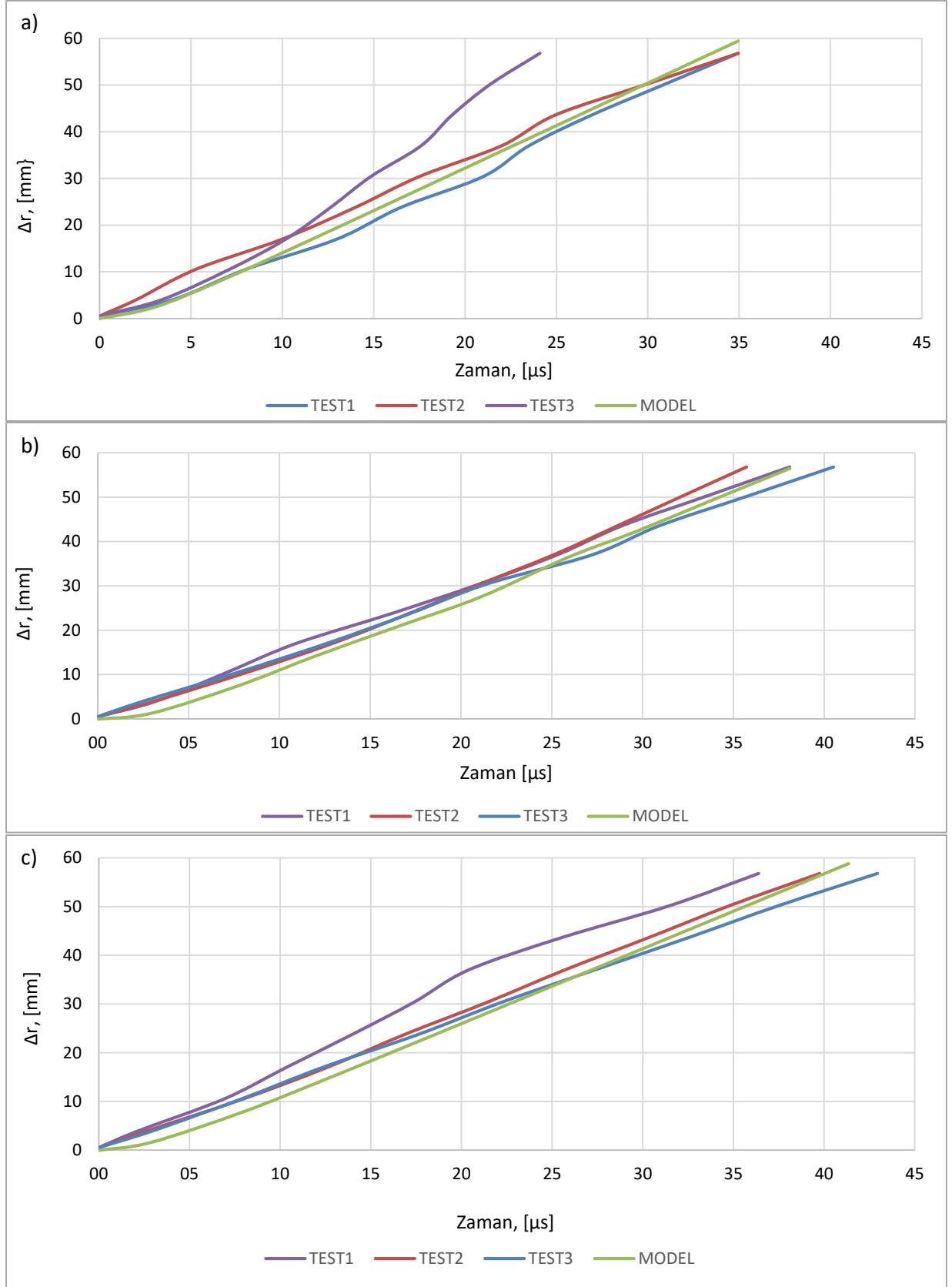
ürünleriyle reaksiyona girdiğinden alüminyumun enerjisinin tamamı kullanılamamaktadır ve kısmi reaksiyon meydana gelmektedir. EXTEC termokimyasal kodu kısmi reaksiyonu hesaplayamadığından S109 (Al) patlayıcısı için reaksiyon enerjisi ve diğer başlangıç parametreleri literatür kaynaklı SPEED hidrokodunun veri tabanından alınmıştır. S109 (LiF) patlayıcısı için alüminyum katkısı inert olarak varsayılarak hesaplama yapılmıştır. Böylece reaksiyona enerji olarak katkısı olmadığı varsayılır ve özgül ısısı sıfır olarak hesaplama yapmaktadır. Katı karbon ve katı alüminyum oluşabilecek muhtemel ürünler arasında gösterilmeyip detonasyona etkisi ihmal edilmektedir. Bu şekilde yapılan hesaplama sonucu patlayıcı ve detonasyon verileri tabloda yer almaktadır. Tabloda verilen patlayıcıların toplam enerji değerleri, Q, Şekil 6.4 ile verilen kırmızı renkteki eğrilerin değerleridir. Sonuç olarak, önceki bölümde anlatılan analitik yöntem ve algoritma izlenerek parametreler hesaplanmıştır.

6.2. DeneySEL Veriler ile JWL Hesaplamaları

Silindir genleşme testi sonucunda hız verileri işlenirken hız-zaman grafiği belirli bir eğri üzerine oturtulur. Standart yöntemde önerilen üssel fonksiyon Eş. 4.8 ile verilmiştir. Ancak eğrilerin daha hassas oluşturulması için fonksiyon aynı iki fonksiyonun toplamı şeklinde kullanılmıştır. Bu fonksiyon Eş. 6.1 ile gösterilmiştir.

$$\Delta r_m = a1.t - \left[\frac{1}{b1} (1 - e^{-b1.t}) \right] + a2.t - \left[\frac{1}{b2} (1 - e^{-b2.t}) \right] \quad (6.1)$$

Elde edilen deneySEL verilerle hesaplanan konum değerleri karşılaştırılarak veriler arasındaki uyumsuzluğun giderilmesi için aynı grafikte gösterilmiştir. Test sonucunda sinyal alınan zamanlara göre bakır tellerin konumları ve model eğrileri aşağıda Şekil 6.2 ile verilmiştir.



Şekil 6.2. Silindir genişleme testlerinde sinyal alınan bakır tellerin zamana bağlı konum değişimleri a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF)

Aynı patlayıcı ile yapılan testlerin sonucunda alınan sinyal verilerinin ortalama zamanları için yukarıda belirtilen fonksiyon ile model oluşturulmuştur. Zamana bağlı konum eğrileri karşılaştırılarak en çok sapmanın görüldüğü testler dikkate alınmamaktadır. Buna göre S110 patlayıcısının 3. testinin verileri ve S109 (LiF) patlayıcısının 1. Testinin verileri diğerlerine göre ayrıştığı için hesaplama sırasında dikkate alınmamıştır. Elde edilen zaman verilerinin ortalaması alınarak fonksiyonla ifade edilebilmesi için a_1 , b_1 , a_2 ve b_2 katsayıları belirlenmiştir. Ancak ölçüm sırasında daha önce ayrıntılı olarak bahsedildiği şekilde silindir duvarının metal özelliklerine bağlı olarak ivmelenme oluşmaktadır. İvme nedeniyle henüz silindir duvarının genleşme hareketi başlamamasına rağmen hız yükselmektedir. Bu durum hesaplamanın sonraki aşamalarında hataya neden olacağından test sırasında 10 adet iletken bakır telden alınan ilk 2 veya 3 verinin daha meyilli hareketi için a_2 katsayısı belirleyici olmaktadır. Bu katsayılar her bir patlayıcı modeli için aşağıda Çizelge 6.3 ile verilmiştir.

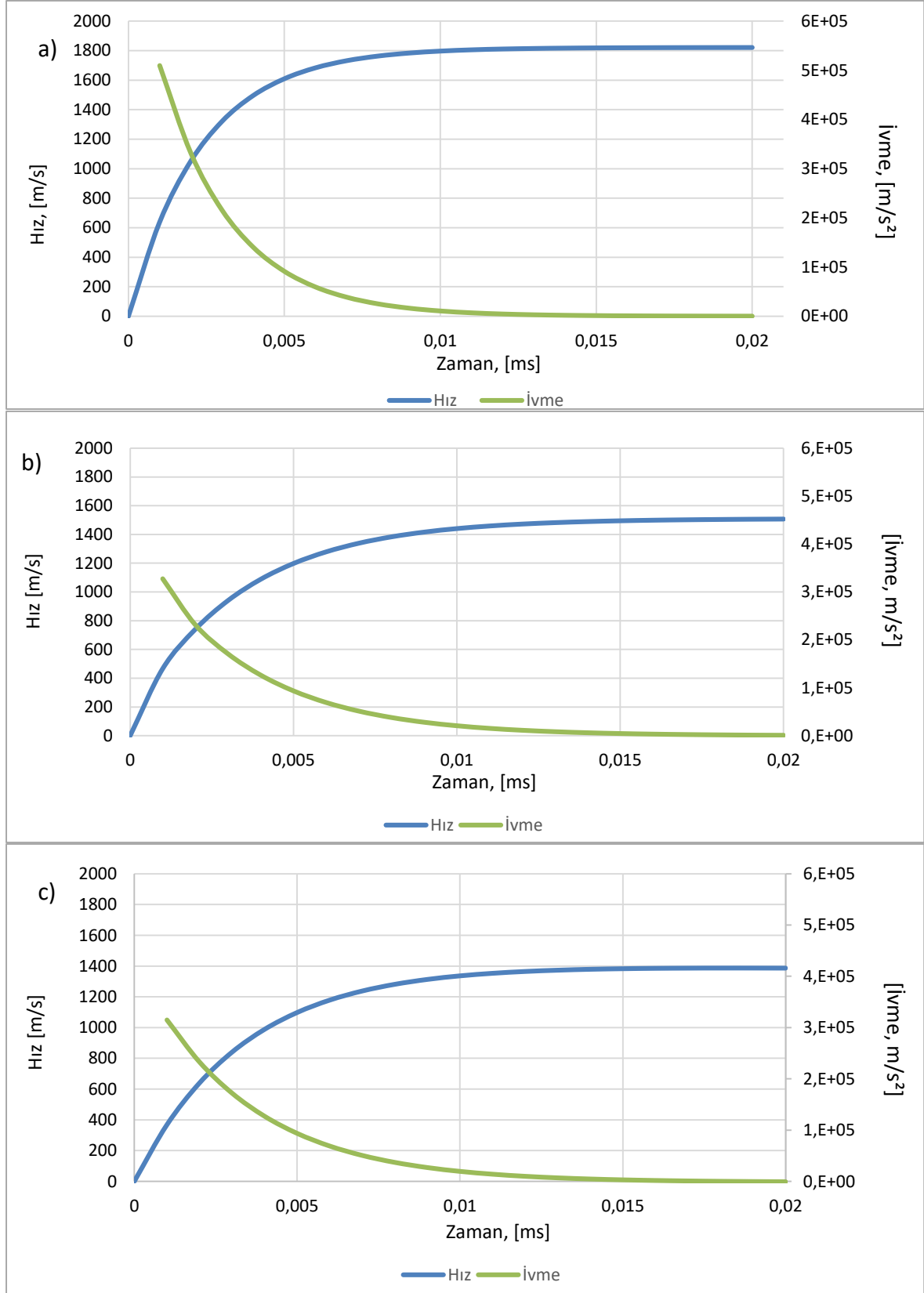
Çizelge 6.3. Bakır silindirler için konum-zaman eğrilerinin katsayıları

Patlayıcı	a_1 [mm/ms]	a_2 [mm/ms]	b_1 [1/ms]	b_2 [1/ms]	R^2
S 110	1	1000	1820	430	0,98
S 109 (Al)	1400	300	110	3000	0,99
S 109 (LiF)	1399	300	139,3	1000	0,99

Zamana bağlı bir fonksiyonla ifade edilen konum denklemi kullanılarak herhangi bir zaman için silindir duvarının pozisyonu hesaplanabilecektir. Bu nedenle hesaplamalarda kullanılacak olan silindir duvarının konumu belirli zaman aralıkları için tekrar hesaplanmıştır. Önceki bölümlerde ayrıntıları anlatılan matematiksel yöntem izlendiğinde silindir duvarının konum-zaman ifadesini veren Eş. 6.1'in zamana göre diferansiyeli silindir duvar hızını vermektedir. Bu denklem aşağıda Eş. 6.2 ile verilmiştir.

$$V_r = \frac{d\Delta r_m}{dt} = a_1 \cdot \left[\frac{1}{b_1} (1 - e^{-b_1 t}) \right] + a_2 \cdot \left[\frac{1}{b_2} (1 - e^{-b_2 t}) \right] \quad (6.2)$$

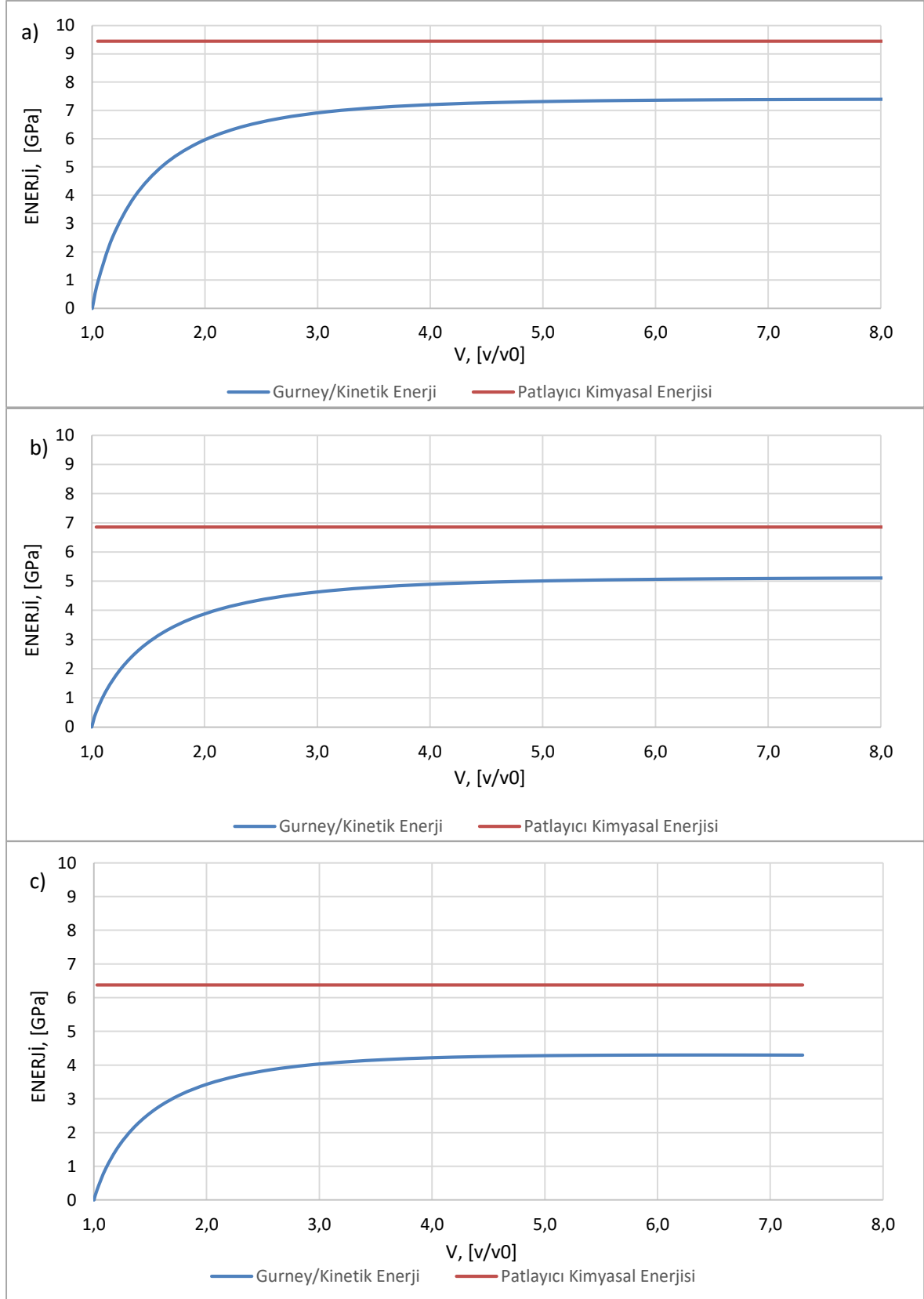
Hız fonksiyonunun zamana göre diferansiyeli alınarak ivme ifade edilebilir. Zamana bağlı hız ve ivme grafiği aşağıda Şekil 6.3 ile verilmiştir.



Şekil 6.3. Silindir enleşme testleri sonucunda matematiksel model ile hesaplanan silindir duvar hızlarının ve ivmelerinin eğrileri değişimi: a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF)

Grafikte verilen hız eğrileri deneysel ölçülen silindir duvar hızlarının Eş. 6.2 ile verilen hız fonksiyonuyla ifade edilmiş şeklidir. Başlangıçta durağan haldeki silindir duvarı, silindir içerisindeki patlayıcının infilakı sonrası detonasyon ürünü gazların genleşme enerjisiyle hızlandırılmaktadır. Durağan haldeki silindir duvarları, içerisindeki patlayıcının tipine göre 0 m/s'den itibaren hızlanmaya başlayarak yaklaşık 0,01 ms zaman sonra hızı en yüksek noktaya ulaşarak sabitlendiği görülmektedir. En yüksek hıza ulaşan silindir duvarı, beklendiği üzere en yüksek enerjik malzemesi bulunan S110 patlayıcısı ile doldurulmuş silindire aittir. S109 patlayıcılarının enerjik malzemesi S110'a göre daha düşük olsa da S109 (Al) patlayıcısı içerdiği alüminyum sayesinde S109 (LiF) patlayıcısının bulunduğu silindirden daha yüksek hıza ulaşabilmiştir. S109 patlayıcısının içerdiği enerjik malzeme detonasyon reaksiyonu sonrası alüminyum partikülleri detonasyon reaksiyon ürünleri ile reaksiyona girerek daha yüksek enerji açığa çıkmasına neden olmaktadır. Ancak LiF içeren S109 (LiF) içerisindeki LiF malzemesi inert olduğundan daha fazla enerji üretemez ve bu nedenle silindir duvarı daha düşük kalır. İvme eğrileri de bu duruma paralel olarak hareket etmiştir. S110 patlayıcısı için silindir duvarının ivmesi en yüksek durumdan başlayarak hız sabitlendikçe sıfır değerine yaklaşır. S109 patlayıcıları için başlangıç ivme değerleri oldukça yakın değerdedir. Bunun nedeni iki patlayıcıda da detonasyon reaksiyonunu gerçekleştiren enerjik malzeme kütle oranı aynı miktardadır. Her iki patlayıcı için de detonasyon reaksiyonu başlangıçta eşit şekilde gerçekleşmektedir. Detonasyon reaksiyonu sonunda S109 (Al) içindeki alüminyum reaksiyona girerek ivme eğrisinin biraz daha geç sıfıra yaklaşmasına neden olur.

Silindir duvarının zamana bağlı olarak hızı arttıkça kinetik enerjisi de artmaktadır. Kinetik enerji Gurney enerjisi ile ifade edilmektedir. Silindir duvar hızı kullanılarak hesaplanan Gurney enerjisinin zamana bağlı değişimi ve patlayıcının toplam kimyasal enerji eğrileri aşağıda Şekil 6.4 ile verilmiştir.



Şekil 6.4. Silindir duvarının kinetik enerjisi ve patlayıcı kimyasal enerjilerinin özgül hacim ile değişimi a) S110, b) S109 (Al), c) S109 (LiF)

Gurney enerjisi, silindir duvarının kinetik enerjisinin metal kütlesinin patlayıcı kütlesine oranıyla ilişkilendirilerek ifade eder. Bu enerji önceki bölümlerde anlatıldığı üzere Eş. 4.21 ile hesaplanmaktadır. Toplam kimyasal enerji ise patlayıcının reaksiyon enerjisidir. Detonasyon sonucu çevreye yapılan iş, her zaman toplam enerjinin belirli bir miktar altındadır. Tüm grafiklerde görüldüğü üzere çevreye yapılan iş patlayıcının kimyasal enerjisinden daha düşüktür. Aradaki kalan enerji farkı ise silindir duvarının deformasyon enerjisi veya çevreye ısı kaybı olarak yayılan enerji vb. şeklindedir. Patlayıcının kimyasal enerjisi literatür kaynaklarından veya EXTEC hidrokodundan yararlanılarak hesaplanmıştır. Grafikteki x-ekseni ise özgül hacmi ifade etmektedir. x-ekseninin birim kısmında bulunan v değeri, silindirin genişmesi sonucunda anlık hacim değerini ifade ederken v_0 değeri ise patlayıcının katı haldeyken olan ilk hacmini ifade etmektedir. Bu değerler hacim değeri olmasına karşın silindir boyu hesaba katılmaz. Bunun için çap değerlerinin oranları ile bulunmaktadır.

JWL parametreleri hesaplanırken kinetik enerji grafiklerinde silindir genişme miktarları %25, %50 ve %75 olarak belirlenerek bu anlardaki enerji değerleri kullanılmaktadır. Her bir genişme oranındaki enerji değeri için JWL parametreleri iterasyonlarla denenecek edilerek sağlama yapılmaya çalışılır. Böylece JWL parametreleri Bölüm 4.1.1’de anlatılan CJ sınır koşulları ve deneysel elde edilen enerji değerleri kullanılarak iterasyonlarla belirlenir.

Deneysel veriler kullanılarak JWL parametreleri hesaplanırken başlangıç değerlerinin elde edilmesi için EXTEC termokimyasal kodundan yararlanılmaktadır. JWL parametreleri A, B, C, R1, R2 ve ω simgeleriyle ifade edilir. Deneysel veriler kullanılarak hesaplama sırasında iterasyonların daha kolay yapılabilmesi için parametrelerin bir kısmı başlangıçta sabit alınır. R1, R2 ve ω parametreleri başlangıçta sabit alınarak A, B ve C parametreleri hesaplanmıştır. Deneysel verilerle yapılan hesaplama sırasında sabit alınan değerler Çizelge 6.2 ile verilmiştir. JWL parametrelerinin başlangıç değerleri, detonasyon şartlarının özellikleri ve patlayıcı kimyasal enerjisi tahmin etmek için EXTEC termokimyasal kodu kullanılmıştır. EXTEC termokimyasal kodu, patlayıcı enerjisi ve kısmi dengedeki detonasyon reaksiyonu sırasındaki CJ şartlarını gaz moleküllerinin çarpışma mekaniği yöntemiyle belirlemektedir.

Deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda elde edilen JWL parametreleri aşağıda Çizelge 6.4 ile verilmiştir.

Çizelge 6.4. Deneysel verilerle hesaplanan JWL değerleri

PATLAYICI	S110	S109 (Al)	S109 (LiF)
A [GPa]	832,9	690,02	4681
B [GPa]	28,84	8,07	8,1
C [GPa]	0,24	0,11	0,24
R1	5,26	4,8	4,50
R2	1,40	1,00	1,1
ω	0,31	0,17	0,14
ρ [kg/m ³]	1670	1660	1560
Q [GPa]	9,47	6,82	6,38
P _{CJ} [GPa]	27,95	17,79	14,22
V _D [m/s]	7980	7400	7075

Çizelgedeki A, B, C, R1, R2, ω ve P_{CJ} değerleri deneysel verilerle hesaplanarak elde edilmiştir. ρ ile verilen yoğunluk değerleri her patlayıcı için SAGE altyapılarında bulunan cihazlarla ölçülmüştür. Patlayıcıların toplam reaksiyon enerjisini gösteren Q değeri için SPEED veri tabanı kaynaklı literatür verilerinden yararlanılmıştır. Hesaplamalarda sınır koşullarından biri olan detonasyon hızı, V_D, testler sırasında ölçülmüştür. Bu hesaplar yapılırken Çizelge 6.2 içerisinde de verilen R1, R2, ω değerleri kullanılmaktadır. Ancak R1, R2 ve ω değerleri başlangıçta EXTEC kodu ile hesaplanan değerler olarak kullanılsa da hesaplama sırasında iterasyonlar yapılırken bu değerler de değiştirilmiştir.

6.3. Termokimyasal Kod (EXTEC), Deneysel ve Literatürden Elde Edilen JWL Parametrelerinin Karşılaştırılması

Bundan önce anlatılan 2 bölümde deneysel verilerle JWL değerleri hesaplanmış daha sonra EXTEC kodu kullanılarak JWL parametrelerinin elde edilme şekilleri anlatılmıştır. Öncelikle EXTEC kodunda patlayıcı bileşimi için detonasyon parametreleri ve JWL parametreleri belirlenmiştir. Deneysel verilerle JWL hesaplanması sırasında gerekli başlangıç koşulları ve sınır koşulları için eksik olan değerler, EXTEC kodu ile elde edilen değerlerden karşılanmıştır. EXTEC kodu tarafından hesaplanamayan alüminyum katkılı patlayıcıların bazı parametreleri ise literatürdeki benzer patlayıcıların verileri kullanılmıştır. Sonuç olarak 3 farklı patlayıcı tipi için EXTEC, deneysel ve literatür olmak üzere 3 farklı JWL kaynağı bulunmuş ve parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen bu parametreler aşağıda Çizelge 6.5 ile verilmiştir.

Çizelge 6.5. Deneysel, EXTEC ve literatür kullanılarak hesaplanan JWL parametreleri

PATLAYICI	S110			S109 (Al)		S109 (LiF)		
PARAMETRE KAYNAĞI	DENEYSEL	EXTEC	SPEED (LİTERATÜR)	DENEYSEL	SPEED (LİTERATÜR)	DENEYSEL	EXTEC	SPEED (LİTERATÜR)
A [GPa]	832,9	1867,7	1930,2	690,02	2133,9	468,1	1157,5	690,02
B [GPa]	28,84	22,01	14,10	8,07	9,43	8,1	12,46	8,07
C [GPa]	0,24	1,30	-	0,11	-	0,24	0,88	0,11
R1	5,26	5,90	5,96	4,8	6,26	4,50	5,85	4,8
R2	1,40	1,47	1,26	1,00	1,34	1,1	1,47	1,00
ω	0,31	0,41	0,31	0,17	0,17	0,14	0,36	0,17
ρ [kg/m ³]	1670	1670	1670	1660	1660	1560	1560	1560
Q [GPa]	9,47	8,47	9,46	6,82	6,830	6,38	3,544	6,38
P _{CJ} [GPa]	27,95	27,8	25,22	17,79	17,79	14,22	17,23	-
V _D [m/s]	7980	8662	8376,6	7400	7405,5	7075	7092	-

A, B, C, R1, R2 ve ω bir patlayıcının JWL hal denkleminin parametreleridir. Tabloda yer alan ρ değeri patlayıcının katı haldeki yoğunluk değeri olarak ölçülmektedir. Bu değer genleşme enerjisi hesaplanırken kullanılmaktadır. Q değeri ise patlayıcının reaksiyon enerjisidir ve termokimyasal kodlarla veya literatürden temin edilmektedir. P_{CJ} ve V_D değerleri sırasıyla CJ sınır koşullarını oluşturur. P_{CJ} değeri, CJ teorisi gereği analitik yöntemlerle hesaplanabilirken V_D ile gösterilen detonasyon hızı patlayıcı için karakteristik bir değer olarak ölçülebilmektedir.

S110, S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcıları için deneysel verilerle JWL parametreleri elde edilmiştir. Bu patlayıcılar için literatür JWL parametreleri de elde edilmiştir. S110 ve S109 (Al) patlayıcılarının literatür verisi olarak konvansiyonel patlayıcılar olan PBXN110 ve PBXN109 patlayıcıları kullanılmıştır. PBXN109 patlayıcısının hal denklemi TD-JWL şeklinde, Eş. 4.3 ile ifade edilmektedir. Eş. 4.3 içerisindeki λ değeri Eş. 4.51 ile hesaplanır. S109 (LiF) patlayıcısının literatür verisi λ 'nın 0 olarak alındığı. Yani S109 (LiF) patlayıcısının literatür verisi için PBXN109 patlayıcısının alüminyum yanma modeli kullanılmadığı durumdan elde edilmiştir. S110 ve S109 (LiF) patlayıcıları ideal davranış gösterdiği için JWL parametreleri EXTEC termokimyasal kodu ile hesaplanabilmiştir. Ancak S109 (Al) patlayıcısının reaksiyon mekanizması farklı olduğundan ideal davranış göstermemektedir. Bu nedenle EXTEC ideal olmayan patlayıcı tipleri için uygun bir kod olmaması nedeniyle S109 (Al) tipi bir patlayıcının JWL parametrelerini hesaplayamamaktadır.

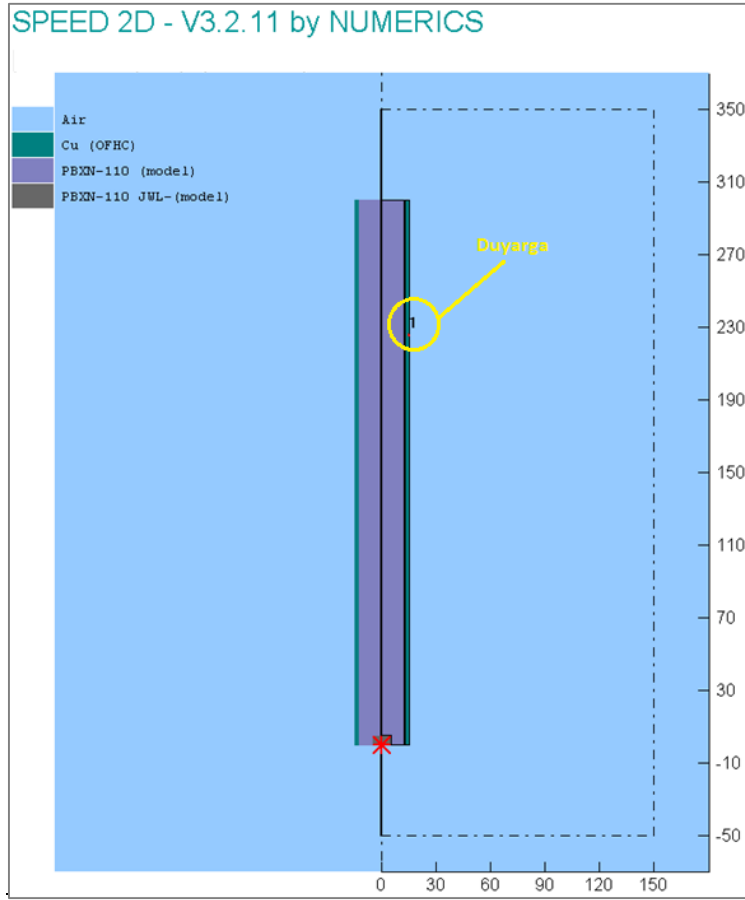
Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen bu parametreler, her bir patlayıcı tipi için kendi içinde karşılaştırılmıştır. Aynı patlayıcı tipi için JWL parametrelerinin farklı olması durumu patlayıcıların detonasyonu sonrası genişleme durumunu farklı hesapladığını göstermemektedir. Aynı denklem farklı parametrelerle verilse de matematiksel olarak aynı eğri ile ifade edilebilmektedir. Bu nedenle parametrelerin karşılaştırılması işi hal denkleminin genişleme eğrisi ile değil SPEED hidrokoduna patlayıcı hal denklemi için girdi yapılması ve belirli bir modelin çözümlenmesi yoluyla yapılmıştır. Karşılaştırma yapmak için SPEED hidrokodunda silindir genişleme test düzeneğinin modeliyle yapılmıştır. Silindir genişleme test düzeneği hidrokod içerisinde modellenerek test düzeneğinde yapıldığı gibi silindir duvarının hız eğrileri çözümlenmiştir. Çözümleme sonucunda her bir patlayıcı için elde edilen farklı JWL kaynakları EXTEC, deneysel ve literatür olarak karşılaştırılmıştır.

7. DENEYSEL, LİTERATÜR VE EXTEC KODUNDAN ELDE EDİLEN JWL PARAMETRELERİNİN SAYISAL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölüme kadar zamana bağlı JWL hal denkleminin parametrelerini elde etmek için plaka hızlandırma ve silindir genleşme test yöntemleri denenmiş ve silindir genleşme test düzeneği kullanılarak veri almada başarılı olunmuştur. Bu test yöntemiyle askeri standartlarla verilen ve üretim şartları açık kaynak olan PBXN110 ve PBXN109 patlayıcıların benzerleri kullanılmıştır. Bu patlayıcılar sırasıyla S110 ve S109 olarak üretilmiş, silindir genleşme testi ile JWL parametreleri elde edilmiştir. Bu bölümde deneysel, literatür ve EXTEC kaynaklarından elde edilen JWL parametrelerinin karşılaştırması yapılmış ve alüminyum katkılı patlayıcının Miller modelinin parametreleri belirlenmiştir. Miller modelinin parametreleri S109 patlayıcısının iki alt tipi olan S109 (Al) ve S109 (LiF) arasında kıyas yapılarak bulunmuştur. S109 (Al) patlayıcısının hal denklemi S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleri ve Miller modelinin parametrelerinden oluşmaktadır. Bu durumda S109 (LiF) patlayıcısının belirlenmiş olan JWL parametreleri ile birlikte Miller modelinin oluşturulduğu durumda S109 (Al) patlayıcısının genleşme durumu elde edilmelidir. Bu yaklaşımla S109 (Al) patlayıcısının zamana bağlı JWL denkleminde alüminyum yanma hızının modeli olan Miller modelinin parametreleri elde edilmiştir.

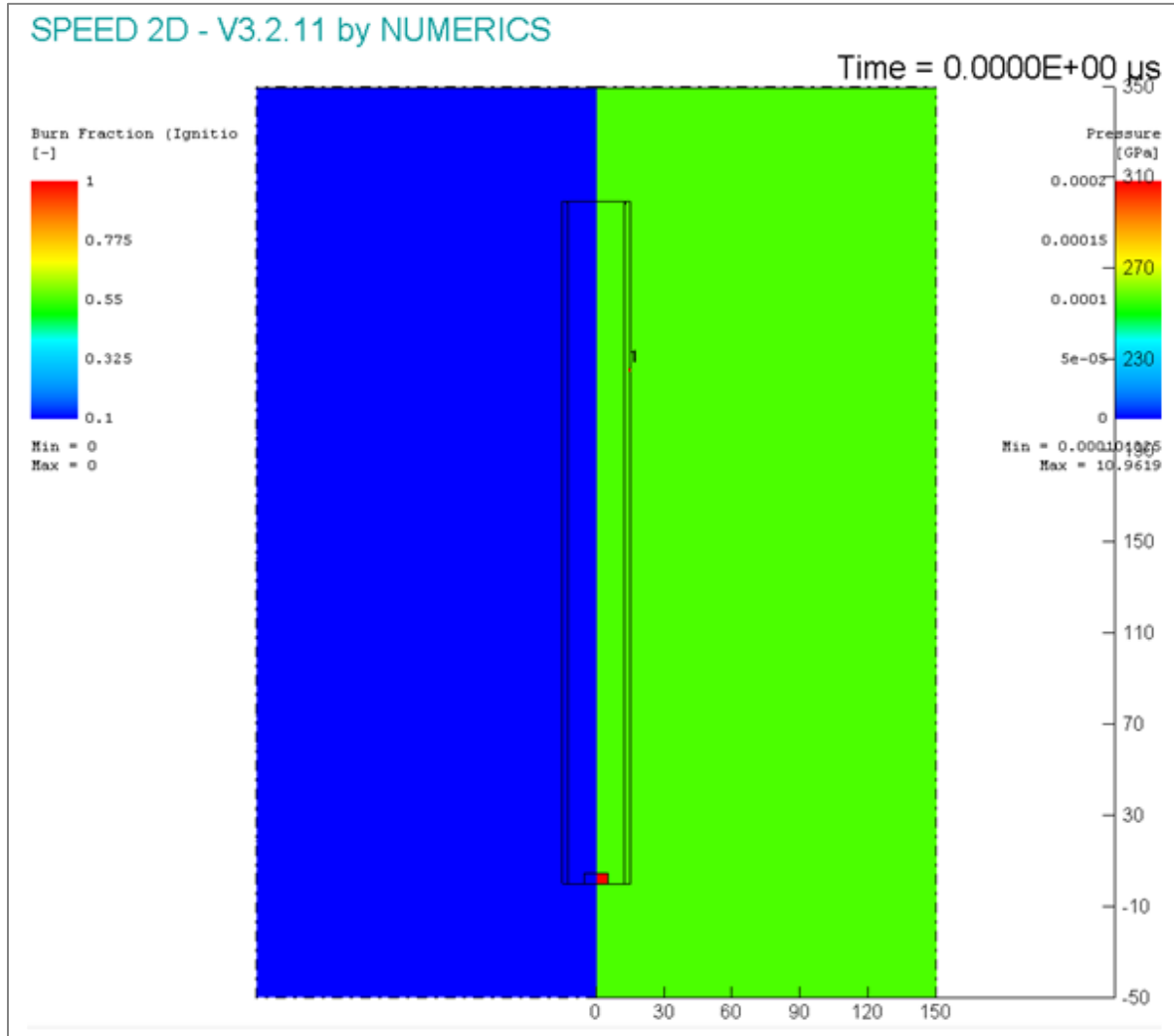
7.1. SPEED Hidrokodu

Testleri yapılan deney düzenekleri, bileşenlerin boyutları ve malzeme özelliklerine göre SPEED hidrokodu içerisinde modellenmiştir. Model eksenel simetrik olduğu için 2-boyutlu çözüm oluşturularak çözümleme süresi kısaltılmıştır. OFHC bakır boru içerisine patlayıcı doldurularak çözüm alanına yerleştirilmiştir. Bakır boru üzerinde, bakır boru duvarının radyal yöndeki hızı ölçümü için detonasyonun başladığı uçtan 230 mm mesafeye duyarga yerleştirilmiştir. SPEED hidrokod modeli aşağıda Şekil 7.1 ile gösterilmiştir.



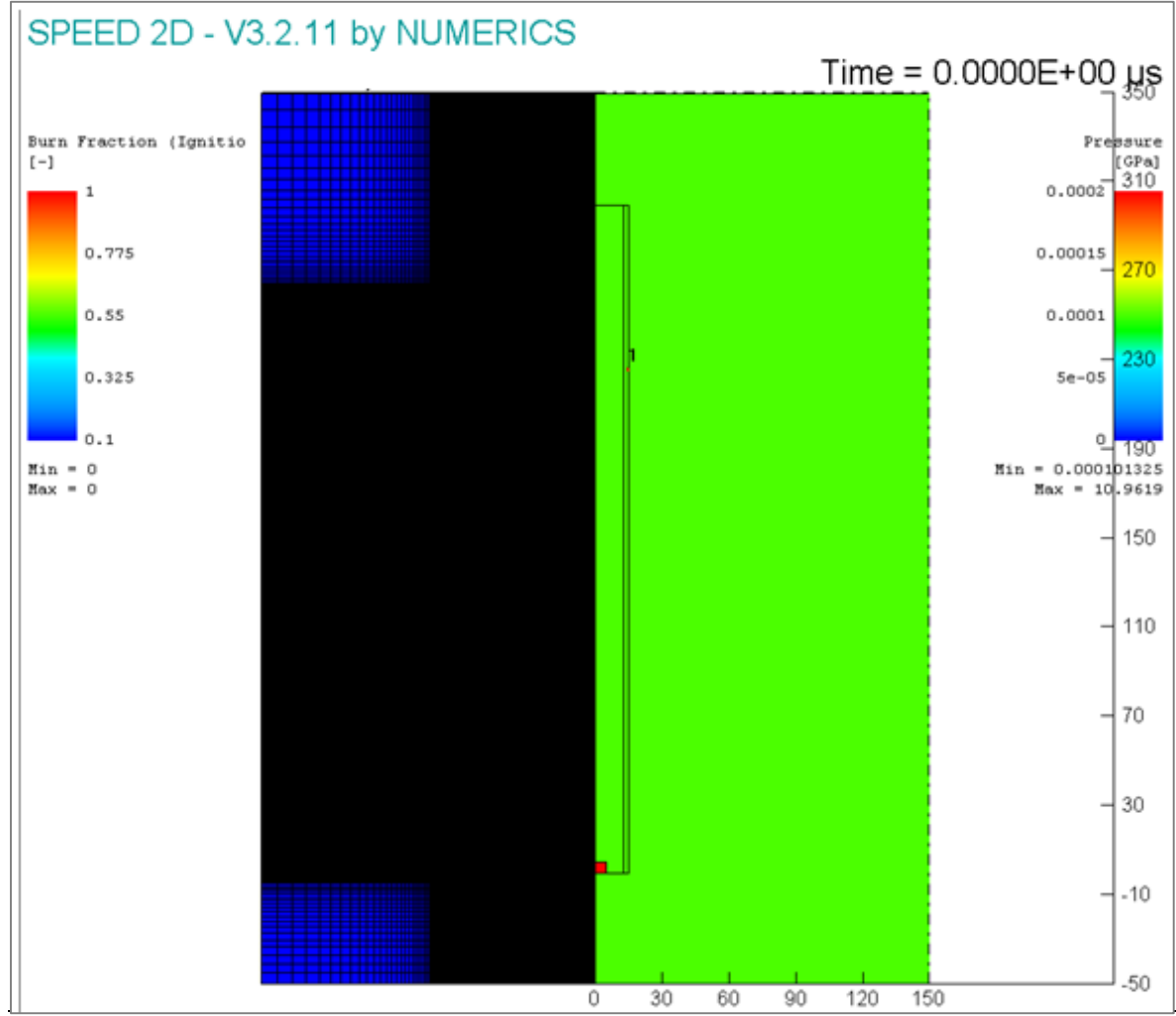
Şekil 7.1. SPEED Hidrokod modeli

Çözümleme alanı içerisindeki boş kalan tüm alan hava ile doldurularak çözümlemeye hazır hale getirilmiştir. Model eksenel yönde simetrik olduğu için akış değişimi ikiye bölünerek sol taraf patlayıcı reaksiyon oranı, sağ taraf ise basınç değişimi izlenebilmektedir. Modelin çözümleme alanı görüntüsü aşağıda Şekil 7.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 7.2. SPEED Hidrokod modelinin çözümleme alanı

Çözüm alanında Euler çözümleme yöntemi ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Detonasyonun ıraksamadan ilerleyebilmesi ve bakır boru duvarından hassas olarak veri alınabilmesi için ağ boyutları radyal ve eksenel yönde 0,3 mm olarak belirlenmiştir. Çözüm alanının geri kalanı ise hidrokodun ölçek katsayısına göre kademeli olarak genişleyerek en fazla 10 mm olarak belirlenmiştir. Modelin ağ görüntüsü aşağıda Şekil 7.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 7.3. SPEED Hidrokod modelinin ağ görüntüsü

Model ağ görüntüsünün sol yarısı ağ görüntüsünü göstermektedir. Ağ mesafelerinin en küçük olduğu bölümde birim alanda çok sayıda ağ çizgisi olduğundan tamamen siyah görünmektedir. Bu bölüm çözüm alanında ölçüm alınan ve akışın en yüksek olduğu bölgedir. Diğer bölgeye doğru gidildikçe programın otomatik ağ ölçeğine göre ağ yapısı genişler ve mavi renkte görülen bölge ortaya çıkar.

Çizelge 6.5 ile verilen parametrelerin her biri ayrı ayrı SPEED hidrokoduna girdi yapılarak çözümler yapılmıştır. Çözümler sonucunda hareketli duyardan zamana bağlı hız değişimleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. SPEED hidrokodu içerisinde, çözümleme sırasında kullanılan malzeme parametreleri için girdi yapılabilir. Patlayıcı malzemesinin infilak ettirilmesi için patlayıcının JWL parametreleri girilmesi gerekir. Bu şekilde infilak ettirilen patlayıcı girilen JWL parametrelerine göre detonasyon dalgası

oluşarak ilerler. JWL parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı SPEED hidrokoduna ait pencere aşağıda Resim 7.1 ile gösterilmiştir.

Resim 7.1. SPEED hidrokodu içerisinde patlayıcının JWL parametrelerinin girildiği pencere

A, B, C, R1, R2 ve ω parametreleriyle ifade edilen JWL hal denklemi hidrokod içinde C parametresi yerine e-JWL ile gösterilen reaksiyon enerjisi kullanılmaktadır. Bu şekilde JWL denklemi, Eş. 4.1 ile gösterildiği gibi ifade edilebilmektedir.

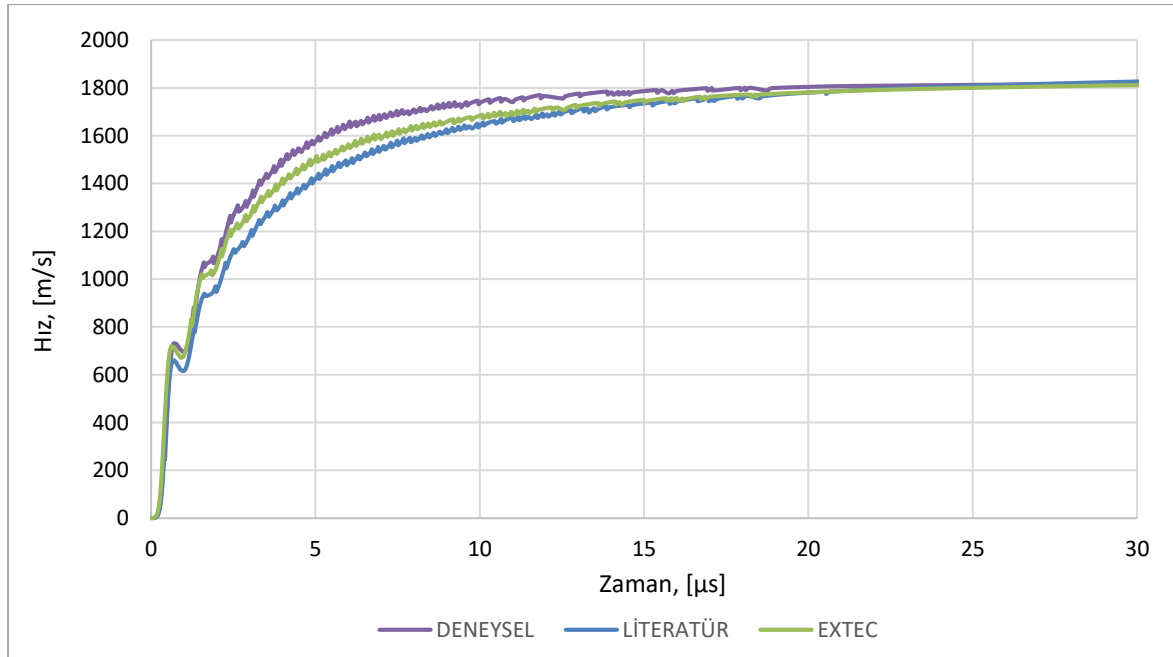
Patlayıcı ideal olmayan bir davranış gösteriyorsa veya bir başka deyişle alüminyum gibi detonasyon ürünleriyle reaksiyona girerek reaksiyon mekanizmasının yapısını değiştiriyorsa reaktif maddenin reaksiyon hız modeli kullanılabilir. Bu model alüminyum gibi detonasyon zaman ölçeğine göre daha geç oluştuğu ve zamana göre reaksiyon hızı değiştiği için zamana bağlı JWL veya TD-JWL ile verilmektedir. Bu model Miller modeli adıyla da bilinmekte olup SPEED hidrokodundaki girdi penceresi aşağıda Resim 7.2 ile verilmiştir.

Resim 7.2. SPEED hidrokodu içerisinde patlayıcının Miller-Model parametrelerinin girildiği pencere

Pencere içerisinde verilen parametrelerden q ile gösterilen patlayıcının reaksiyon enerjisini ifade eder. Patlayıcı miktarına göre ölçülebilen bir değer olup literatürden elde edilebilmektedir. Miller modeli için a , m ve n kat sayılarının fiziksel anlamları Bölüm 4.2’de verilmiştir. S109 patlayıcısının reaktif olan alüminyum katkılı ve inert olan LiF katkılı tipleri arasında deneme yanılma yoluyla elde edilen parametre bunlardır. Geriye kalan referans basınç değeri modelin hesaplaması sırasında sabit değer alınır ve bu değer 0,1 Pa olarak verilmektedir.

7.2. JWL Parametreleriyle SPEED Hidrokodunda Yapılan Analizler Sonucunda Elde Edilen Karşılaştırma Sonuçları

S110 patlayıcısı için deneysel olarak elde edilen parametreler ile literatürden elde edilen ve EXTEC kodu ile hesaplanan JWL parametreleri için çözümleme sonuçları aynı grafikte birlikte gösterilerek aşağıda Şekil 7.4 ile verilmiştir.



Şekil 7.4. S110 patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genleşme çözümlemeleri sonucunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi

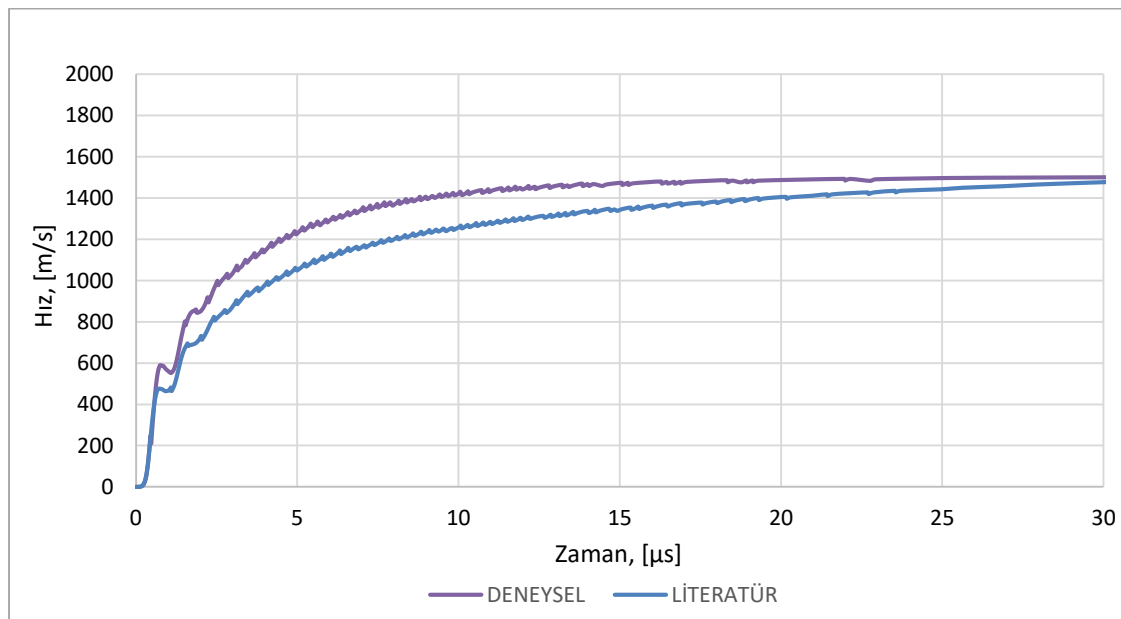
S110 patlayıcısının farklı kaynaklardan elde edilen JWL parametreleriyle hesaplanan silindir duvarının hız eğrilerinin genel olarak birbirine çok yakın elde edilmiştir. Bunun en önemli göstergesi hızlanmaya başlamanın başlangıç ve bitiş zamanlarındaki hız değerlerinin aynı olmasıdır. Tüm çözümlemeler sonucunda hız değeri her biri için yaklaşık 1800 m/s değere

ulaşmıştır. Yaklaşık 20 μ s sonrasında silindir duvarının hızları her 3 durum için de eşitlenmiştir. 2 μ s ve 10 μ s zaman aralıklarında ise ivmelenmeye bağlı olarak ölçüm hassasiyetinin düştüğü görülmektedir.

Çizelge 7.1. S110 patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidrokod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları

ZAMAN [μ s]	HIZ [m/s]			FARK % (Deneyssel- Literatür)	FARK % (Deneyssel- Extec)
	S110 (DENEYSEL)	S110 (SPEED)	S110 (EXTEC)		
5	1574,6	1410,2	1491,7	10,44%	5,26%
10	1731,6	1644,9	1687,2	5,01%	2,56%
15	1781,7	1737,4	1749,4	2,49%	1,81%
20	1800,0	1770,0	1781,5	1,67%	1,03%
25	1816,7	1810,8	1800,1	0,21%	0,91%
30	1818,0	1820,0	1814,1	-0,11%	0,21%

Alüminyum katkılı S109 patlayıcısı için elde edilen deneyssel veriler aynı şekilde literatürden elde edilen JWL parametrelerinin silindir genleşme modeline girdi yapılarak silindir duvar hızları karşılaştırılmıştır. EXTEC kodu alüminyum katkılı patlayıcıların kısmi detonasyon reaksiyonunu hesaplayamadığı için alüminyum katkılı S109 patlayıcısı için yapılan model karşılaştırmasında yer almamaktadır. S109 (Al) patlayıcısına ait hız karşılaştırması aşağıda Şekil 7.5 ile gösterilmiştir.



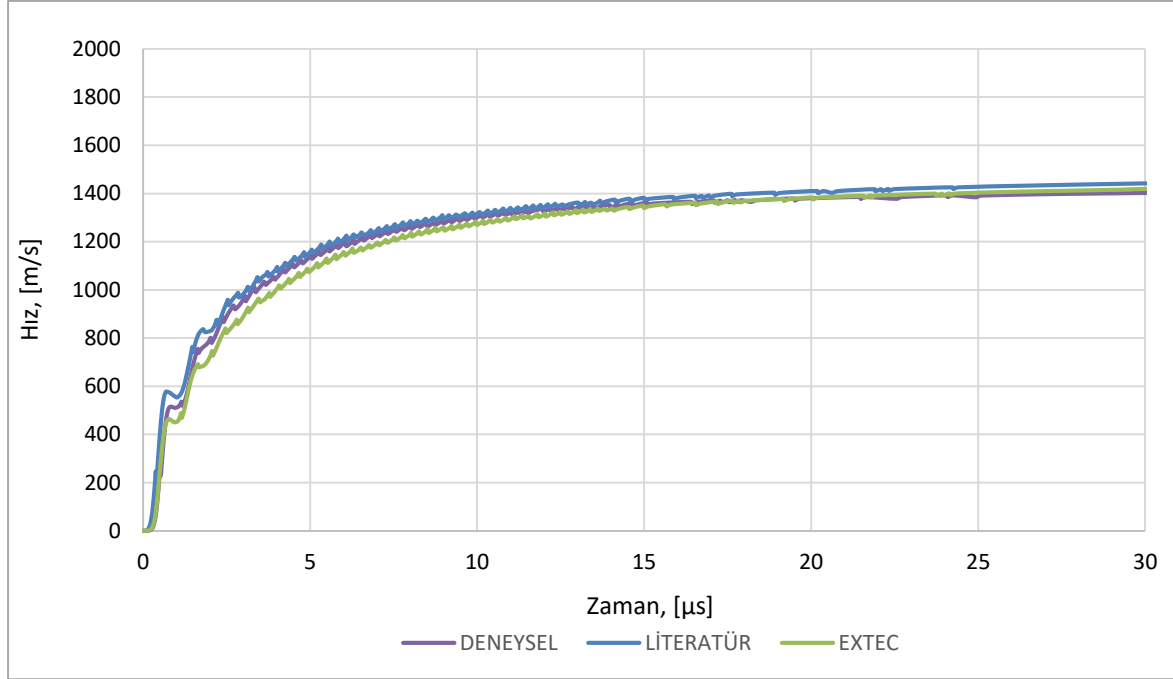
Şekil 7.5. S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genleşme çözümlemeleri sonucunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi

Hız eğrilerinin başlangıç zamanlarının aynı olması ve bitiş zamanlarında aynı hıza ulaşmaları nedeniyle grafikte deneysel ve literatür verileriyle elde edilen hız eğrilerinin uyumlu olduğu söylenebilmektedir. 5 μ s ve 20 μ s zamanlarda hızlanma farkının temel nedeni deneysel hız eğrisinin ideal JWL parametreleriyle ifade edilmesidir. Ancak deneysel ve literatür kaynağından elde edilen verilerle yapılan çözümleme sonucunda en yüksek hız değeri yaklaşık olarak 1500 m/s'ye ulaşmıştır. Alüminyumlu patlayıcıların detonasyonu sırasında reaksiyon bölgesi daha geniş bir alana yayılır. Alüminyum partikülleri reaksiyona girmeden önce gazlaşarak detonasyon ürünlerinin enerjisinin bir kısmını kullanır ve sonrasında detonasyon ürünleriyle reaksiyona girerek genleşme enerjisinin de bir kısmını tüketmiş olur. Reaksiyon enerjisi başlangıçta düşerken alüminyumun detonasyon ürünleriyle reaksiyonu sonunca daha yüksek enerji açığa çıktığından nihai enerjiyle ulaşmış olur. Bu yüzden literatür verisinde bu model zamana bağlı alüminyum yanma hız modeli kullanıldığından enerji zamanla artmıştır. Deneysel veri ile elde edilen JWL parametresi ideal denklem şeklinde olduğundan iki eğrinin hareketi alüminyum reaksiyonu boyunca farklı seyretmiştir.

Çizelge 7.2. S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidrokod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları

ZAMAN [μ s]	HIZ [m/s]		FARK %
	S109 (Al) (DENEYSEL)	S109 (Al) (SPEED)	
5	1048,3	1228,3	-17,20%
10	1258,0	1420,7	-12,90%
15	1341,5	1472,0	-9,70%
20	1404,0	1485,0	-5,80%
25	1442,0	1494,0	-3,60%
30	1473,0	1500,0	-1,80%

S109 (LiF) patlayıcısı için deneysel elde edilen JWL parametreleri, EXTEC kodu ve literatür verileri ile elde edilen hidrokod çözümlemelerindeki silindir duvar hızları karşılaştırılmıştır. Bu hızlara ait eğriler aşağıda Şekil 7.6 ile verilmiştir.



Şekil 7.6. S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan silindir genişleme çözümleri sonucunda SPEED hidro kodunda elde edilen hız verilerinin zamanla değişimi

SPEED hidro kodunda yapılan çözümleme sonucunda farklı JWL kaynakları için S109 (LiF) patlayıcısının silindir duvar hız değerleri birbiriyle iyi bir örtüşme sağlamıştır. Detonasyon yapısı itibarıyla ideal davranış gösteren patlayıcının en yüksek hız değeri yaklaşık 1400 m/s bulunarak beklendiği gibi S109 (Al) patlayıcısından daha düşük seviyede kalmıştır.

Şekil 7.6 ile verilen grafikte görülen farkların deneysel veriye göre farkları 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 μ s zamanlar için farkları hesaplanmıştır. Bu anlardaki hız değerleri ve fark oranları aşağıda Çizelge 7.3 ile verilmiştir.

Çizelge 7.3. S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleriyle yapılan hidro kod çözümleme sonucu elde edilen hız değerlerinin hata oranları

ZAMAN [μ s]	HIZ [m/s]			FARK % (Deneysel- Literatür)	FARK % (Deneysel- Extec)
	S109 (LiF) (DENEYSEL)	S109 (LiF) (SPEED)	S109 (LiF) (EXTEC)		
5	1139,8	1158,9	1081,0	-1,70%	5,20%
10	1303,2	1314,5	1270,4	-0,90%	2,50%
15	1359,0	1381,8	1339,6	-1,70%	1,40%
20	1380,0	1409,0	1384,0	-2,10%	-0,30%
25	1384,0	1427,0	1402,0	-3,10%	-1,30%
30	1402,0	1441,0	1418,0	-2,80%	-1,10%

Hesaplanan LiF ve alüminyum katkılı S109 patlayıcılarının JWL parametreleriyle elde edilen bakır borunun radyal duvar hızları aşağıda verilen grafikteki gibi karşılaştırılmıştır. Eğriler arasında yaklaşık 2,5 μ s sonra oluşmaya başlayan hız farkı alüminyumun detonasyon ürünleriyle meydana getirdiği reaksiyon enerjisinden kaynaklanmaktadır. Bu farkın zamana bağlı JWL denklemiyle ifade edilebilmesi ve ikinci yanma veya diğer adıyla Miller modelinin parametreleriyle ifade edilebilecektir.

7.3. Zamana Bağlı JWL Denklemi için Miller Modeli Parametrelerinin Hesaplanması

SPEED hidrokodunda çözümlenen LiF katkılı patlayıcının JWL parametreleri kullanılarak alüminyumun zamana bağlı çözüm modeli de aktif hale getirilmiştir. Bu kısımda belirlenmesi gereken parametreler enerji değeri ile zamana bağlı çözüm modelinin a, m ve n katsayılarıdır. Bu parametreler SPEED hidrokoduna patlayıcı hal denklem parametreleri girdi yapılarak modellenen silindir duvarının hızının karşılaştırmasıyla bulunmuştur. S109 (Al) parametreleri kullanılarak elde edilen silindir duvar hızının zamana bağlı eğrisi, S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametrelerinin yanı sıra Miller modelinin parametreleri de girdi olarak kullanılmıştır. SPEED hidrokodun içerisinde yer alan ve katsayılara girdi yapılan pencere aşağıdaki Resim 7.3 gösterilmiştir.

S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleri

General JWL

JWL-Parameters:

A: 468.1 GPa

B: 8.1 GPa

R1: 4.5

R2: 1.1

w: 0.14

eJWL: 4088390 J/kg

Specific Heat cv: 1114.1 J/kg/K

TD-JWL (Miller-Model):

Specific Afterburn Energy q: 0 J/kg

Energy Release Constant a: 0 Hz

Energy Release Exponent m: 0

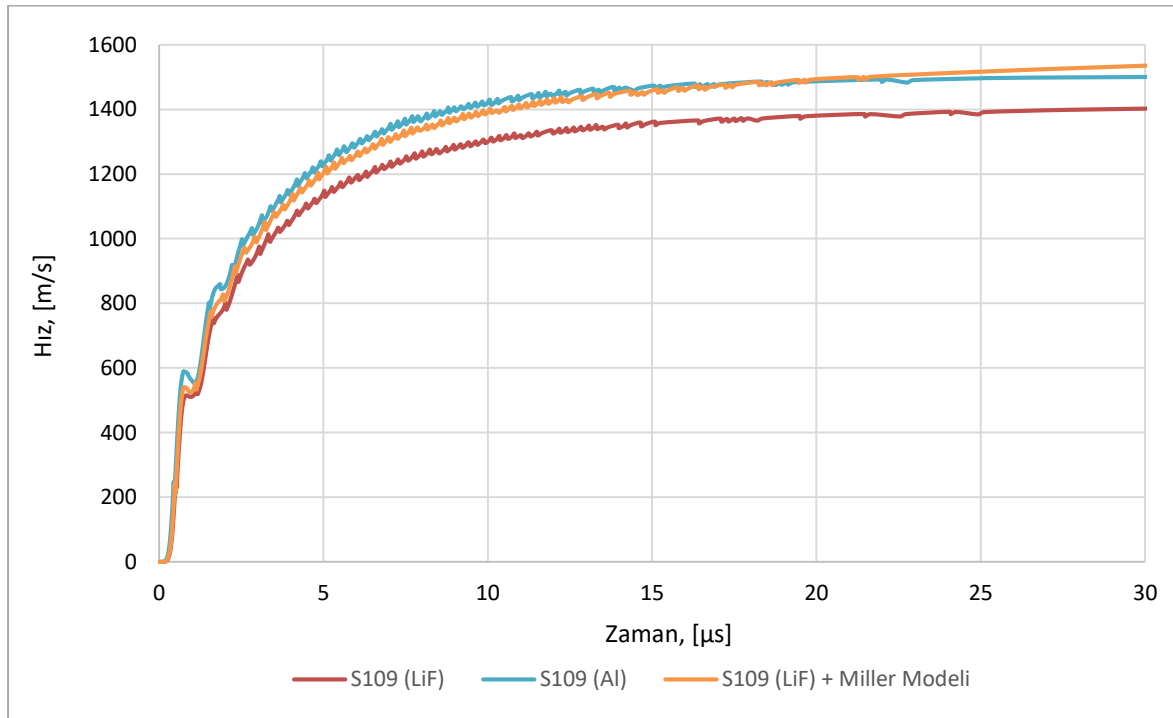
Pressure Exponent n: 0

Reference Pressure pu: 1E-10 GPa

Resim 7.3. SPEED hidrokodunun S109 (LiF) patlayıcısının JWL parametreleri için girdi penceresi

Yukarıdaki şekilde S109 (Al) patlayıcısının Miller modeli deneme yanılma yoluyla belirlenecektir. Özgül yanma sonrası enerjisi (İng. specific afterburn energy) olarak ifade edilen kısım alüminyumun tam reaksiyonu sonucu oluşan birim enerji miktarıdır. Bu değer EXTEC termokimyasal kodu kullanılarak bulunmuştur. Kodun içerisinde alüminyum katkılı S109 patlayıcısı için alüminyumun tam reaksiyonu sonucu oluşan toplam kimyasal enerjisi

ile alüminyumun inert olarak alındığı S109 patlayıcısı için elde edilen patlayıcı kimyasal enerjisi arasındaki fark alüminyumun tam reaksiyon enerjisini vermektedir. Bu hesaplama sonucunda alüminyum enerjisi $3,8 \times 10^6 \text{ mm}^2/\text{ms}^2$ olarak belirlenmiştir. Diğer parametreler ise enerji çıkış sabiti, a , enerji çıkış kuvveti, m ve basınç kuvveti n ifadeleridir. Referans basınç ise 0,1 Pa olarak kabul edilmektedir. A , m ve n katsayıları deneme yanılma yöntemiyle girilerek alüminyum katkılı patlayıcı ile elde edilen duvar hızı eğrisine yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Başlangıç değerleri olarak Miller ve Guirguis tarafından alüminyum katkılı patlayıcılar için önerilen parametreler $a=0,4$, $m=0,5$ ve $n=0,1667$ kullanılmıştır [51]. Deneysel olarak elde edilen S109 (LiF) patlayıcı modeli, S109 (Al) patlayıcı modeli ve S109 (LiF) modeline zamana bağlı alüminyum yanma modeli eklenerek elde edilen modelin hız eğrileri aşağıda Şekil 7.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 7.7. S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcılarının zamana bağlı alüminyum yanma hızı modeli ile SPEED hidrokodunda elde edilen silindir duvarının hız eğrileri

LiF deneysel elde edilen JWL parametreleriyle alüminyumun yanma hızı modeli hesaba katılarak yapılan çözümleme sonucunda elde edilen hız eğrisi alüminyum katkılı patlayıcının hız eğrisi ile örtüştüğü değerlendirilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gelişen harp başlığı teknolojilerinde farklı tipte patlayıcılar kullanılarak etkinlik arttırılmaya çalışılmaktadır. Etkinliğinin daha fazla arttırılması için kullanılan en yaygın reaktif katkı malzemelerinden biri alüminyumdur. Alüminyum katkılı patlayıcılar içerisinde yüksek enerjik malzeme ve farklı tane boyut dağılımına sahip alüminyum partikülleri bulunur. Harp başlıklarının etkinlik çalışmalarını yapabilmek için patlayıcının genleşme durumunun bilinmesi gerekmektedir. Etkinlik çalışmaları ticari bilgisayar programlarında hidrokod analizleri ve test şeklinde yapılmaktadır. Hidrokod analizleri ne kadar doğru olursa harp başlığının geliştirilmesi sırasında farklı durumlar için test sayısı azaltılmakta ve maliyet düşürülmektedir. Hidrokodlara patlayıcının girdi olarak kullanılan parametreleri detonasyon sonrası genleşen gazların hal denklemi parametreleridir. Patlayıcıların detonasyon sonrası hal denklemi için JWL hal denklemi kullanılmaktadır. Alüminyum katkılı patlayıcılarda alüminyum detonasyon ürünleri ile reaksiyona girer. Dolayısıyla patlayıcı içindeki yüksek enerjik malzeme detonasyon reaksiyonu sonucu oluşan enerji önce azalır daha sonra alüminyumla reaksiyonu sonucu tekrar artar. Bu nedenle alüminyumun reaksiyonu detonasyon reaksiyonun gerçekleşmesi ve aktifleşme enerjisini kazanmasına bağlı olduğu için zamana bağlı olarak yanma oranı değişmektedir. Alüminyum katkılı patlayıcıların hal denkleminde zaman bağlı olarak değişen fonksiyonla kullanılmaktadır. Bu yeni hal denklemi TD-JWL hal denklemi olarak adlandırılmakta zamana bağlı fonksiyon ise Miller modeli olarak bilinmektedir. Tez çalışmaları kapsamında alüminyum katkılı patlayıcıların detonasyonu sonrası ortaya çıkan detonasyon ürünü gazların JWL durum denklemi parametrelerinin elde edilmesi için test düzeneği kurulumu için araştırma yapılmıştır. JWL denkleminin belirlenmesi için silindir genleşme ve plaka hızlandırma test yöntemleri kullanılmaktadır. Daha düşük maliyetli test yapılabilmesi için öncelikle plaka hızlandırma test yöntemi ardından silindir genleşme test yöntemi kullanılmıştır.

Plaka hızlandırma testinde test düzeneğini doğrudan etkileyen en önemli bileşen hız ölçüm cihazıdır. Patlama sonrası plaka hızlanırken plaka üzerinde deformasyon, erime ve uçuş ekseninden sapma görülmektedir. Hız ölçüm sistemi olarak kullanılan VISAR cihazı hız ölçümünü, gönderdiği lazer ışınının plaka yüzeyinden yansyarak geri dönen ışın üzerinden gerçekleştirir. Bu nedenle plaka uçuşu sırasında yapısal özelliklerini ve doğrultusunu kaybetmemelidir. Bunun için test düzeneği SPEED hidrokodunda modellenerek farklı

durumlar için kontroller yapılmıştır. Ölçümü etkileyen parametrelerden biri plakanın kalınlığıdır. Plaka kalınlaştıkça plakanın patlayıcıdan yapısal olarak etkilenmesi daha az olmasına karşın elastik ve plastik dalgaların plaka içinde sürekli hareket etmesi sonucu birçok noktada parçalanmaya neden olur. Plaka kütle kaybına uğradığından uçuş sırasında momentum korunumuna göre hız ölçümü hataya neden olabilir. Sistem düzeneği SPEED hidrokodunda 2-boyutlu modellenerek farklı plaka kalınlıkları için yapılan çözümlemeler değerlendirilmiştir. 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm plaka kalınlıkları için yapılan çözümleme sonucunda 1 mm kalınlıktaki plaka kullanıldığında parçalanma olmadığından kalınlık 1 mm olarak belirlenmiştir. Patlayıcının infilakı sırasında oluşan detonasyon dalgası bir yay biçiminde ilerlemektedir. Detonasyon dalgası plakaya çarptığında merkezden kenarlara gidildikçe dalga'nın ulaşımı gecikir ve metal plakanın aksel olarak konumunun değişmesine neden olur. Alüminyum katkılı patlayıcılarda alüminyum partiküllerinin reaksiyonu, patlayıcı içindeki yüksek enerjik malzemenin detonasyonu sonrasında gerçekleşmeye başladığından metal plakaya etkiyen kuvvet daha uzun süre değişime uğrar. Bu nedenle alüminyum reaksiyonunun enerjisini belirleyebilmek için daha uzun süre veri almak gerekmekte ve plakanın doğrultusunu daha uzun süre koruması gerektiği anlamına gelmektedir. JWL parametrelerinin hesaplanabilmesi için patlayıcı hacminin 3 katına kadar daha fazla genişleme hacmi ölçülmesi gerekmektedir. Bu hacim için veri alma süresi yaklaşık olarak 30-40 μ s olmaktadır. Plaka hızlandırma test düzeneğinde gerçekleştirilen testler sırasında en çok 1 μ s süre boyunca veri alınabildiği görülmüştür. Bu süre içinde hesaplanan en yüksek hız yaklaşık 200 m/s civarındadır. Hedeflenen sürenin çok altında bir süre için veri alınması plakanın yansıtıcılığının bozulduğunu göstermektedir. Patlayıcının infilakı sonrasında plaka üzerindeki yansıtıcılığın bozulmasının plakanın eksen değişikliğinden ve plaka üzerindeki deformasyonlardan meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sorunların düzeltilmesi için literatür çalışmalarında kullanılan düzlemsel dalga merceklerinin amacı ve yapısı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle ateşleme sisteminde detonasyon dalgasını daha çabuk kararlı hale getiren ve daha düzlemsel bir dalga oluşturularak plaka doğrultusunun bozulması engellenmeye çalışılmıştır. Patlayıcıya iletilen şok dalgasını daha çabuk kararlı hale getirmek ve düzlemselleştirmek için yemleme şarjı geometrisi değerlendirilmiştir. Koni ve silindir şeklinde kullanılan yemleme şarjları karşılaştırılmış yapılan 2-boyutlu SPEED analizlerinde koni şeklinin kullanılmasına karar verilmiştir. Analizler sonucunda silindir biçimi patlayıcı ateşlemeyi tek kademede yaparken koni biçimi dışa doğru genişleyen yüksek basınç dalgası oluşturmaktadır. Sürekli kademeli ateşleme yapması nedeniyle SPEED hidrokodunda yapılan çözümlemelerle test düzeneğinde koni biçimindeki yemleme

şarjı tercih edilmiştir. Hızlı şekilde kararlı hale getirilen detonasyon dalgası dalga şekillendirici kullanılarak düzlemsel hale getirilebilmektedir. Bu amaç için farklı yöntemler kullanılsa da üretimin basit ve kontrollü olması bakımından inert malzeme ile detonasyon dalgasına karşı bir çeşit sönümleyici olarak kullanılmıştır. Detonasyon dalgasının eğriliği ve yoğunluğuna göre yaklaşık olarak yarı küresel şekil verilen dalga şekillendirici için teflon malzeme kullanılmıştır. Teflon malzemesi kolay işlenebilirliği, reaksiyona girmemesi ve görece yüksek empedansından dolayı tercih edilmiştir. SPEED hidrokodunda modellenerek analiz sonucunda boyutları belirlenen düzlemsel dalga merceği için uygun boyutlar bulunmuştur. Yeni ateşleme sistemi kullanılarak yapılan testler sonucunda yine veri alınamamış ve araştırmaya devam edilerek yüksek detonasyon basıncının metal plaka yüzeyinde oluşturduğu yüksek basıncın bölgesel erimelere neden olduğu anlaşılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında empedans eşleştirme yönteminin erimeyi engelleyebileceği anlaşılmıştır. Metal plaka üzerine gelen yüksek basınçlı şok dalgası metalin serbest yüzeyine ulaşarak ilerleyebileceği uygun bir empedansta ortama geçemeyerek geri yansımaktadır. Geri yansıma basıncı her zaman daha büyük olduğu için plaka yüzeyinde çok daha yüksek bir basınç oluşturur. Deneme test çalışmaları sırasında tesadüfen bulunan metal plaka parçasındaki yüzeyindeki değişikliğin bu teoriyi desteklediği görülmüştür. Bu nedenle şok basıncı sonucunda ani sıcaklık yükselmesinden kaynaklanan erime olabileceği araştırılmaya başlanmıştır. Araştırmalar sonucunda şok basıncına bağlı faz değişimi interferometrik hız ölçüm yöntemlerinde sıkça karşılaşılan sorun olduğu öğrenilmiştir. Katı malzemeler üzerinde ilerleyen şok dalgasının yansımaları sonucunda malzeme içerisinde parçalanma veya faz değişimini engellemek için empedans eşleşmesinden yararlanılarak bazı analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu nedenlerden dolayı erime nedeniyle yoğunluk, yansıtıcılık ve ses hızındaki değişikliklerin yanı sıra yüzeydeki şekil bozukluklarından gelen lazer ışınının dağılmasına neden olmuştur. Metal plaka yüzeyindeki bölgesel erimelerin giderilmesi için empedans eşleştirme çalışmaları yapılmıştır. Bunun için metal plaka önüne dalganın geçebileceği, empedansı havadan daha yüksek veya metal plakaya daha yakın bir ortam oluşturmaya çalışılmıştır. Şok dalgasının iletileceği yeni ortam için PMMA malzemesi kullanılmıştır. PMMA kullanılarak yeni düzenek için SPEED hidrokodunda 2-boyutlu modelleme yapılmıştır. Patlayıcı ve plakayı içeren yeni düzenek kullanılarak testlerin simülasyonlarında metal plaka yüzeyindeki sıcaklıklar eski sistemin çözümleme sonuçlarıyla karşılaştırıldığında PMMA kullanılarak oluşturulan yeni düzenek için metal plaka yüzeyindeki sıcaklıkların bakırın erime noktasının altına düşürüldüğü görülmüştür. Üretilen yeni düzenekle yapılan testlerde hız ölçümü gerçekleştirilememiştir. Bu duruma

neden olan etkenin SPEED hidrokodunda ideal olarak modellenenebilmesine rağmen pratikte PMMA malzemeden üretilen plakaların bakır plaka ile arasında hava boşluğunun bulunması nedeniyle ideal ortamın sağlanamamasıdır. Pratikte uygulaması zor olan bu durum nedeniyle plaka hızlandırma testlerinde VISAR cihazının kullanımının uygun olmayabileceğinden onun yerine PDV cihazının kullanılması gerektiği değerlendirilmiştir. PDV cihazı mevcut olmadığından test sistemi değiştirilerek silindir genleşme test düzeneği geliştirilmeye çalışılmıştır. Plaka hızlandırma sistemi kullanılarak plaka hızı ölçülemese de şok fiziği çalışmaları açısından birçok kazanım ve bilgi edinilmiştir. Kurulan plaka hızlandırma test düzeneğinin diğer bir katkısı ise metal malzemelerin şok karakteristiğinin belirlenmesidir. VISAR cihazı ile TD-JWL hal denklemini belirlemek için yeterli zaman içerisinde hız ölçümü gerçekleştirilemese de detonasyon dalgasının metal plakaya çarptığı anda plaka üzerinde oluşan elastik ve plastik dalga hareketleri görülebildiğinden metal malzemelerin şok karakteristiğinin belirlenmesi için çalışmalara zemin hazırlamıştır.

Alüminyum katkılı patlayıcılar için yapılan silindir genleşme test düzeneği için en büyük çekincelerden biri patlayıcı boyutlarına bağlı olan test maliyetleridir. Alüminyum katkılı patlayıcıların içerisindeki alüminyum kütleli oranı arttıkça kararlı detonasyonun oluşturulması için daha yüksek çapta patlayıcı kullanılması gerekmektedir. Testlerde kullanılacak patlayıcı için PBXN109 benzeri patlayıcı kullanılmıştır. Bu patlayıcı kütleli olarak yaklaşık %20-22 oranında alüminyum içermektedir. Test çalışmasında kullanılan alüminyum kütleli oranları standart silindir genleşme düzeneğinde kullanılan patlayıcı boyutlarının kullanımına izin vermektedir.

Silindir genleşme testleri için yüksek oranda enerjik malzeme (RDX) içeren ve detonasyon ürünleri genişirken ideal davranış gösteren PBXN110 benzeri S110 patlayıcısı, enerjik malzeme ile birlikte reaktif alüminyum içeren ve detonasyon sonrası gazların ideal olmayan davranış gösterdiği PBXN109 benzerinde S109 (Al) patlayıcısı ile inert malzeme olan LiF katkılı S109 (LiF) patlayıcıları olmak üzere 3 farklı tipte patlayıcı üretilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen konum eğrileri literatürde önerilen üssel fonksiyon ile modellenerek hız ve ivme eğrileri elde edilmiştir. Modellenen silindir duvar hızları ile duvar kinetik enerjileri hesaplanmış, Bölüm 4.4.1’de anlatılan algoritma ile JWL parametreleri elde edilmiştir. SPEED hidrokodu içerisinde yaygın olarak kullanılan birçok patlayıcının JWL parametreleri mevcuttur. Literatür verileri için SPEED veri tabanı içerisinde bulunan JWL parametreleri kullanılmıştır. LiF katkılı PBXN-109 patlayıcısı SPEED hidrokodunda

hesaplanması mümkündür. Hidrokod içerisindeki zamana bağlı yanma kısmı devre dışı bırakıldığında literatür verisi olarak değerlendirilebilir. Deneysel verilerin karşılaştırıldığı bir diğer kaynak ise EXTEC termokimyasal kodudur. EXTEC kodu ideal davranış gösteren patlayıcıların denge halindeki reaksiyonların muhtemel ürünlerine göre detonasyon parametrelerini moleküler çarpışma teorisini kullanarak hesaplar. Detonasyon sırasında alüminyum partiküllerinin kısmi yanma reaksiyonu oluşması nedeniyle EXTEC termokimyasal kodu bu kısmi yanma reaksiyonunu hesaplayamaz, ancak tam yanma veya alüminyum malzemesinin inert olarak hesaplayabilmektedir. Bu nedenle EXTEC hidrokodu ile elde edilen parametreler alüminyum içermeyen S110 patlayıcısı ve inert malzeme olan S109 (LiF) patlayıcısının karşılaştırılması için kullanılabilmiştir. S109 (Al) patlayıcısının JWL parametreleri için S109 bileşenleri içinde alüminyum inert malzeme şeklinde varsayım yapılarak hesaplanabilmiştir. EXTEC kodu içerisinde LiF malzeme parametresi bulunmadığı için inert alüminyum olarak kullanılabilen malzeme girilmiştir. Inert alüminyum malzemesi, alüminyumun reaksiyon enerjisini sıfır almaktadır. Bu şekilde LiF gibi reaksiyona girmediği ve enerji açığa çıkarmadığı durumu hesaplanmaktadır. Ancak reaksiyon enerjisi açığa çıkmadığı durum için de ürün olarak katı halde alüminyum ve Karbon oluşturmaktadır. Gerçek durumda LiF reaksiyonunda bu ürünler oluşmadığı için diğer reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan enerjinin absorbe edilmemesi ve enerji kaybına yol açmaması için muhtemel ürünler içerisinde çıkarılarak hesaplama yapılmıştır.

JWL hal denklemi basıncın özgül hacme göre değişimini vermektedir. Yüksek basınç noktasından düşük basınç noktasına çok hızlı geçtiği için basınç eğrisi üzerinden karşılaştırmak çok anlamlı olmayabilir. Bu parametrelerin bir hidrokod modelinde girdi olarak kullanılması nedeniyle test düzeneğinin modeli üzerinden karşılaştırma yapılması uygun görülmüştür. Bu JWL parametreleri kullanılarak SPEED hidrokodunda 2-boyutlu eksenel simetrik silindir genleşme çözümleri yapılmış, aynı model için silindir duvar hız geçmişi karşılaştırılmıştır. S110, S109 (Al) ve S109 (LiF) patlayıcılarının deneysel olarak elde edilen parametreleri, literatür ve EXTEC ile hesaplanan parametreler ile karşılaştırılmıştır. S109 (Al) patlayıcısının ideal olmayan davranış gösterdiği için EXTEC koduyla hesaplanamamıştır. S109 (LiF) patlayıcısının parametreleri ise EXTEC termokimyasal kodunda alüminyumun inert malzeme varsayılarak hesaplandığı parametreler ve literatürdeki PBXN109 patlayıcısının alüminyum yanma modelini içermeyen parametreler ile karşılaştırılmıştır.

S110 patlayıcısı içerdiği yüksek orandaki RDX sayesinde ideal patlayıcı davranışı göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen JWL parametreleri SPEED hidrokodundaki modele girdi yapılarak silindir duvar hızı elde edilmiştir. 3 farklı kaynak için de genleşmeye başlama ve bitiş zamanları aynı olmuştur. Her bir durum için en yüksek hız olarak 1800 m/s değerine ulaştığı görüşmüştür. Deneysel verilerin diğer verilerle en yüksek hız farkı 5 μ s zamanında gerçekleşmiştir. 5 μ s ve 15 μ s zaman aralığında hem deneysel verilerle diğer parametrelerin hem de EXTEC hesabıyla literatür arasında benzer olarak bir miktar ayrışmanın ölçüm sistemi ve hesaplama yöntemleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak farklı JWL kaynaklarıyla yapılan analizlerin birbiriyle eşleştiği görülmüştür.

S109 (Al) patlayıcısının analitik hız modelinin eğrisi ve bu modelle yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen JWL parametrelerinin hidrokod çözümlemesi sonuçları oldukça yakın sonuç vermiştir. Ancak literatür verisi ile yapılan karşılaştırmada ulaşılan son hız haricinde görece daha farklı bir yol izlemiştir. Modellemelerin ve patlayıcı karakteristiğinin doğruluğunun kontrol edilmesi bakımından en iyi göstergelerden biri ulaşılan son hızdır. Ulaşılan en yüksek hız yaklaşık 1500 m/s'dir. Buna göre genel olarak deneysel sonuçların literatür ile eşleştiği söylenebilir. Öyle ki 5 μ s, 10 μ s ve 15 μ s zamanlarındaki literatür ve deneysel veriler arasındaki fark yüksek olmasına rağmen son bölümdeki fark miktarı %2 değerinin altına düşerek makul seviyeye ulaşmıştır. Ancak eğriler arasındaki farklı yolların izlenmesi, deneysel elde edilen verilerle yapılan analitik modellemelerin alüminyumun zamana bağlı değişen reaksiyon hız modelini içermemesinden kaynaklanmaktadır. SPEED kaynaklı literatür verisinde alüminyumun zamana bağlı yanma reaksiyonu için kullanılan uzantısı da çalıştırıldığından izlenen yol farklı elde edilmiştir. Buna göre teorik olarak açıklanan patlayıcı içerisindeki alüminyumun başlangıçta detonasyon enerjisini kullanarak hızı düşürmesi ve sonrasında alüminyumun da reaksiyona girerek enerjiyi tekrar yükseltmesi durumunu ifade etmenin harp başlığı etkinliği bakımından önemi uygulamada görülmüş olmaktadır. Zamana bağlı enerji değişim uzantısı olmayan JWL parametreleri ile gösterilen bu model sonraki bölümde LiF katkılı patlayıcı için modellenen JWL denklemine zamana bağlı yanma uzantısı eklenerek alüminyum katkılı patlayıcının literatür eğrisi elde edilmeye çalışılmıştır.

S109 (LiF) patlayıcısı içerisindeki LiF inert bir malzeme olduğu için reaksiyon mekanizması değişmez ve ideal patlayıcı şeklindeki eğriye benzer olarak model elde edilmiştir. İdeal

davranış gösteren patlayıcılar için duvar hızı yaklaşık 10 μ s zaman içerisinde en yüksek hıza ulaşarak daha sonra sabit hızda ilerleme göstermektedir. S109 (LiF) patlayıcısının test sonuçlarında elde edilen parametreler SPEED hidrokoduna girilerek silindir duvarının radyal hız eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri ile SPEED hidrokodunun veri tabanında bulunan alüminyum katkılı S109 patlayıcısının ikinci yanma olarak ifade edilen Miller uzantısı kısmı kapatılmış ve alüminyum enerji değeri sıfır alınarak çözümleme yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen silindir duvarının radyal hızları her iki durumda da en yüksek değeri 1400 m/s'ye ulaşmıştır. Hesaplanan fark oranlarında diğer S110 ve S109 (Al) karşılaştırmasına göre en düşük değerler bulunmuştur. Bu fark değerleri ivmelenmenin en yüksek olduğu başlangıç zamanında dahi %5 seviyesinin üzerine çıkmamıştır.

Bu şekilde elde edilen parametrelerle SPEED hidrokoduna girdi yapılarak ve ikinci yanma (Ing. afterburn) devre dışı bırakılarak yapılan hesaplama sonucunda silindir radyal hız eğrisinin deneysel sonuçla örtüştüğü görülmüştür. Böylece mevcut malzemeler ile test maliyetleri çok düşürülmüş, yurt dışı kaynaklı malzeme olmaksızın makul oranlarda hata ile detonasyon sonrası gaz ürünlerin durum denkleminin parametreleri elde edilmiştir.

Öneriler

- Plaka hızlandırma sisteminde kullanılan VISAR hız ölçüm cihazı kullanılmıştır. VISAR cihazıyla tek seferde ölçüm alınamaması ve daha özel bir düzeneğin kurulması test maliyetlerini arttırmaktadır. Bunun yerine PDV cihazı daha basit bir sistemle sonuç verebilir.
- Silindir genleşme testi sırasında elektriksel iletken tellerin daha hızlı sonuç vermesi için telin bir ucu silindir duvarına diğer ucu ise temas etmek üzere konumlandırılabilir. Böylece tellerin uçları arasında fark varsa bu hata giderilebilir.
- Silindir genleşme testi ile elde edilen veriler PDV cihazı kullanılarak yapılan plaka hızlandırma verileriyle elde edilen parametrelerle karşılaştırılması ve deneysel yöntemlerin sağlanması açısından faydalı olacaktır.
- JWL parametreleri analitik hesap yöntemiyle hesaplanmıştır. Parametreler literatürde de sıkça kullanılan optimizasyon programları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bunun için genellikle LS-Dyna yazılımına ait LS-Opt paket programları kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Harp başlığı etkinlik gösterimi.
WEB: <https://navalpost.com//> (Erişim tarihi: 02.12.2021)
2. Thunyiswa, A.N. (2020). *Evaluation of Velocity Interferometry for High Energetic Materials Using a VISAR*, Master Thesis, University of Pretoria, Pretoria, 2-3.
3. Lee, E. L., Hornig, H. C., Kury, J. W. (1968). Adiabatic expansion of high explosive detonation products, *Lawrence Radiation Laboratory*, California, 5-14.
4. Anonim. (2020). Eğitim sunumları, *Numerics GmbH*, Münih.
5. Carlucci, D. E., Jacobsan, S. S. (2007). *Ballistics theory and design of guns and ammunition*, Florida: Taylor & Francis Group, 424-427.
6. Esen, S., Nyberg, U., Arai, H., Ouchterlony, F. (2005). determination of the energetic characteristics of commercial explosives using the cylinder expansion test technique, *Swebrec (Swedish Blasting Research Centre)*, Stocholm, Report, 5-10.
7. İnternet: RDX patlayıcısının tanımı ve özellikleri.
WEB: <https://tr.wikipedia.org/wiki/RDX> (Erişim tarihi: 02.01.2022)
8. Yuan, X., Wu, C., An, F., Liao, S., Zhou, M., Shi, Z., Xue, D. (2020). A non-isentropic model of aluminized explosives involved with the reaction degree of aluminum powder for post-detonation burning behavior, *Physics of Fluids*, 32, 023306.
9. Souers, P.C., Vitello, P.A. (2015). Detonation energy densities from the cylinder test, *Lawrence Livermore National Laboratory*, LLNL-TR-666420, New Mexico, 1-37.
10. Liu, D., Chen, L., Wang, C., Wu, J. (2018). Aluminum acceleration and reaction characteristics for aluminized Cl-20-based mixed explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 43(6), 543–551.
11. Tarver, C.M., Tao, W.C., Lee, C. G. (1996). Sideways plate push test for detonating solid explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 21(5), 238-246.
12. Wang, S.Y., Butler, P.B., Krier, H. (1985). Non-ideal equation of state combustng and detonating explosives, *Energy Combustion Science*, 11, 311-331.
13. Liu, D.Y., Zhao, P., Chan, S.H.Y., Hng, H.H., Chen, L. (2021). Effects of nano-sized aluminum on detonation characteristics and metal acceleration for rdx-based aluminized explosive, *Defence Technology*, 17(2), 327-337.
14. Li, G., Li, X., Jiang, B., Lu, F. (2019). A practical method to evaluate the afterburning energy of aluminized explosives based on a simple sleeve-slider apparatus and detonation test, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 44, 1384-1392.

15. Tan, H., Dai, C.D., Zhang, L.Y., Xu, C.H. (2005). Method to determine the melting temperatures of metals under megabar shock pressures, *Applied Physics of Letter*, 87(22), 221905.
16. Xie, Y., Han, Li. B., Zheng, L., Luo, S.N. (2009). Release melting of shock-loaded single crystal Cu, *Journal of Applied Physics*, 105(6), 066103.
17. Fritz, J.N. (1990). A simple plane-wave explosive lens, *Los Alamos National Laboratory*, LA-11956-MS, New Mexico, 1-21.
18. Anastacio, A.C., Selesovsky, J., Kucera, J., Pachman, J. (2017). *Ring plane wave generator*, 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT), Pardubice, 32-36.
19. Naeem, K., Hussain, A. (2018). Development of a matlab code for plane wave lens and its validation by Autodyn-2D, *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 8, 1614-3618.
20. Lichthardt, J.P., Tappan, B.C., Bowden, P.R., Olinger, M.W., McDonald, D.L. (2020). A simple 3D printed plane wave explosive lens based on Fritz parameters, *AIP Conference Proceedings*, 2272, 030018.
21. Svingala, F.R., Giannuzzi, P.M., Sandusky, H.W. (2018). Simple explosive plane wave booster designs for 1-D shock experiments, *AIP Conference Proceedings*, 1979, 160027.
22. Elek, P.M., Dzingalasevic, V., Jaramaz, S., Dejan, M. (2015). Determination of detonation products equation of state from cylinder test: analytical model and numerical analysis, *Thermal Science*, 19(1), 35-48.
23. Hornberg, H., Volk, E. (1989). The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 14(5), 199-211.
24. Topkaraoglu, E. (2014). *Design and Development of a Cylinder Expansion Test Setup for Determination of Equation of State Parameters of Various Explosives*, Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 1-2.
25. Castedo, R., Natale, M., Lopez, L.M., Sanchidrian, J.A., Santos, A.P. Navarro, J., Segarra, P. (2018). Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 112, 290–301.
26. Maines, R.W., Kittell, D.E., Hobbs, M.L. (2018). Combined mini cylex and disk acceleration tests in type K copper, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 43(5), 506-511.
27. Zhou, Z.Q., Nie, J.X., Guo, X.Y., Wang, Q.S., Ou, Z.C., Jiao, Q.J. (2015). A new method for determining the equation of state of aluminized explosive, *China Physics Letters*, 32(1), 016401.

28. Manner, V.W., Pemberton, S.J., Gunderson, J.A., Herrera, T.J., Lloyd, J.M., Salazar, P.J., Rae, P., Tappan, B.C. (2012). The role of aluminum in the detonation and post-detonation expansion of selected cast HMX-based explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 37(2), 198 – 206.
29. Holtkamp, D.B., Clark, D.A., Ferm, E.N., Gallegos, R.A., Hammon, D., Hemsing, W.F., Hogan, G.E., Holmes, V.H., King, N.S.P., Liljestrand, R., Lopez, R.P., Merrill, F.E., Morris, C.L., Morley, K.B., Murray, M.M., Pazuchanics, P.D., Prestridge, K.P., Quintana, J.P., Saunders, A., Schafer, T., Shinas, M.A., Stacy, H.L. (2004). A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography, *AIP Conference Proceedings*, 706, 477-482.
30. Jensen, B., Holtkamp, D.B., Rigg, P.A., Dolan, D.H. (2007). Accuracy limits and window corrections for photon doppler velocimetry, *Journal Of Applied Physics*, 101(1), 013523.
31. Stevens, G.D., Lutz, S.S., Marshall, B.R., Turley, W.D., Veaser, L.R., Furlanetto, M.R., Hixson, R.S., Holtkamp, D.B., Jensen, B.J., Rigg, P.A., Wilke, M.D. (2008). Free-surface optical scattering as an indicator of the shock-induced solid-liquid phase transition in tin, *Journal of Applied Physics*, 104(1), 013525.
32. Kuznetsov, V.A., Bennetts, S.P. (2013). Development of photon doppler velocimeter for explosives research, *Defence Science and Technology Organisation, Weapons Systems Division*, Edinburgh South Australia, 1-23.
33. Grant, S., Ao, T. (2019). The effects of surface roughness on specular diagnostics in shocked experiments, *Review of Scientific Instruments*, 90(9), 096105.
34. Dolan, D.H. (2020), Extreme measurements with photonic doppler velocimetry (PDV), *Review of Scientific Instruments*, 91(5), 051501.
35. Strand, O.T., Goosman, D.R., Martinez, C., Whitworth, T.L., Kuhlow, W.W. (2006). Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques, *Review of Scientific Instruments*, 77(8), 083108.
36. Yu, H., Kim, B., Jang, S., Kim, H., Yoh, J.J. (2017). Performance characterization of a miniaturized exploding foil initiator via modified VISAR interferometer and shock wave analysis, *Journal of Applied Physics*, 121, 215901.
37. Menikoff, R., Scovel, C.A., Shaw, M.S. (2013). Cylinder test wall velocity: experimental and simulated data, *Los Alamos National Laboratory*, LA-UR-13-23630, New Mexico, 1-20.
38. Liu, Y., Wang, H., Bai, F., Huang, F., Hussain, T. (2019). A new equation of state for detonation products of rdx based aluminized explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 44, 1293–1301.
39. Yue, J., Duan, Z., Zhang, Z., Ou, Z. (2017). Research on equation of state for detonation products of aluminized explosive, *Journal of Energetic Materials*, 1-9.

40. Duan, J., Wu, C., An, F., Liao, S. (2017). A quasi-analytical model of aluminized explosive products under strong constraint, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(11) 1–10.
41. İnternet: LiF tanımı ve özellikleri.
WEB: https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_flor%C3%BCr (Erişim tarihi: 11.04.2022)
42. MIL-E-82886(OS), (1993). Explosive, Plastic-Bonded, Cast PBXN-109, *Military Specification*.
43. MIL-R-398C_INT_AMENDMENT-6, (1992). RDX, *Military Specification*.
44. MIL-PRF-23950B(AS) w/AMENDMENT 1, (2005). Performance Specification Aluminum Powder, Spherical, *Military Specification*.
45. Suceşka, M., (1997). Experimental determination of detonation velocity, *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 1(3), 261-284.
46. Pehlivan, C. (2007). *Optik Fiber Bragg Izgara Algılayıcıların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 10-14.
47. İnternet: VISAR cihazının teknik özellikleri.
WEB: <http://www.mfaoptics.com/FiberDVI.htm> (Erişim tarihi: 16.02.2022)
48. İnternet: Veri toplama sisteminin teknik özellikleri.
WEB: <https://dewesoft.com/products/daq-systems> (Erişim tarihi: 22.03.2022).
49. Wilkins, M.L. Squier, B., Halperin, B. (1965). *Detonation products of PBX 9404 and LX04-01*, Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, California, 769-778.
50. Baker, E.L., Capellos, V., Stiel, L.L., Pincay, J. (2010). accuracy and calibration of high explosive thermodynamic equations of state, *Journal of Energetic Materials*, 28, 140–153.
51. Miller, P.J., Guirguis, R.H. (1992). Experimental study and model calculations of metal combustion in Al/AP underwater explosives, *MRS Proceeding*, 296, 299-304.
52. Souers, P.C. (2005). JWL Calculating, *Lawrance Livermore National Laboratory*, California, 3-8.
53. Sanchidrián, J.A., Castedo, R., López, L.M., Segarra, P., Santos, A.P. (2015). Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data, *Central European Journal of Energetic Materials*, 12(2), 177-194.
54. Hornberg, H. (1986). Determination of fume state parameters from expansion measurements of metal tubes, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 11(1), 23-31.
55. Gurney, R.W. (1943). The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades, *U.S. Ballistics Research Laboratories*, Maryland, Report 405.

56. Suceska, M. (1999). Evaluation of detonation energy from EXPLO5 computer code results, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 24, 280-285.
57. Liu, J., Xu, C., Han, X., Jiang, C., Liu, G. (2016). Determination of the state parameters of explosive detonation products by computational inverse method, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 24(1), 22–41.
58. Sutton, B.D., Ferguson, J.W., Hodgson, A.N. (2017). An analytical approach to obtaining JWL parameters from cylinder tests, *AIP Conference Proceedings*, 030032.

EKLER

EK- 1. JWL parametrelerinin hesaplama adımları

1. Patlayıcının fiziksel özellikleri ve detonasyon enerjisi ölçülerek kaydedilir.
2. Silindir duvar hızı ve detonasyon/gurney/kinetik enerjisi hesaplanır.
3. A, B, C, R1, R2, w başlangıç değerleri literatürden veya benzer patlayıcılar için tahmin edilir.
4. Toplam kimyasal enerji değeri, P_{CJ} , V_{CJ} termokimyasal koddan hesaplanır.
5. P_{CJ} değeri aşağıdaki denkleme göre V_{CJ} cinsinden hesaplanır. V_{CJ} başlangıç değeri olarak termokimyasal koddan hesaplanan değer alınacaktır. Daha sonra bhe değeri üzerinden hesaplanacaktır.

$$p(v_{CJ}) = \frac{A(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot v_{CJ}})e^{(-R_1 \cdot v_{CJ})} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot v_{CJ}})e^{(-R_2 \cdot v_{CJ})} + \frac{\omega \cdot E_0}{v_{CJ}}}{1 - \frac{\omega \cdot (1 - v_{CJ})}{2 \cdot v_{CJ}}} \quad (4.33)$$

6. C katsayısı aşağıdaki denklem üzerinden hesaplanır. C katsayısı hesaplanırken 2 yöntem kullanılabilir. Bunlardan birincisi Eş. 4.26 ile verilen JWL denklemi kullanılabilir.

$$C = \omega \cdot v^\omega \cdot \left[E_s - \left(\left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} \right) \right] \quad (4.26)$$

Bu denklem kullanılırken iterasyonlar sırasında CJ sınır şartlarına göre değişen P_{CJ} basıncı ve V_{CJ} özgül hacmi kullanılmaktadır. P_{CJ} basınç değeri için 5. Adımda verilen denklem kullanılır. İkinci yöntem ise aşağıda verilen iç enerji denkleminde yararlanılabilir.

$$E_s = \left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1 \cdot v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2 \cdot v)} + \frac{C}{\omega \cdot v^\omega} \quad (4.25)$$

EK- 1. (devam) JWL parametrelerinin hesaplama adımları

Ancak burada C katsayısı silindir genleşme verileri kullanılarak elde edilen detonasyon enerjisi ve bu andaki genleşme miktarına göre sabit alınması gerekir. Pratik olmadığından ve parametrelerle detonasyon enerjisi henüz örtüşmediğinden bu yöntem tercih edilmemektedir.

C katsayısının da bulunmasıyla optimizasyonu yapılacak değerler bulunabilecektir.

7. Detonasyon hızı da parametreler kullanılarak iteratif olarak aşağıda verilen Eş. 4.39 ile bulunmaktadır. Detonasyon hızı CJ sınır şartlarında oluştuğundan P_{CJ} ve V_{CJ} değerlerine göre hesaplanır.

$$V_D = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \cdot [A.R_1.e^{(-R_1.v)} + B.R_2.e^{(-R_2.v)} + C.(\omega+1).v^{-(\omega+2)}]} \quad (4.39)$$

Bu adımdan sonra detonasyon hızı JWL denklemi parametreleriyle ifade edilmiş olur. Bununla birlikte ölçülen detonasyon hızı ile karşılaştırılarak aralarındaki hata oranı aşağıda verilen Eş. 4.40 ile hesaplanır.

$$\alpha = \frac{100.(V_{D(hesaplanan)} - V_{D(ölçülen)})}{V_{D(ölçülen)}} \quad (4.40)$$

Hesaplanan hata oranı bulunarak aşağıda verilen Eş. 4.45 ile yeni A katsayısı bulunur.

$$A_{yeni} = (1 - 0,03.\alpha).A_{eski} \quad (4.45)$$

8. Bu adımda P_{CJ} basınçları hesaplanarak karşılaştırması yapılır. İlk olarak 7. Maddede JWL parametreleriyle hesaplanan detonasyon hızı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{CJ} = \rho.V_D^2.(1 - v_{CJ}) \quad (4.36)$$

Detonasyon basıncı hesaplandığı için denklemde CJ sınır şartları kullanılmaktadır.

EK- 1. (devam) JWL parametreleri ninhesaplama adımları

9. İkinci CJ basıncı için madde 5 ile verilen denklem kullanılarak hesaplanan değer kullanılır. Buna göre JWL parametreleri kullanılarak elde edilen detonasyon hızı ve JWL parametreleri kullanılarak elde edilen P_{CJ} basıncını karşılaştırılmıştır. Bu iki denklemde aynı parametrelerle ifade edilmekte olmasına rağmen tek fark ilk denklemde yer alan yoğunluktur. Patlayıcı yoğunluğu bu parametrede eşleştirilmektedir.

$$\beta = \frac{100.(P_{CJ(hesaplanan)} - P_{CJ(ölçülen)})}{P_{CJ(ölçülen)}} \quad (4.41)$$

$$B_{yeni} = (1 - 0,05.\beta).B_{eski} \quad (4.46)$$

10. Bu maddede kadar ölçülen detonasyon hızı ve yoğunluk JWL parametreleriyle tutarlı hale getirilmiştir. Bu maddede silindir genleşme testi verileriyle genleşmenin farklı aşamalarında elde edilen enerjiler karşılaştırılmaktadır. $V=2,2, 4,4$ ve $7,2$ için genleşme verilerinden doğrudan çekilen Gurney enerji değerleri kullanılır. Bu değerlerin yanı sıra 7 ve 10 değeri için de hesaplama yapılabilir ancak genleşme hesabının bu değerleri de kapsayacak şekilde fit edilmesi gerekir.

Enerji değerlerinin karşılaştırırken de 2 yöntem mevcuttur. Birincisi aşağıdaki denklemde olduğu gibi hesaplanan JWL parametreleri cinsinden detonasyon enerjisinin bulunmasıdır. Bu test verileri ile aşağıda JWL parametreleriyle hesaplanan genleşme verileriyle karşılaştırılır.

$$E_d(v) = E_0 - \left[\left(\frac{A}{R_1} \right) e^{(-R_1.v)} + \left(\frac{B}{R_2} \right) e^{(-R_2.v)} + \frac{C}{\omega.v^\omega} \right] \quad (4.35)$$

Ancak JWL parametreleri cinsinden hesaplanan enerji değeri gerçek değer ile örtüşmemektedir. Bunun yerine CJ sınır şartlarında hesaplanan iç enerji ve sıkıştırma enerjileri dahil ederek yapılan hesaplama daha uygun sonuç vermektedir.

EK- 1. (devam) JWL parametrelerinin hesaplama adımları

$$E_s = E_0 + \frac{1}{2} \cdot p_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (4.30)$$

$$E_d(v) = [E_s(v_{CJ}) - E_s(v)] + E_c(v_{CJ}) \quad (4.31)$$

Eş. 4.31 ile hesaplanan her bir özgül hacim için;

$$\delta(v) = \frac{100 \cdot (E_{d(\text{hesaplanan})} - E_{d(\text{ölçülen})})}{E_{d(\text{ölçülen})}} \quad (4.42)$$

$$\delta = \frac{\delta(2,2) + \delta(4,4) + \delta(7,2)}{3} \quad (4.43)$$

Eş. 4.42 ve Eş. 4.43 denklemleriyle ortalama hata oranı hesaplanır. Bu oran, Eş. 4.44 içerisinde kullanılarak özgül hacim dönüşüm oranı bulunur ve Eş. 4.57 ile verilen yeni V_{CJ} değerinin bulunmasını sağlayan katsayı hesaplanır.

$$bhe_{\text{yeni}} = bhe_{\text{eski}} + 0,01 \cdot \delta \quad (4.44)$$

$$v_{CJ} = 1 - \frac{1}{bhe} \quad (4.57)$$

Bu şekilde 1 tam döngü hesaplanarak yeni A, B ve V_{CJ} değerleri hesaplanmış olur. Döngüler sırasında hata oranları hesaplanırken aşağıdaki denklemlerde verilen 0,01, 0,03 ve 0,05 adım aralıkları izlenir. Döngü sırasında adım aralıklarını ne kadar büyük olursa iterasyon sayısı o kadar az olur ve sonuca hızlı yaklaşılr. Ancak hata oranı yüksek olur. Bu aralıklar çok küçük olursa iterasyon sayısı yüksek olur ancak elde edilen hata oranı düşük olacaktır. Bu nedenle optimum kat sayıların belirlenmesi önem arz etmektedir. Sonuca hızlı ulaşmakta bir diğer etken ise başlangıç parametrelerinin tahmin edilmesidir. Bu tahmin literatürde benzer patlayıcıların katsayıları alındığında genellikle faysalı olur. çözücüde hata oranını sınırlayacak uygun hata adım aralığının hesaplanması faydalı olmaktadır.

EK- 2. VISAR cihazı için veri analizi

Dijital osiloskop yardımıyla elde edilen elektriksel sinyal verileri bir hafıza kartı yardımıyla alınarak sayısal verilerin işlenerek hız verilerine dönüştürülmesi sağlanır. Elektriksel sinyallerin hız verilerine dönüştürülmesi ile ilgili denklemler aşağıdaki gibidir.

$$D(t) = P \cdot g \cdot \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi \cdot v(t)}{K_f} + \varphi_0 \right) \right] \quad (\text{Ek.2.1})$$

D, değeri osiloskoptan alınan voltaj değeridir. P değeri, yansıyan ışığın interferometreye giren ışık yoğunluğunu ifade etmektedir. G değeri ise toplam optik kazanımı ifade etmektedir. V, değeri saçak sayısı ve φ açısı ile elde edilen hız vektörüdür. Eğer P ve g değeri biliniyorsa hız değeri $v(t)$ hesaplanabilir.

$$\sin \left(\frac{2\pi \cdot v(t)}{K_f} + \varphi_0 \right) = \frac{D(t)}{P \cdot g} - 1 \quad (\text{Ek.2.2})$$

$$v(t) = \frac{K_f}{2\pi} \cdot \left[\arcsin \left(\frac{D(t)}{P \cdot g} - 1 \right) - \varphi_0 \right] \quad (\text{Ek.2.3})$$

Bu hesaplamalardan önce elektriksel sinyal değerleri içinde anlık ölçüm hataları olabileceğinden bu değerlerin ayrılarak normal değerlere ulaşılması gerekir. Bunun için birkaç farklı normalizasyon tekniği önerilmiştir. Quadrature ve push-pull olarak adlandırılan iki değerlendirme yapılır. Quadrature, polarize ışını tekniğini kullanarak “s” ve “p” adında iki faz oluşturur. Bu iki fazın fonksiyonu ve bu değerler üzerinden çıkarılan hız fonksiyonu ise aşağıdaki gibi olur.

$$D_1(t) = P(t) \cdot g_1 \cdot \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi \cdot v(t)}{K_f} + \varphi_0 \right) \right] \quad (\text{Ek.2.4})$$

$$D_2(t) = P(t) \cdot g_2 \cdot \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi \cdot v(t)}{K_f} + \varphi_0 \right) \right] \quad (\text{Ek.2.5})$$

Burada y, D1’in ve x, D2’nin fonksiyonudur.

EK- 2. (devam) VISAR cihazı için veri analizi

Diğer bir kontrol yöntemi ise “push-pull” olarak ifade edilmektedir. Bunun nedeni gelen sinüs ve kosinüs sinyallerinin tepe noktalarındaki verilerin kaybolmasıdır. Bunun önlenmesi için yukarıda D1 ve D2 olarak belirtilen fonksiyonlara ek 2 sinyal daha eklenmiştir. Bu sinyaller sinüs ve cosinüs ifadelerinin pozitif değerleriyle birlikte negatif değerlerini de hesaba katarak 4 farklı veri elde edilir. Böylece 4 farklı sinyal oluşmuş olur. Bu sinyallerden 180° faz farkı olan noktalar çıkarılarak tepe noktaları normalize edilir. Hız değeri zamana göre değişen saçak sayısının saçak sabiti çarpımıyla elde edilir.

$$V(t) = v(0) + m \cdot K_f + \arctan[y(t), x(t)] \cdot K_f \quad (\text{Ek.2.6})$$

$V(0)$ değeri yüzeyin başlangıç hızını ifade etmektedir. Bu hız genellikle sıfırdır. M ise ölçülen toplan saçak sayısını ifade eder. Son terim ise saçığın zamana bağlı $x(t)$ ve $y(t)$ sinyal yoğunluklarından elde edilen mevcut saçığın kısmi parçasını ifade eder. Kullanılan VISAR cihazı sıradan interferometrelerin aksine kendi içinde sinyali işleyerek normalize eder. Bunun için gelen ışını ikiye ayırarak polarize eder ve bunlardan birini diğerine göre çeyrek dalga boyu kadar geciktirir. Böylece girişim noktasındaki maksimum noktadan kaçınılmış olur. Bununla birlikte alınan sinyale ek iki sinyal versiyonu daha eklenir. Bunlar negatif polarize sin ve cos sinyalleridir. Bu değerler birbirlerinden çıkarılarak normalizasyon için yazılım gereksinimini ortadan kaldırır. Buna “push-pull” konfigürasyonu adı verilir.

$$y = (\sin + \text{background}) - \sin + \text{background} = 2\sin \quad (\text{Ek.2.7})$$

$$x = (\cos + \text{background}) - \cos + \text{background} = 2\cos \quad (\text{Ek.2.8})$$



GAZİ GELECEKTİR..