

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU DENEY DÜZENEGİ
KURULUMU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zarif Özlem ŞİMŞEK**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

EKİM 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU DENEY DÜZENEĞİ
KURULUMU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zarif Özlem ŞİMŞEK
(506091449)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ağustos 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Ekim 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN (İTÜ)
Eş Danışman : Öğr. Gör. Emin SÜNBÜLOĞLU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Tuncer TOPRAK (İTÜ)
Prof. Dr. Ata MUĞAN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. C. Fahir ATASOY (İTÜ)**

EKİM 2011

ÖNSÖZ

Malzemelerin statik veya yarı-statik yükler altındaki mekanik özellikleri standartlaşmış geleneksel test cihazları ile belirlenebilmektedir. Fakat malzemelerin gerçek hayatta maruz kaldığı hasarlar pek çok durumda yüksek hızlı deformasyonlar veya darbe yükleri neticesinde meydana gelir. Bu sebeple malzemelerin dinamik yükler altındaki mekanik özellikleri belirlemek için yeni deney düzeneklerine ihtiyaç duyulmuştur. Buradan yola çıkarak malzemelerin dinamik yükler altında ve yüksek deformasyon hızlarında nasıl mekanik tepkiler vereceğinin tespit edilmesi için Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği kurulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu deney düzeneğinin kurulması konusunda fikir sahibi olan, dolayısıyla bu çalışmaya öncülük eden, veri toplama ve değerlendirme konusundaki uzmanlığıyla süreci çok hızlandıran danışman hocam Öğr.Gör.Dr. Emin SÜNBÜLOĞLU'na, deney düzeneğinin kurulmasında malzeme ve bileşenlerin temini konusunda büyük destek sağlayan danışman hocam Prof.Dr. Mustafa Kelami ŞEŞEN'e, deney düzeneğinin tasarımı ve kurulma sürecinde fikir, teknik beceri, motivasyon ve maddi desteğini esirgemeyen Öğr.Gör.Dr. S. Ergün BOZDAĞ'a, maddi sorunlarımızı çözen ve gerekli izinleri süratle sağlayan İTÜ Makina Fakültesi Dekanı Prof.Dr. Ata MUGAN'a, deney düzeneği kurulumunun her aşamasında teknik ve pratik bilgisiyle işimizi çok kolaylaştıran ve deney düzeneğinin çalışır hale gelmesini sağlayan Tekniker Orhan KAMBUROĞLU'na ve deney düzeneği tasarımının başından sonuna kadar her aşamasında bana destek olan sevgili Arş.Gör. Ersin KAMBUROĞLU'na içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
2. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU DENEY	
DÜZENEĞİNİN GENEL TANIMI.....	7
2.1 Yükleme Sistemi	7
2.2 Çubuk Bileşenleri	8
2.3 Veri Toplama ve Kayıt Sistemi.....	8
2.4 PHBÇ Deney Düzeneginde Sağlanması Gereken Koşullar	9
3. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU TEORİSİ.....	13
3.1 Bir Çubuğun Hareket Denklemi.....	13
3.2 Çubuklarda Doğrusal Dalga Yayılımı.....	16
3.3 Çubuklar Üzerinde Yayılan Dalganın Geri Yansıması	16
3.3.1 Kesit alanı ve empedanstaki değişimin dalga yayılımına etkisi.....	16
3.4 Numunede Gerilme, Şekil Değiştirme ve Deformasyon Hızı Hesabı.....	19
3.4.1 Numune üzerindeki oluşan gerilmenin hesaplanması.....	19
3.4.2 Numunedeki şekil değiştirme ve deformasyon hızı	20
3.5 Veri İşleme ve C_0 Değerinin Belirlenmesi	23
3.5.1 Veri işleme	23
3.5.2 C_0 değerinin belirlenmesi	24
4. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU (PHBÇ) DENEY	
DÜZENEĞİ KURULUMU.....	27
4.1 PHBÇ Deney Düzenegi.....	27
4.2 Basınç Çubuğunun Fiziksel Özellikleri.....	29
4.3 PHBÇ Deney Düzeneginde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	29
4.3.1 Atalet etkileri.....	29
4.3.2 Ara yüzey sürtünmesi.....	30
4.3.3 Sabit deformasyon hızı.....	31
4.3.4 Sinyal şekillendirme tekniği.....	31
4.3.5 Deformasyon hızı limiti	33
4.3.6 Numune tasarımı	33
5. PHBÇ DENEY DÜZENEĞİNDE MALZEME UYGULAMALARI VE	
DENEYLER.....	35
5.1 Malzeme Türüne Göre Deney Tasarımı.....	35

5.1.1 Sert malzemelerde PHBÇ testi	35
5.1.2 Yumuşak malzemelerde PHBÇ testi	39
5.2 Parçalı Hopkinson Basma Deneyi Uygulaması.....	40
5.2.1 Düşük deformasyon hızında basma deneyi	41
5.2.1.1 Basma deneyi sonuçları ve değerlendirme	42
5.2.2 Parçalı hopkinson basma çubuğu deneyi.....	47
5.2.2.1 Hopkinson Basınç Çubuğu Deney Sonuçları ve Değerlendirme.....	49
6. SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR

PHBÇ : Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu
PMMA : Polimetil metakrilat

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Basınç çubuğunun özellikleri	29
Çizelge 5.1 : PHBÇ basınç çubuğu malzemelerinin karşılaştırılması [5]	39
Çizelge 5.2 : Alüminyum ve pirinç numunelerinin boyutları.....	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Deformasyon hızı rejimleri, ilgili cihazlar ve deneysel koşullar [5].....	2
Şekil 1.2 : Bertram Hopkinson deney düzeneği [1].....	3
Şekil 1.3 : Davies tarafından geliştirilen aparatın genel düzeni [2].....	4
Şekil 1.4 : Kolsky deney düzeneği [2].....	5
Şekil 2.1 : PHBÇ deney düzeneği sistemi [1].	7
Şekil 2.2 : Numunenin çubuklar arasına yerleştirildiği konum [1].	9
Şekil 2.3 : PHBÇ deneyi sırasında karşılaşılan paralel olmayan ara yüzey [2].....	10
Şekil 2.4 : PHBÇ’de gerilme dalgası yayılımına ait konum-zaman grafiği [1].....	10
Şekil 2.5 : 304 paslanmaz çelik sinyallerinin zamana göre değişimi [5].....	11
Şekil 3.1 : Basınç çubuğu üzerindeki diferansiyel eleman [4].	13
Şekil 3.2 : Basma kuvvetleri altındaki diferansiyel eleman [4].....	14
Şekil 3.3 : Çubuk ve numune ara yüzey bölgesi [5].	14
Şekil 3.4 : Diferansiyel eleman üzerine etki eden basma kuvvetleri [4].	15
Şekil 3.5 : Malzeme ve kesit alanındaki değişimin şematik gösterimi [4].	17
Şekil 3.6 : Çubuklar arasındaki numunenin şematik gösterilişi [4].....	19
Şekil 3.7 : PHBÇ deneyinden elde edilen tipik strain gage kayıtları [2].....	23
Şekil 3.8 : C_0 değerindeki küçük bir değişimin AL-6061-T6’nın dinamik gerilme- deformasyon eğrisinin biçimine etkileri [7].....	25
Şekil 3.9 : C_0 değerindeki küçük bir değişimin AL-6061-T6’nın dinamik gerilme- deformasyon eğrisinin biçimine etkileri [7].....	25
Şekil 4.1 : Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu deney düzeneğinin genel görünümü.	27
Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin çıkış çubuğu tarafından görünüşü.	28
Şekil 4.3 : Kompresörden gelen basınçlı havayı kontrol eden sistem.	28
Şekil 4.4 : Alüminyum dolgulu epoksi’de yağlama işlemi sonucu elde edilen dinamik tepkiler [1].....	30
Şekil 4.5 : PHBÇ deney düzeneğinde elde edilen elastik-sert ve elastik-plastik malzemelerin deformasyon hızı [1].....	31
Şekil 4.6 : Bakır ile sinyal şekillendirme tekniği [1].	32
Şekil 4.7 : Konik biçimde şekillendirilmiş darbe çubuğu [1].	32
Şekil 4.8 : Üçüncü bir ön yükleme çubuğu ile sinyal şekillendirme tekniği [12]. ...	33
Şekil 5.1 : AlN numunesinin kenarlarında oluşan gerilme konsantrasyonu [1].	36
Şekil 5.2 : Sert numunelerin numune-çubuk ara yüzeyine yerleştirilme şekilleri [1]37	
Şekil 5.3 : AlN seramik numunesinde deformasyon hızına bağlı olarak kırılma dayanımında meydana gelen değişim [5]	38
Şekil 5.4 : Yarı-Statik (a) ve (b) dinamik basma yükleri altında meydana gelen çatlak ilerleyişi [5].....	39
Şekil 5.5 : Özel tasarım servo hidrolik dinamik üniversal test cihazı ve veri toplama sisteminin genel görünümü.	40
Şekil 5.6 : Basma deneyi sırasında iki çene arasına yerleştirilen numuneden görünüm.	41

Şekil 5.7 : Alüminyum numune üzerine paralel olarak yerleştirilmiş iki strain gage'in görünümü.....	42
Şekil 5.8 : Alüminyum gerilme-şekil değiştirme grafiği.	43
Şekil 5.9 : Alüminyum gerilme-şekil değiştirme grafiğinde elastisite modülünün elde edilmesi.	43
Şekil 5.10 : Alüminyuma ait deplasman ölçer ve strain gage grafiklerinin kıyaslaması.	44
Şekil 5.11 : Alüminyum deformasyon-zaman grafiği.	44
Şekil 5.12 : Alüminyum deformasyon hızı-zaman grafiği.	45
Şekil 5.13 : Pirinç'e ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	45
Şekil 5.14 : Pirinç gerilme-deformasyon grafiğinde elastisite modülünün elde edilmesi.	46
Şekil 5.15 : Pirinç'e ait deformasyon-zaman grafiği.	46
Şekil 5.16 : Pirinç'e ait deformasyon hızı-zaman grafiği.	47
Şekil 5.17 : Düşük deformasyon hızında yapılan basma deneyi sonrası pirinç ve alüminyumun numunelerinin görünümü.....	47
Şekil 5.18 : E2 tipi numuneye ait gerilme-şekil değişimi grafiği.	49
Şekil 5.19 : E2 tipi numuneye ait deformasyon hızı- zaman grafiği.	49
Şekil 5.20 : E1 tipi numuneye ait strain gage uzama-zaman grafiği.	50
Şekil 5.21 : 6063 Alüminyumun düşük ve yüksek deformasyon hızları altında elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	50
Şekil 5.22 : E4 tipi numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.	51
Şekil 5.23 : E4 tipi numuneye ait deformasyon hızı-zaman grafiği.	51
Şekil 5.24 : E4 tipi numuneye ait strain gage uzama-zaman grafiği.	52
Şekil 5.25 : C377 Pirinç'in düşük ve yüksek deformasyon hızları altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	52
Şekil 5.26 : Farklı basınçlarla fırlatılan merminin E1 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.....	53
Şekil 5.27 : Farklı hızlarda fırlatılan merminin E2 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.....	53
Şekil 5.28 : Farklı hızlarda fırlatılan merminin E3 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.....	54
Şekil 5.29 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta kalın bakır pul ile elde edilen deformasyon hızı-zaman grafiği.....	54
Şekil 5.30 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta ince bakır pul ile elde edilen deformasyon hızı-zaman grafiği.....	54
Şekil A.1 : E1 tipi numunenin 2 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ...	63
Şekil A.2 : E1 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ...	64
Şekil A.3 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta kalın bakır pul ile elde edilen (a) gerilme-şekil değiştirme, (b) deformasyon hızı-zaman, (c) deformasyon – zaman grafikleri.	65
Şekil A.4 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta ince bakır pul ile elde edilen (a) gerilme-şekil değiştirme, (b) deformasyon hızı-zaman, (c) deformasyon – zaman grafikleri.	66
Şekil B.1 : E3 tipi numunenin 2 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon -zaman grafiği. ..	67
Şekil B.2 : E3 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ...	68

- Şekil B.3 :** E3 tipi numunenin 6 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ... 69
- Şekil C.1 :** E4 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği 70
- Şekil C.2 :** E4 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği 71
- Şekil C.3 :** E4 tipi numunenin 6 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ... 72
- Şekil C.4 :** E4 tipi numunenin 8 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ... 73
- Şekil C.5 :** E4 tipi numunenin 10 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği. ... 74

SEMBOL LİSTESİ

F	: Kuvvet
A₀	: Yüzey alanı
σ	: Gerilme
ε	: Şekil değiştirme (deformasyon)
u	: Numunenin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme
ε_I	: Gelen gerilme dalgasının oluşturduğu şekil değiştirme
ε_R	: Yansıyan gerilme dalgasının oluşturduğu şekil değiştirme
ε_T	: Geçen gerilme dalgasının oluşturduğu şekil değiştirme
E	: Elastisite modülü
L	: Numune uzunluğu
ρ	: Yoğunluk
C₀	: Dalga hızı
t	: Zaman
Z	: Mekanik empedans
V	: Hız
D_S	: Numune çapı
D_B	: Basma çubuğu çapı
v	: Parçacık Hızı
p	: Kesit alanı üzerindeki gerilme
P	: Basınç
k	: Dalga numarası
w	: Frekans
y	: Dalganın uzaydaki formu
Ė	: Deformasyon hızı
σ_a	: Akma dayanımı
α	: İletim katsayısı
β	: Yansıma katsayısı

ALT İNDİSLER

S	: Numune
B	: Basma çubuğu
ort	: Ortalama
σ_a	: Deformasyon hızı

PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU DENEY DÜZENEĞİ KURULUMU

ÖZET

Bu çalışma kapsamında malzemelerin yüksek deformasyon hızlarında mekanik davranışlarının test edilebilmesi için Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği kurulmuş ve bu düzenek elastik deformasyon gösteren alüminyum ve pirinç numunelerle test edilmiştir.

Hopkinson deney düzeneğinin tasarımında kontrollü atış basıncının sağlanabilmesi için pnömatik akümülatör görevi gören yüksek basınçlara dayanıklı bir rezervuar kullanılmış ve bu rezervuar 40 bar'lık kompresörle beslenmiştir. Darbe etkisi gaz tabancasının namlusundan fırlatılan bir mermi ile elde edilmiştir. Mermi hızı, gaz tabancasının rezervuarına kompresörden beslenen hava basıncı ile kontrol edilmiştir. Basınç çubukları olarak yay çeliğinden imal edilmiş 1500 mm'lik iki çubuk kullanılmış, basınç dalgaları çubukların ortalarında konumlandırılmış strain gage'ler yardımı ile ölçülmüştür. Tek boyutlu dalga yayılımının sağlanabilmesi için basınç çubukları 0,03 toleransla yataklanmış, mermi mili dâhil tüm miller minimum kaçıklıkla aynı tarafsız eksen üzerine getirilmiştir. Sinyal şekillendirici olarak bakırın işlevi ve etkinliği de test edilmiştir.

Deformasyon hızının numunenin uzunluğuna, mermi hızına ve sinyal şekillendirici olarak kullanılan bakır disk'in kalınlığına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Deneyler sonrası maksimum 3369 s^{-1} deformasyon hızı tespit edilmiş ve alüminyum numunelerde en fazla %40 deformasyon gözlenmiştir. Beklendiği gibi malzemelerin yüksek deformasyon hızlarındaki akma gerilmesinin statığe yakın koşullara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan denemeler neticesinde test düzeneğinin makul sonuçlar verdiği görülmüş, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlikte neticeler elde edebilmek için yapılması gereken iyileştirmeler tartışılmıştır.

SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR EXPERIMENTAL SET-UP

SUMMARY

This work comprises of building of a Hopkinson Pressure Bar test device with the goal of testing the mechanical properties of materials at high strain rates and testing of the capabilities of the device itself with aluminium and brass specimens.

A gas gun with manual pressure control fed by a 40 bar air compressor was designed as the ballistic component of the test device. The impact effect was executed by a striker propelled inside a launch tube, by the air pressure in the tank component of the gas gun. 1500 mm long spring steel bars were used as pressure bars and the pressure waves were measured via strain gages situated at the middle of the bars. Pressure bars were aligned with 0.03 tolerance linear journal bearings. Neutral axes of all the bars were aligned with minimum possible mismatch. The function and effectiveness of copper as a signal shaper was also tested.

Evaluation of the tests has shown that the strain rate varies depending on specimen length, striker velocity and size of the signal shaper. Maximum strain rate measured during tests was 3369 s^{-1} and a maximum deformation of 40% was observed for the aluminium specimens. High strain rate yield strength of the tested materials was determined to be higher than quasi-static yield strength values of the respective materials.

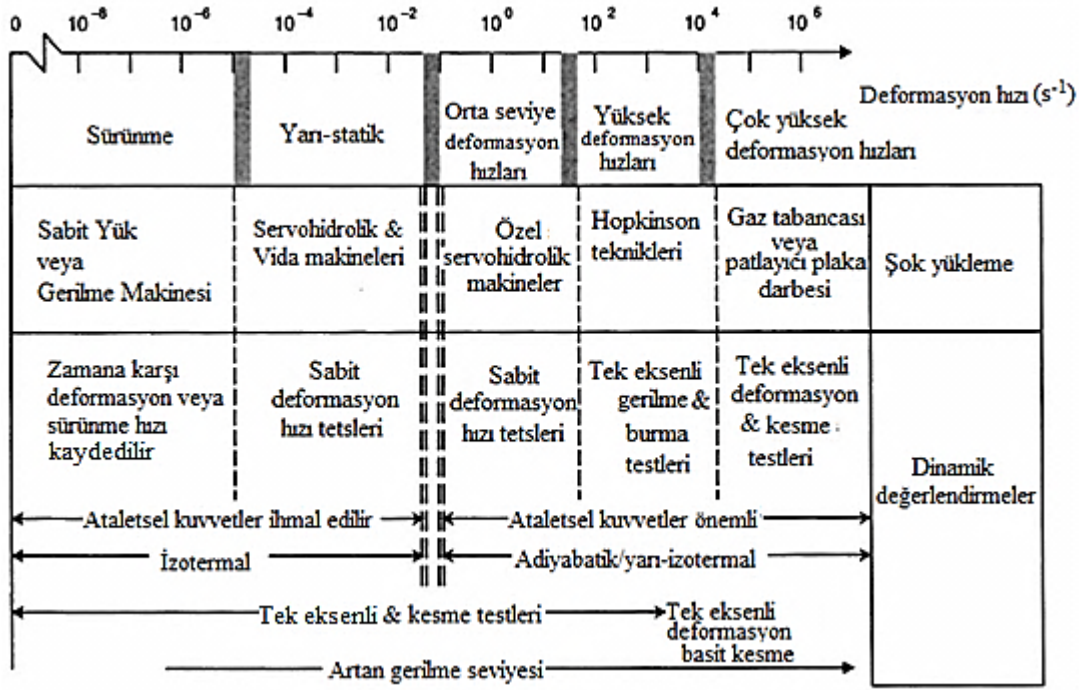
The tests have shown that the device yields plausible results. Possible improvements and corrections required for results with better accuracy and reliability were discussed.

1. GİRİŞ

Malzemelerin yüksek deformasyon hızları altındaki mekanik davranışları düşük deformasyon hızları altında gözlemlenen mekanik davranışlarından oldukça farklıdır. Bu sebeple birçok mühendislik uygulaması için malzemelerin dinamik yükler altındaki mekanik davranışlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Geleneksel servohidrolik makineler ile yarı-statik yükler altında yapılan mekanik testlerde deformasyon hızı 1 s^{-1} değerinden küçük iken, dinamik yüklerin uygulandığı Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinde elde edilen deformasyon hızı 10^2 s^{-1} ile 10^4 s^{-1} aralığındadır.

Deformasyon hızındaki artış ile malzemedeki akma dayanımı, süneklik, deformasyon sertleşmesi gibi mekanik özelliklerin çarpıcı bir şekilde değiştiği tespit edilmiştir. Üretim tekniklerindeki gelişmeler malzemelerin yüksek deformasyon hızları altındaki mekanik davranışlarına olan ilgiyi daha da arttırmıştır. Yüksek hızlı tel çekme, soğuk haddeleme gibi üretim yöntemleri ile askeri amaçlı balistik ve zırh uygulamalarındaki çalışmalar bilim insanlarını yüksek deformasyon hızlarında deneysel çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Bu alandaki artan merak gittikçe yayılmış ve birçok alanda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Örneğin otomobil çarpışmaları, uyduların maruz kalabileceği meteor çarpması, uçak motorlarına yabancı madde çarpması gibi deneysel çalışma alanları gelişen teknoloji ile giderek artmıştır.

Çeşitli mekanik test cihazlarıyla yüksek deformasyon hızında yapılan deneylerde iki temel sorun ile karşılaşmıştır. Bu sorunlardan ilki, çok az miktarda detaylı veri elde edilmesi olmuştur. Diğer sorun ise numune üzerinde meydana gelen değişikliklerin iyi kontrol edilememesi olarak tespit edilmiştir. Kolsky, bu iki soruna zekice bir çözüm getirmiştir. Numuneye doğrudan darbe uygulamak yerine, numuneyi iki elastik basma çubuğu arasına yerleştirmiş ve bu çubuklardan tekine darbe uygulamıştır. Böylece yüksek deformasyon hızında malzemelerin dinamik tepkilerini elde edebilmek mümkün hale gelmiştir. Kolsky'nin son halini verdiği Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği gelişen teknoloji ile günümüze kadar birçok değişikliğe uğrayarak mevcut gelişmiş tasarımına ulaşmıştır.



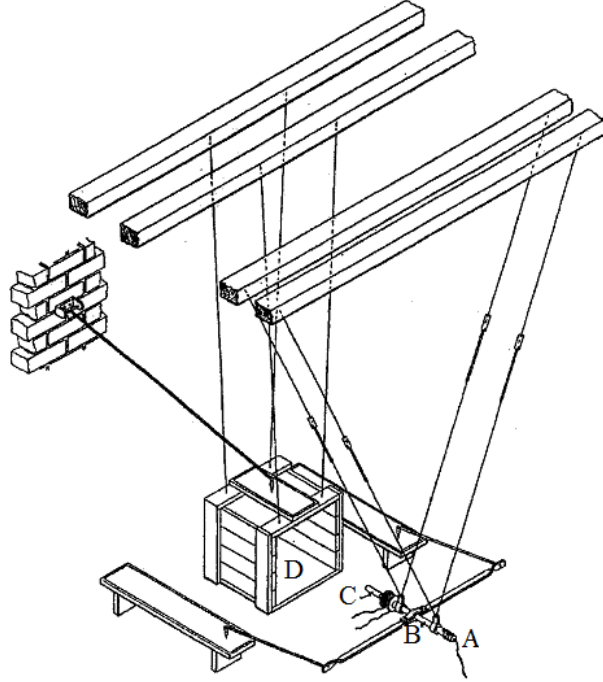
Şekil 1.1 : Deformasyon hızı rejimleri, ilgili cihazlar ve deneysel koşullar [5].

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinin en önemli özelliği, $10^2 \text{ s}^{-1} - 10^4 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızları aralığında bir gerilme-şekil değiştirme grafiği oluşturmasıdır. Ancak geleneksel darbe testleri ile dinamik yükler altında böyle bir gerilme-şekil değiştirme grafiği elde etmek mümkün değildir. Ayrıca metal, seramik ve polimer gibi birçok malzeme türü PHBÇ deney düzeneğinde test edilebilmektedir. Bu durum PHBÇ deney düzeneğinin gelecekte ne kadar yaygınlaşacağını tahmin etmemizi sağlamaktadır [2,5].

1.1 Literatür Özeti

Yüksek deformasyon hızları altında malzemelerin ne tür mekanik tepkiler göstereceği 19. yüzyılın sonlarına doğru incelenmeye başlanan bir konu olmuştur. John Hopkinson 1872 yılında ağırlık düşürme testi (drop weight) ile çelik tel üzerinde kopma testi gerçekleştirmiştir. Ağırlık düşürme testi sonucu çelik tel üzerinde gerilme dalgası yayılımı olduğu ve bu gerilme dalgasının çelik telin bölgesel olarak kopmasına neden olduğu gözlenmiştir. Bölgesel kopmanın darbe hızına bağlı olarak ya darbe ucunda ya da sabit uçta meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu deneyin yapıldığı dönemde kopmaya neden olan gerilme dalgasını ölçmek mümkün olamamıştır [1,2].

John Hopkinson'un oğlu Bertram Hopkinson 1914 yılında babasının çalışmalarını incelemiş ve buradan yola çıkarak hızlı bir mermi veya bir patlayıcı ile oluşan basıncın ölçümü için basma çubuğu tasarlamıştır. Bertram Hopkinson'un deney düzeneği; uzun bir çelik çubuk, bu çelik çubuk ile aynı malzemeden olan kısa silindirik bir çelik çubuk ve balistik sarkaçtan oluşmaktadır.

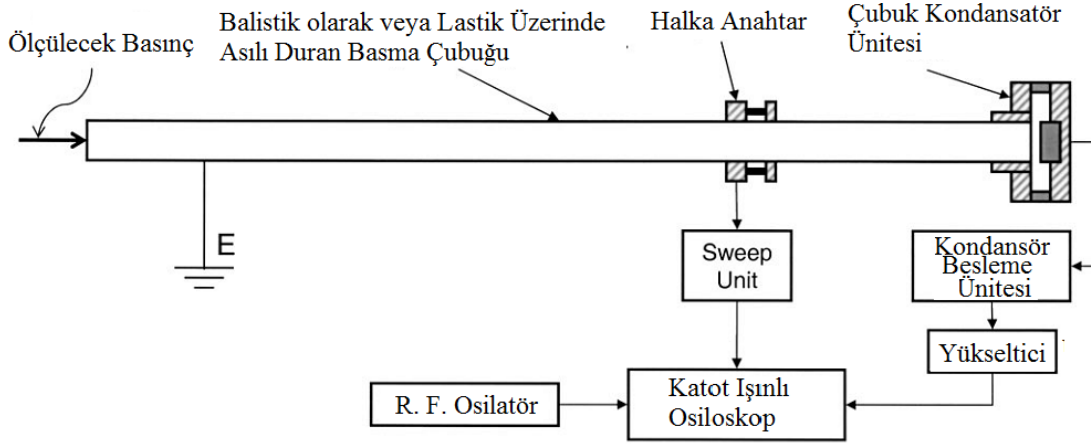


Şekil 1.2 : Bertram Hopkinson deney düzeneği [1].

Şekil 1.2'de gösterilen Bertram Hopkinson deney düzeneğinde basma çubuğunun (A) ucunda bulunan patlayıcının infilak etmesi ile bir gerilme dalgası çubuk boyunca yayılmaktadır. Çubuğun diğer ucunda bulunan ve basma çubuğu ile aynı malzeme ve kesit alanına sahip olan kısa çubuk (C), yayılan gerilme dalgasının etkisiyle fırlamaktadır. Deney düzeneğinde bulunan balistik sarkaç ile kısa çubuğun momentumu ölçülmüştür. Kısa çubuğun momentumundaki değişimden maksimum basınç genliği ve toplam süre elde edilmiştir. Ancak hassas bir gerilme dalgası sinyali elde edilemediğinden bu deney düzeneği ile istenilen sonuçlara ulaşılammıştır.

Davies, 1948 yılında Hopkinson Basma Çubuğu üzerinde dinamik yükler sonucu meydana gelen aksenal ve radyal şekil değişimini bir osiloskop'a bağlı olan paralel plaka ve silindirik kondansatör (mikrofon) ile ölçmüştür. Çubuğun uç kısmında bulunan patlayıcının infilak etmesi ile basma çubuğu üzerinde bir gerilme dalgası yayılımı meydana gelmektedir. Gerilme dalgası yayılımı sonucu çubuğun silindirik

kesit alanında oluşan şekil değişimi silindirik kondansatör ile, çubuğun yüzeyinde doğrusal olarak meydana gelen şekil değişimi ise paralel plaka kondansatör ile ölçmüştür.



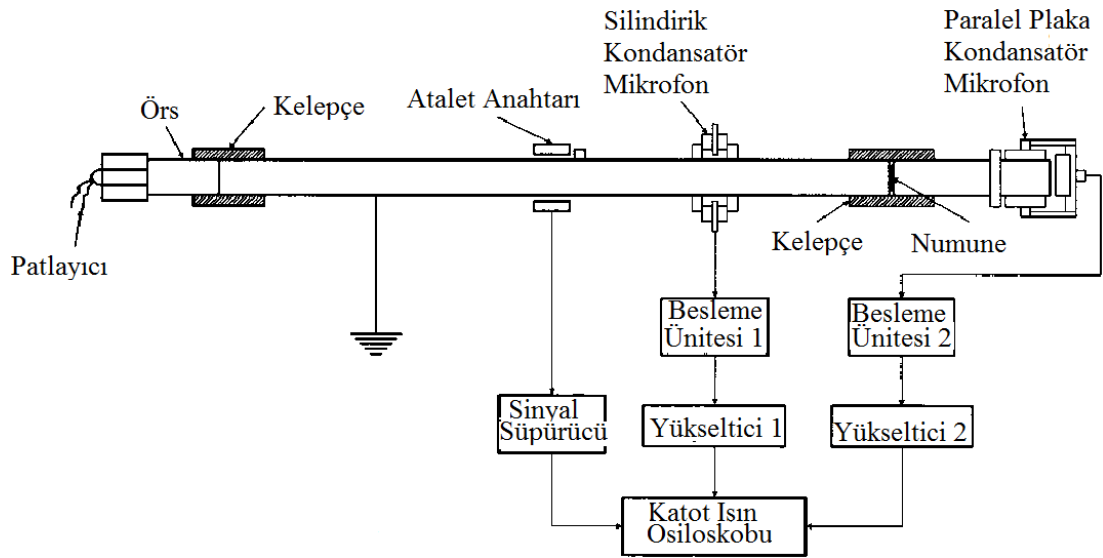
Şekil 1.3 : Davies tarafından geliştirilen aparatın genel düzeni [2].

Davies ölçümlerinin doğruluğundan emin olmak için Pochhammer'ın uzun bir çubukta meydana gelen üç boyutlu sinüsoidal dalga yayılımı çözümünü kullanmıştır. Pochhammer frekans denklemi, sonsuz çaplı bir çubukta elastik dalga yayılımının doğal olarak dispersiyon eğilimli olduğunu belirtmektedir. Bu denklemi kendi çalışmasına da uyarlayan Davies, yapmış olduğu ölçümlerin dispersiyona maruz kaldığı sonucuna varmıştır. Dolayısıyla elde ettiği verilerin hassas bir doğrulukta olmayabileceğini düşünmüştür [2].

Davies'in bu çalışmasını yayınlamasından bir yıl sonra, 1949 yılında, Kolsky, yeniden tasarladığı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği üzerinde bakır, polietilen, kurşun ve kauçuk malzemelerini test etmiş ve bu malzemelerin yüksek deformasyon hızı altındaki mekanik özelliklerini bir gerilme-şekil değiştirme grafiği ile tespit etmiştir. Kolsky'nin bu çalışması devrimsel bir nitelik taşımaktadır.

Kolsky, Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğindeki gibi uzun bir basma çubuğunun yanı sıra ikinci bir basma çubuğu kullanmıştır ve bu iki basma çubuğu arasında numune yerleştirmiştir. Basma çubuğunun ucundaki patlayıcının infilak etmesi ile oluşan gerilme dalgasının neden olduğu radyal ve eksenel yer değişimini silindirik ve paralel plaka kondansatörler ile ölçmüştür ve bu değerleri bir osiloskop üzerinde göstermiştir. Ayrıca basma çubuğu üzerinde bir atalet anahtarı kullanarak atalet etkisi minimuma indirmeyi amaçlamıştır.

Kolsky, hesaplamalarında bazı kabuller yapmıştır. Bunlar, basma çubuğunda oluşan gerilme dalgasının dispersiyona uğramaksızın yayıldığı ve tüm kesit alanında doğrusal bir gerilme yayılımının olduğuna dair kabullerdir. Ayrıca ince numune kullanarak numune üzerinde, muhtemel atalet etkisinin görülmesini engellemiş ve doğrusal bir gerilme dağılımı elde etmiştir. Dalga yayılımı sırasında oluşabilecek dispersiyon etkisinin deney sonuçlarının geçerliliğini etkilemediğini sadece sinyal şeklini değiştirdiğini gözlemlemiştir. Kolsky, darbe sonrası numune ve basma çubuğu ara yüzeyinde oluşan yer değişiminden, numunede meydana gelen şekil değiştirme miktarını, deformasyon hızını ve gerilmeyi elde ederek Hopkinson Basma Çubuğu'nu geliştirmiş ve bu deney düzeneğinin Kolsky Bar veya Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu (PHBÇ) olarak tanınmasına neden olmuştur. Böylece Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği 10^2 ve 10^4 s⁻¹ deformasyon hızlarındaki malzemelerin test edilmesi için kullanılan bir deney düzeneği haline gelmiştir.



Şekil 1.4 : Kolsky deney düzeneği [2].

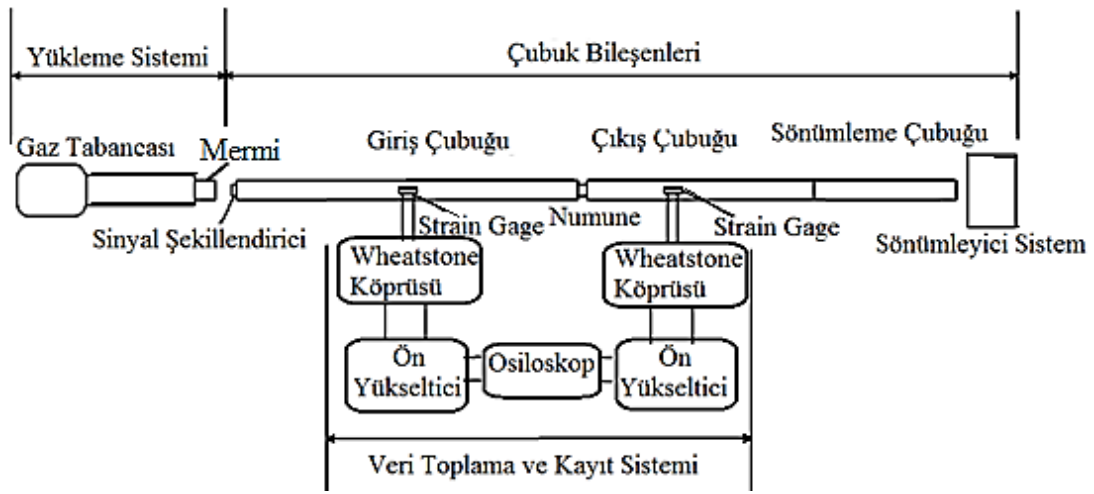
Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinde en önemli aşama verilerin hassas bir şekilde elde edilmesi olmuştur. 1954 yılında Krafft, basma çubukları üzerine strain gage'ler yerleştirmiş ve böylece numunede meydana gelen şekil değişimini hassas ve doğru bir şekilde elde edebilmiştir. Basma çubuğu ucunda patlayıcı kullanarak elde edilen darbe etkisinin tekrarlanabilir olmaması birçok zorluğa neden olmuştur. Bu durumu göz önünde bulunduran Krafft, bir gaz tabancası tasarlamış ve tabanca ile fırlattığı merminin basma çubuğuna çarpması sonucu istenilen darbe etkisine ulaşmıştır. 1964'de Lindholm, PHBÇ deney düzeneğini

laboratuvarlardaki en popöler model haline getirmiştir. Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği basma yükü dışında, çekme ve burma yükleri uygulanacak şekilde yeniden tasarlanmıştır.

Günümüzdeki gelişmiş teknoloji sayesinde bilgisayar destekli veri toplama sistemleri, strain gage'ler, dijital osiloskoplar kullanılarak Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği üzerinden daha hassas ve doğru gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilebilmektedir [1,2].

2. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU DENEY DÜZENEGİNİN GENEL TANIMI

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yükleme sistemi, çubuk bileşenleri, veri toplama ve kayıt sistemidir [1,3].



Şekil 2.1 : PHBÇ deney düzeneği sistemi [1].

2.1 Yükleme Sistemi

PHBÇ deney düzeneğinde giriş çubuğuna uygulanan darbe işlemi yükleme sistemi tarafından gerçekleştirilir. Yükleme sistemi; gaz tabancası, gaz kaynağı (helyum gazı, nitrojen gazı, basınçlı hava vs.) ve yüksek basınca dayanıklı bir vandan meydana gelmektedir.

Gaz tabancası, rezervuar ve namludan oluşmaktadır. Rezervuar, basınç kaynağından elde edilen hafif bir gaz veya sıkıştırılmış hava ile istenilen basınca ulaşıncaya kadar doldurulur. Rezervuar içindeki basınçlı gaz, vana ile kontrollü olarak serbest bırakılır. Serbest bırakılan yüksek basınçlı gaz, namlu ucunda bulunan mermiyi hızlandırır ve merminin diğer uçtan fırlamasına neden olur. Fırlayan merminin giriş çubuğuna çarpması sonucu çubuklar üzerinde gerilme dalgası yayılımı başlar.

Gaz tabancası ile elde edilen darbe işlemi kontrol edilebilir ve tekrarlanabilir özelliktedir. Gaz tabancasından fırlatılan merminin hızı fotoseller ile ölçülebilmektedir [1,2].

2.2 Çubuk Bileşenleri

PHBÇ deney düzeneği giriş çubuğu, çıkış çubuğu ve darbe çubuğu olmak üzere üç adet çelik çubuktan oluşmaktadır. Çelik malzemesinin, test edilecek numunenin cinsine bağlı olarak, yüksek akma dayanımına sahip olması istenir. Çünkü uygulanacak maksimum gerilmeyi çubuk malzemesinin akma dayanımı belirlemektedir. Deney düzeneğinde uygulanacak maksimum gerilmenin, çubukların elastik sınırı içerisinde olması bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Mermi, giriş çubuğuna çarptıktan sonra gerilme dalgası yayılımı oluşur. Bu dalganın bir kısmı numune-giriş çubuğu ara yüzeyinden geri yansır. Yayılan dalganın geri kalan kısmı ise çıkış çubuğu üzerinden geçer ve sönümleyici bir sistem tarafından absorbe edilir. Darbe sonrası çubuklar üzerinde tek boyutlu dalga yayılımını sağlamak için çubukların boyu ve çapı belli oranlarda seçilmelidir. Çubukların çap/boy oranı en az 20 olmalıdır [4].

Tek boyutlu dalga yayılımı elde etmek için, çubukların yüzeyleri pürüzsüz ve düz olmalıdır. Ayrıca çubukların minimum sürtünme ile hareket edebilecekleri yeterli derecede yağlanmış yataklara sahip olması gerekmektedir. Tüm sistem yükün uygulandığı düz eksen boyunca mükemmel bir şekilde hizalanmalıdır. Hizalama işlemi lazer kullanarak yapılabilir [6].

Giriş çubuğunun uzunluğu, mermi uzunluğunun en az iki kadar olmalıdır. Böylece gelen dalga ve yansıyan dalga sinyallerinin üst üste gelmesi engellenmiş olur. Numune, giriş ve çıkış çubukları arasına sıkıştırılır ve yükleme eksenine uygun bir şekilde hizalanır. Tüm çubuklar, aynı malzemedan oluşmaktadır ve tümü aynı çapa sahiptir. Mermi hızı, istenen deformasyon hızı ve toplam deformasyon göz önünde bulundurularak belirlenir.

2.3 Veri Toplama ve Kayıt Sistemi

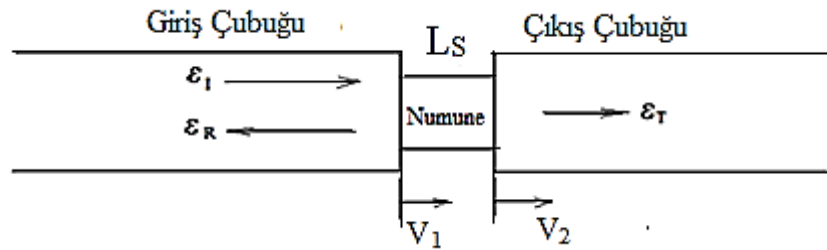
PHBÇ deney düzeneğinde kullanılan veri toplama ve kayıt sistemi günümüzdeki gelişmiş teknolojiden faydalanılarak oluşturulmuştur. Strain gage, fotosel, doğrusal

hız takometresi gibi cihazlar bu sistemde yer almaktadır. Giriş ve çıkış çubuklarının ortasına ikişer strain gage yerleştirilmiştir. Çubuklar üzerinde meydana gelen şekil değişimi strain gage'de direnç değişimine neden olur ve bu direnç değişimi voltaj çıkışı olarak okunur. PHBÇ deney düzeneğinde tüm veri toplama sistemi içerisindeki bileşenlerin minimum 100 kHz frekansa sahip olması istenir [1,5,8].

2.4 PHBÇ Deney Düzeneğinde Sağlanması Gereken Koşullar

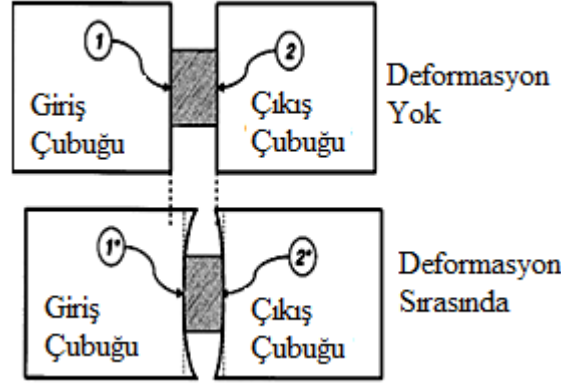
PHBÇ deney düzeneğinde bazı kabuller yapılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu kabuller:

- Çubuklar üzerinde yayılan dalga, tek boyutlu dalga yayılım teorisi ile ifade edilmelidir.
- Numune üzerinde aksel yönde eşit dağılımlı deformasyon ve gerilme dağılımı meydana gelmelidir.
- Numunedeki atalet etkisi ihmal edilebilir [8].



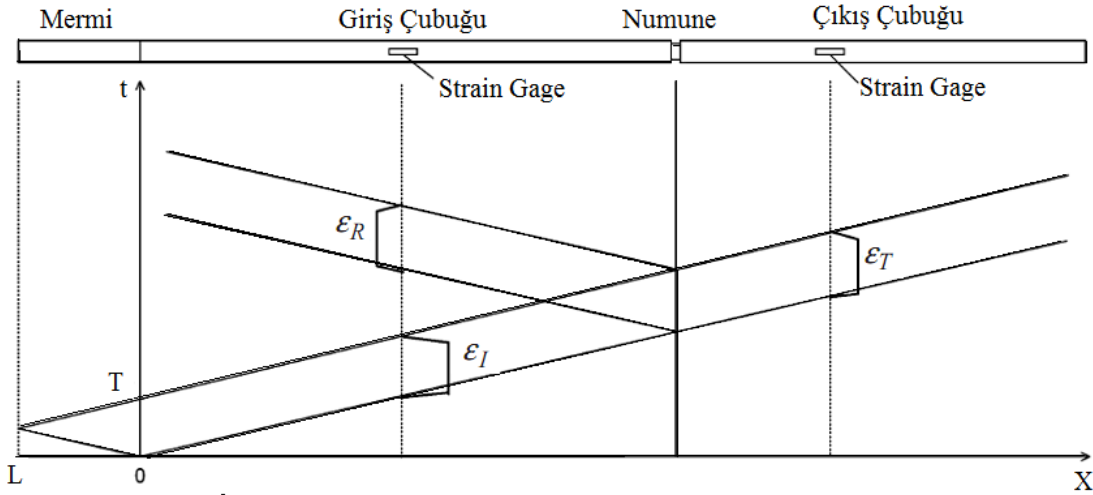
Şekil 2.2 : Numunenin çubuklar arasına yerleştirildiği konum [1].

Numune, Şekil 2.2'de gösterildiği şekilde giriş çubuğu ve çıkış çubuğu arasına yerleştirilir. Numunenin çubuklarla temas eden kenarlarına ince bir katman yağlama işlemi yapılır. Böylece numune ve çubuk ara yüzeylerinde sürtünme etkisi minimuma indirilir ve numunede basma sonucu fiçilaşma önlenerek numune üzerinde eşit dağılımlı deformasyon elde edilir. Gerilme ve deformasyon dağılımının düzgün olması bakımından numune ve çubuğun birbirine temas eden yüzeylerinin her zaman paralel konumda bulunması istenir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi çubuk ve numune ara yüzeyi paralel olmadığında tek boyutlu gerilme dalgası yayılımı elde etmek mümkün değildir. Tek boyutlu gerilme yayılımının sağlanması bu teoriden yola çıkılarak elde edilen bağıntıların geçerliliği bakımından zorunludur [5].



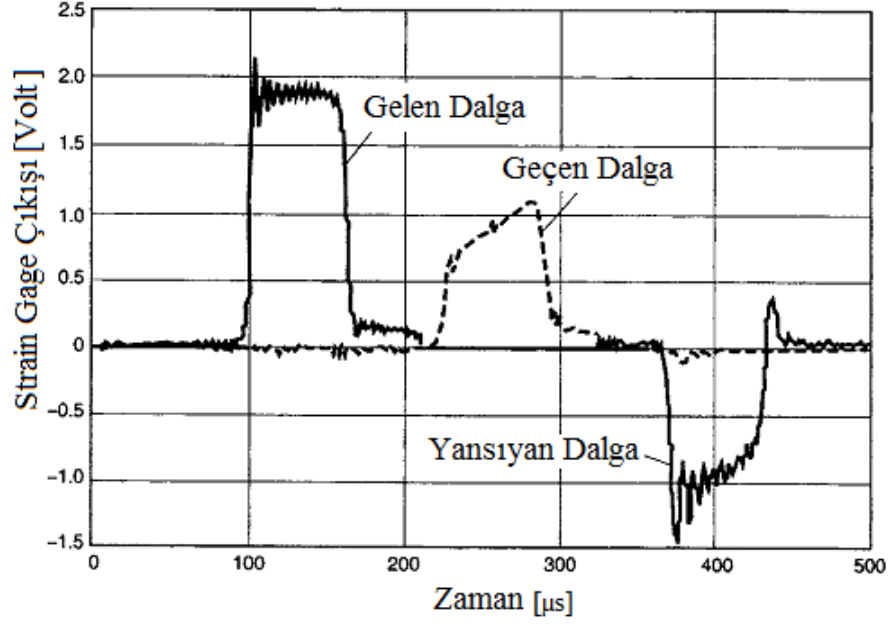
Şekil 2.3 : PHBÇ deneyi sırasında karşılaşılan paralel olmayan ara yüzey [2].

Merminin giriş çubuğuna ani olarak çarpmasından sonra oluşan tek boyutlu gerilme dalgası yayılımını Şekil 2.4’te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : PHBÇ’de gerilme dalgası yayılımına ait konum-zaman grafiği [1].

Giriş çubuğu üzerinde oluşan gelen gerilme dalgasının bir kısmı, numune-çubuk ara yüzeyine geldiğinde empedans uyumsuzluğundan dolayı geri yansırken, geri kalan kısmı ise çıkış çubuğu üzerinden geçer. Bu şekilde oluşan gelen, yansıyan ve geçen dalga sinyallerine ait konum-zaman grafiği şekil 2.4.’de görülmektedir. Çubuklar üzerinde bulunan strain gage’ler numune üzerinde gelen, yansıyan ve geçen gerilme dalgalarının neden olduğu şekil değişimini ölçerler. Geçen dalganın oluşturduğu şekil değişimi ϵ_T , yansıyan dalganın oluşturduğu şekil değişimi ϵ_R ve gelen dalganın oluşturduğu şekil değişimi ise ϵ_I ’dir. Şekil 2.5’te 304 paslanmaz çelikten elde edilen gelen, yansıyan ve geçen dalga sinyalleri gösterilmektedir [1,2,5].



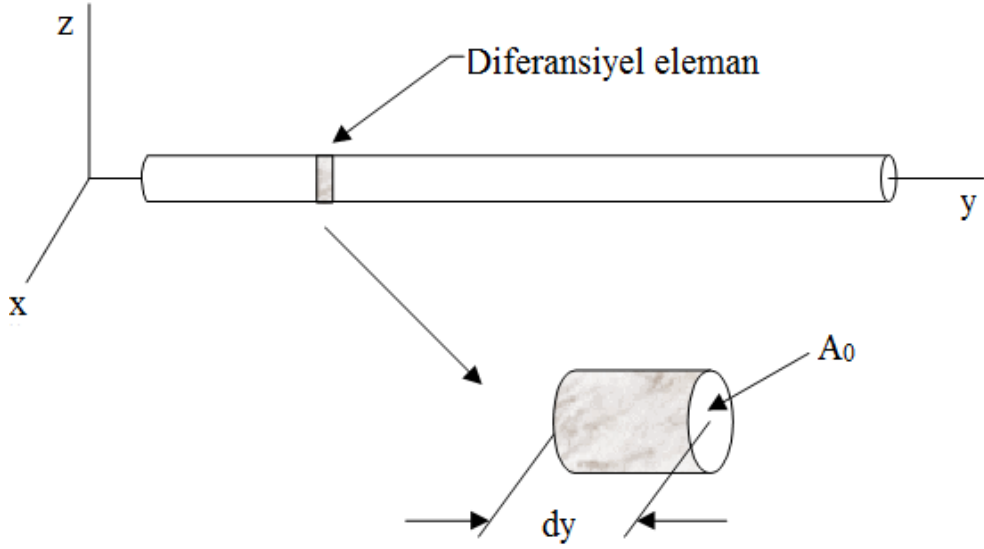
Şekil 2.5 : 304 paslanmaz çeliğe ait gerilme dalgası sinyallerinin zamana göre değişimi [5].

Darbe sonrası çubuk/numune ara yüzeyinde parçacık hızından dolayı yer değişimi meydana gelir. Yapılan hesaplamalar sonucu yer değiştirme-zaman verilerinden, şekil değiştirme-zaman eğrisi ve buradan da gerilme-zaman eğrisi elde edilir. Gerilme-zaman ve şekil değiştirme-zaman eğrilerinden ise istenen gerilme-şekil değiştirme eğrisine ulaşılır.

3. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU TEORİSİ

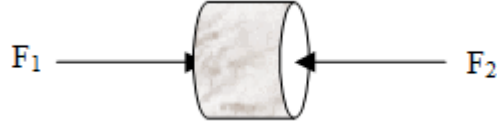
Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinde geometrik olarak uzun çubuklar kullanmak tek boyutlu dalga yayılımını elde etmeyi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu durum test edilen numune üzerinde meydana gelen mekanik değişiklikleri matematiksel olarak hesaplamayı da oldukça kolay hale getirmiştir. Çubuklar üzerindeki herhangi bir y noktasında elastik dalga yayılımını ölçerek herhangi bir noktada oluşan yer değiştirme hesaplanabilir. Bir çubuğun aksenal titreşim altındaki hareket denklemi ile tek boyutlu dalga yayılımı bağıntıları elde edilebilir. Buradan yola çıkarak numune üzerindeki gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon hızı hesaplanabilir [1,2].

3.1 Bir Çubuğun Hareket Denklemi



Şekil 3.1 : Basınç çubuğu üzerindeki diferansiyel eleman [4].

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi dy uzunluğundaki diferansiyel eleman A_0 kesit alanına sahiptir. Darbe öncesi diferansiyel eleman statik bir denge halindedir. Şekil 3.2’de ise diferansiyel elemanın darbe sonrası F_1 ve F_2 basma kuvvetlerinin etkisi altında olduğu görülmektedir.



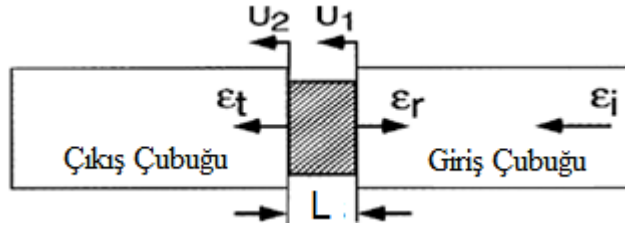
Şekil 3.2 : Basma kuvvetleri altındaki diferansiyel eleman [4].

Çubuklar üzerindeki F_1 ve F_2 kuvvetleri, diferansiyel elemanın kesit alanı üzerinde etkili olan gerilme (σ) ile ilişkilidir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

Basma çubukları Hooke kanuna uymaktadır ve Hooke kanuna bağlı olarak gerilme (σ), şekil değiştirme (ϵ) ve elastisite modülü (E) arasındaki ilişki Denklem 3.2'de belirtilmektedir.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.2)$$



Şekil 3.3 : Çubuk ve numune ara yüzey bölgesi [5].

Darbe sonrası numunenin her iki yüzeyinde meydana gelen yer değişimi, u_1 ve u_2 olarak ifade edilmektedir. Yer değişimi değerlerinden ϵ (şekil değiştirme) değerlerine ulaşılır.

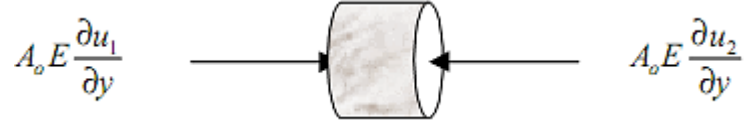
$$\epsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial y} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial y} \quad (3.4)$$

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi kuvvetler diferansiyel elemanın yüzeylerine dik olarak etki ettiği kabul edilmektedir.

$$F_1 = A_0 E \frac{\partial u_1}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$F_2 = A_0 E \frac{\partial u_2}{\partial y} \quad (3.6)$$



Şekil 3.4 : Diferansiyel eleman üzerine etki eden basma kuvvetleri [4].

Diferansiyel eleman üzerindeki F_1 ve F_2 kuvvetlerini Newton'un ikinci kanunu $F=m.a$ denklemine göre değerlendirirsek, Denklem 3.7 hareket denklemini vermektedir.

$$A_0 E \frac{\partial u_1}{\partial y} - A_0 E \frac{\partial u_2}{\partial y} = A_0 E dy \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

Diferansiyel eleman üzerindeki parçacığın ivmesi $\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$ ile ifade edilir ve tüm kesit alanında bu değer sabittir. Denklem 3.7'yi sadeleştirdiğimizde çubuğun hareket denklemini şu şekilde ifade edilir;

$$C_0^2 \left[\frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right] = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (3.8)$$

C_0 çubuğun dalga hızıdır ve aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır;

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da belirtilen E ve ρ terimleri sırasıyla çubuğun elastik modülü ve yoğunluğunu ifade etmektedir. Birçok araştırmacı çubuğun bir tarafında meydana gelen etkinin diğer tarafta yarattığı yer değişimini temel alarak hareket denklemini basitleştirmiştir. Basitleştirilmiş hareket denklemini şu şekildedir;

$$u_2 = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy \quad (3.10)$$

Diferansiyel elemanın her iki ucunda meydana gelen şekil değişiminin eşit olduğu kabul edilir. Denklem 3.10'un türevi alındığında 3.11 denklemini elde edilir.

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} dy \quad (3.11)$$

Denklem 3.11'i Denklem 3.8'in içerisine yerleştirdiğimizde çubuğun hareket denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (3.12)$$

Çubuğun hareket denklemini Hopkinson analizlerinde kullanmak pratik bir yöntem değildir ancak sonsuz bir dalga boyundaki dalganın hızını teorik olarak hesaplamaya yardımcı olur. Bu durum da numunedeki gerilmeyi, şekil değiştirmeyi ve deformasyon hızını hesaplamayı sağlar [4,5].

3.2 Çubuklarda Doğrusal Dalga Yayılımı

PHBÇ deney düzeneğinde kullanılan çubukların uzunluğu bazı teorik yaklaşımlarda kabul edilenin aksine sonsuz değildir. Şüphesiz çubuklarda birçok süreksizlik alanı mevcuttur. Bu durum dalga yayılımı üzerinde önemli etkilere neden olmaktadır. Süreksizlik alanları; çubuk uçları, numune-çubuk ara yüzeyleri olarak belirtilebilir. Belirtilen süreksizlik alanları yayılan dalganın geri yansımaya neden olur [4].

3.3 Çubuklar Üzerinde Yayılan Dalganın Geri Yansıması

Basınç çubuklarının numune ile temas eden kısımları bir süreksizlik alanıdır. Dolayısıyla elastik dalga bu uç kısımlardan geri yansır. Dalganın uç kısımlardan geri yansıması iki duruma neden olur. Yansımanın meydana geldiği uç kısımlarda oluşan yer değiştirme (u) miktarı iki katına çıkar. Bu nedenle strain gage ölçümleri bu bölgelerden belli bir uzaklıkta yapılmalıdır. Ortaya çıkan diğer bir durum ise, yansıyan dalga ile gerilme dalgasının zıt yönde olmasıdır. Yansıyan dalga gerilme dalgasına göre zıt işarete sahiptir. Gerilme dalgası pozitif kabul edilirse yansıma dalgası negatiftir ve yansıyan dalga çekme dalgası olarak da adlandırılmaktadır [4,5].

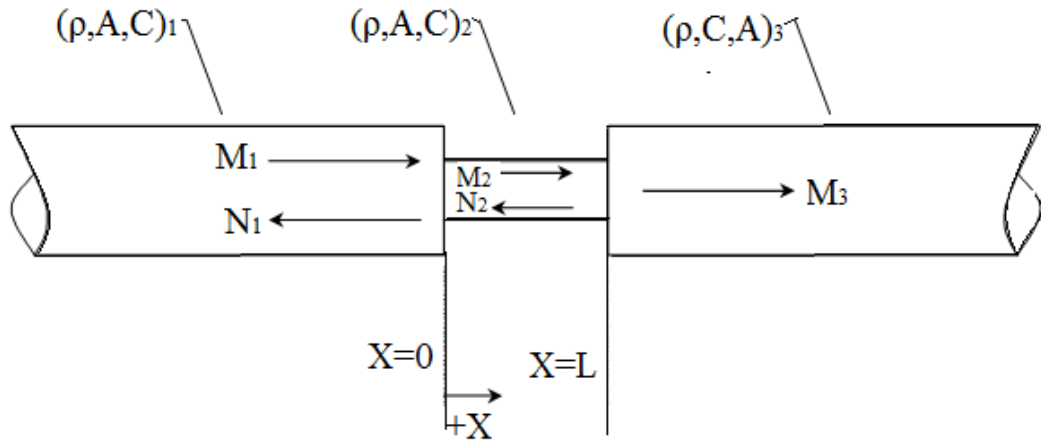
3.3.1 Kesit alanı ve empedanstaki değişimin dalga yayılımına etkisi

Süreksizlikler gibi çubuk-numune ara yüzeyinde oluşan kesit alanı ve malzeme özelliklerindeki değişiklikler de dalga yayılımını etkilemektedir. Yayılan dalganın süreksizlikler ile karşılaştığında ortaya çıkan durum empedans açısından incelenmiştir. Empedans, bir yapının herhangi bir noktasındaki kuvvetin hıza oranıdır. PHBÇ testinde kullanılan çubukların mekanik empedansı Denklem 3.13 ile ifade edilmektedir [4].

$$Z = \frac{F}{V} A_0 \rho C_0 \quad (3.13)$$

Denklem 3.13’de belirtilen F, V, A₀, ρ ve C₀ değerleri sırasıyla kuvvet, hız, çubuğun kesit alanı, yoğunluğu ve dalga hızını ifade etmektedir. Buradaki ρC₀ terimi çelik

çubuğun cinsine göre değişmektedir. Empedans fiziksel bir özelliktir, uygulanan darbe ile herhangi bir değişiklik göstermez [4].



Şekil 3.5 : Malzeme ve kesit alanındaki değişimin şematik gösterimi [4].

Şekil 3.5’de gösterildiği gibi, PHBÇ deney düzeneğinde iki çubuk arasında test edilecek numune yerleştirilmiştir. Şemada belirtilen M_1 - M_3 ve N_1 - N_2 ifadeleri soldan sağa doğru ilerleyen dalganın gerilme genliğini ifade etmektedir. $X=0$ sınırında M_1 dalgasının bir kısmı N_1 olarak geri yansımakta, bir kısmı ise M_2 olarak numune üzerinden geçmektedir. $X=L$ sınırında ise M_2 dalgasının bir kısmı N_2 olarak geri yansımakta bir kısmı da M_3 olarak ikinci çubuğa geçmektedir. Yansıyan ve geçen dalgaların seviyesi ara yüzeydeki empedans uyumsuzluğuna bağlıdır. Gerilme genliğinde meydana gelen değişimi ve buna bağlı olarak ara yüzeyden yansıyan ve geçen dalganın miktarını hesaplayabilmek için ara yüzeye ait bazı şartların sağlanmış olması gerekir. Numune-çubuk ara yüzeylerindeki dalga hızı her iki yönde eşit ve sağ ve sol numune-çubuk ara yüzeyindeki kuvvetler statik bir dengede olmalıdır. Bu şartlar sağlandığında ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisini ifade eden denklemler türetilebilir. Aşağıdaki denklem sistemi birinci ve ikinci ara yüzeyi ifade etmektedir.

$X=0$ ara yüzeyinde;

$$\text{Hızın sürekliliği;} \quad \frac{M_1 - N_1}{(\rho C)_1} = \frac{M_2}{(\rho C)_2} \quad (3.14)$$

$$\text{Kuvvet dengesi;} \quad a_1(M_1 + N_1) = a_2(M_2) \quad (3.15)$$

$X=L$ ara yüzeyinde;

$$\text{Hızın sürekliliği;} \quad \frac{M_2 - N_2}{(\rho C)_2} = \frac{M_3}{(\rho C)_3} \quad (3.16)$$

$$\text{Kuvvet dengesi;} \quad A_2(M_2+N_2)= A_3(M_3) \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemlerde M_1 , M_2 , M_3 , N_1 ve N_2 olmak üzere beş gerilme değişkeni verilmektedir. Ancak her bir değişkene ait net bir çözüm yapabilmek için ek ifadeler gerekmektedir. Bu amaçla bir iletim katsayısı tanımlanarak geçen dalganın genliğinin hesaplanması sağlanır. İletim katsayısı α 'dır ve bu katsayı sadece 1 ile 0 arasında değer alır. Eğer iletim katsayısı 0 ise tamamen yansıma meydana gelmiştir. Eğer iletim katsayısı 1 ise %100 dalga geçişi sağlanmıştır (yansıma yoktur). İletim katsayısı aşağıdaki gibi belirtilir [4].

$$\alpha = \frac{M_t}{M_i} = \frac{\sigma_T}{\sigma_I} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de belirtilen t ve i işaretleri sırasıyla geçen ve gelen gerilmeleri ifade etmektedir. Geçen gerilme dalgası ile gelen gerilme dalgası aynı fazda bulunmaktadır [4].

Enerji korunumu yasasını göz önünde bulundurularak iletim katsayısı şu şekilde de ifade edilebilir;

$$\beta = 1 - \alpha \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'da β yansıma katsayısını ifade etmektedir. Yansıma katsayısı ara yüzeyden yansıyan dalganın miktarını ifade etmektedir. Tek bir katsayının bilinmesi ile diğer katsayıya kolayca ulaşılabilir. Yansıma ve geçiş katsayıları test edilecek malzemeler için önemli bilgiler vermektedir. Aşağıda belirtilen denklemler numuneye gelen ve geçen dalga oranı için verilmiş ifadelerdir [4,5].

$$\alpha_{12} = \frac{2A_1(\rho C_0)_2}{A_1(\rho C_0)_1 + A_2(\rho C_0)_2} \quad (3.20)$$

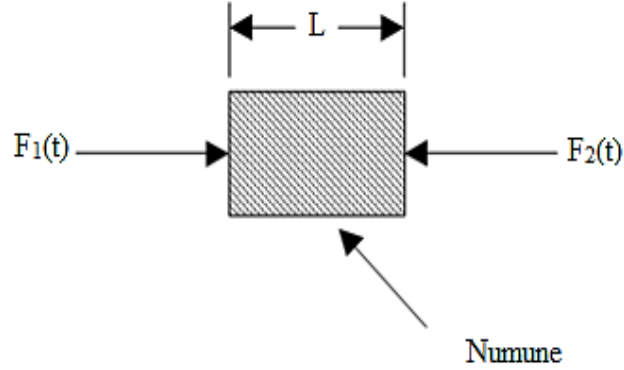
$$\alpha_{23} = \frac{2A_2(\rho C_0)_3}{A_2(\rho C_0)_2 + A_3(\rho C_0)_3} \quad (3.21)$$

Yukarıdaki (3.20) ve (3.21) denklemlerinde belirtilen kesit alanı A değerinin ve malzemenin türünü belirleyen ρC_0 değerinin değişmesi ile farklı iletim katsayıları elde edilir.

3.4 Numunede Gerilme, Şekil Değişirme ve Deformasyon Hızı Hesabı

3.4.1 Numune üzerindeki oluşan gerilmenin hesaplanması

Numunedeki ortalama gerilme numunenin her iki yüzeyinin maruz kaldığı kuvvetler ile ifade edilir. Bu kuvvetler şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Çubuklar arasındaki numunenin şematik gösterilişi [4].

Numune üzerindeki ortalama kuvvet ise şu şekildedir;

$$F_{ort}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad (3.22)$$

Silindirik numune üzerindeki gerilme Denklem 3.23’de belirtildiği gibi elde edilir.

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{F_{ort}(t)}{(\pi D_s^2/4)} \quad (3.23)$$

D_s numunenin çapını belirtmektedir. Dinamik bir denge halinde bulunan numune için çubukların uç kısmındaki kuvvetler; gelen $\epsilon_I(t)$, yansıyan $\epsilon_R(t)$ ve geçen $\epsilon_T(t)$ gerilme dalgalarının neden olduğu şekil değişimi cinsinden ifade edilebilir; [4,5].

$$F_1(t) = E [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t)] \frac{\pi D_B^2}{4} \quad (3.24)$$

$$F_2(t) = E \epsilon_T(t) \frac{\pi D_B^2}{4} \quad (3.25)$$

D_B basma çubuklarının yarıçapını ifade etmektedir. Denklem 3.22, Denklem 3.24 ve Denklem 3.25 içerisine Denklem 3.23’ü yerleştirdiğimizde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{E D_B^2}{2 D_s^2} [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (3.26)$$

PHBÇ deney düzeneğinde yapılan testlerde numunenin tüm kesit alanındaki deformasyonun eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu durum şu şekilde ifade edilir;

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (3.27)$$

Denklem 3.27'den yola çıkarak numunedeki ortalama gerilmeyi ifade eden denklem aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_{ort}(t) = \frac{ED^2_B}{D^2_s} \varepsilon_T(t) \quad (3.28)$$

Denklem 3.2, numunedeki gerilmenin, geçen dalga sonucu oluşan şekil değişimi ile orantılı olduğunu belirtmektedir [4,5].

3.4.2 Numunedeki şekil değiştirme ve deformasyon hızı

Deformasyon hızı, birim zamanda malzemede meydana gelen şekil değiştirme miktarıdır. Darbe uygulandıktan sonra numune-çubuk ara yüzeyinde oluşan yer değişiminden yola çıkarak numunede meydana gelen deformasyon hızı hesaplanabilir. Deformasyon hızı ve şekil değiştirme miktarlarını hesaplayabilmek için hareket denklemini kullanmak gerekmektedir.

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Harmonik dalgalar için aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.28)$$

$$E \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.29)$$

Buradaki v değeri parçacık hızını, p ise kesit alanı üzerindeki gerilmeyi belirtir. Bu durumda hareket denklemini, çubuğunun kesit alanı üzerindeki parçacık hızı ve gerilme göz önünde bulundurularak yeniden yazılır;

$$-\frac{\partial p(y, t)}{\partial y} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.30)$$

Parçacık hızını (v) bulabilmek için çubukta meydana gelen basıncı bilmek gerekir. Pozitif harmonik dalga yayılımı olduğunu varsayarsak basınç şu şekilde belirtilir;

$$p(y, t) = P e^{i(\omega t - ky)} \quad (3.31)$$

Denklem 3.31’de belirtilen P,w,t,k ve y ifadeleri sırasıyla basınç genliği, frekans, zaman, dalga numarası ve dalganın uzaydaki konumunu ifade etmektedir.

$$k = \frac{w}{C_0} \quad (3.32)$$

Denklem 3.31’in y’ye göre türevini alırsak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\frac{\partial p(y, t)}{\partial y} = ikPe^{i(wt-ky)} \quad (3.33)$$

Denklem 3.33 içine hareket denklemini yerleştirilirse Denklem 3.34’e ulaşılır.

$$ikPe^{i(wt-ky)} = \rho i w v(y, t) \quad (3.34)$$

Buradan parçacık hızı, $v(y, t)$, kolayca elde edilir;

$$v(y, t) = \frac{k}{\rho w} Pe^{i(wt-ky)} \quad (3.35)$$

Denklem 3.33’de p(y,t) ifadesi yerine yazıldığında Denklem 3.36 oluşur.

$$v(y, t) = \frac{1}{\rho C_0} p(y, t) \quad (3.36)$$

Sonuç olarak basınç çubuğunun kesit alanı üzerinde tek eksenli gerilme olması durumunda, gerilme ile basınç birbirine eşit olur. p(y, t) değeri, şekil değiştirme (ϵ) ve elastik modül (E) ile şu şekilde ifade edilir [4,5];

$$p(y, t) = \epsilon(y, t)E \quad (3.37)$$

Denklem 3.36, Denklem 3.37’de yerine yazıldığında Denklem (3.38) elde edilir;

$$v(y, t) = C_0 \epsilon(y, t) \quad (3.38)$$

Negatif yönde ilerleyen parçacık hızı ise şu şekildedir;

$$v(y, t) = -C_0 \epsilon(y, t) \quad (3.39)$$

Parçacık hızını hesapladıktan sonra numunedeki deformasyon hızı kolayca hesaplanabilir. Verilen herhangi bir zamandaki ortalama deformasyon hızı Denklem 3.40’da belirtilmektedir [4].

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{v_{arayüzey 2} - v_{arayüzey 1}}{L} \quad (3.40)$$

Giriş çubuğu-numune ara yüzeyinde iki tür dalga bulunmaktadır ve bu iki dalga farklı şekil değişimine neden olmaktadır. Bu dalgalardan gelen dalga pozitif (+) yönde ilerler, yansıyan dalga ise negatif yönde ilerler.

$$v_{arayüzey 1} = C_0 \epsilon_I - C_0 \epsilon_R = C_0 (\epsilon_I - \epsilon_R) \quad (3.41)$$

İkinci ara yüzeyde meydana gelen parçacık hızını hesaplayabilmek için çıkış çubuğunda oluşan şekil değişimini bilmek gerekir. Geçen dalga pozitif yönde ilerler ve çıkış basınç çubuğu üzerinde şekil değişimine neden olur. Buradan yola çıkarak ikinci ara yüzeydeki parçacık hızı;

$$v_{arayüzey 2} = C_0 \epsilon_T \quad (3.42)$$

Ara yüzey denklemleri Denklem 3.40'da yerine yazılırsa;

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = -\frac{C_0(\epsilon_T - \epsilon_I + \epsilon_R)}{L} \quad (3.43)$$

Numunenin her bir kesit alanındaki deformasyon aynıdır. Bu durum aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir;

$$\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) = \epsilon_T(t) \quad (3.27)$$

Denklem 3.44'ü denklem 3.43'te yerine yazarsak numunedeki deformasyon hızı şu şekilde ifade edilir [4,5];

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0\epsilon_R}{L} \quad (3.44)$$

Denklem 3.45'in integrali alındığında numunedeki şekil değiştirme miktarını ifade eden denklem elde edilir.

$$\epsilon_s = -\frac{2C_0}{L} \int \epsilon_R(t) dt \quad (3.45)$$

Giriş ve çıkış basma çubukları üzerinde bulunan strain gage'ler ile çubuklar üzerinden geçen ve yansıyan gerilme dalgalarının neden olduğu şekil değiştirme miktarı ölçülür ve ölçülen değerler aşağıda belirtilen üç temel denklemde kullanılır. Bu denklemlerden elde edilen veriler ile gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilir. [3,4,5]

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0\epsilon_R(t)}{L} \quad (3.46a)$$

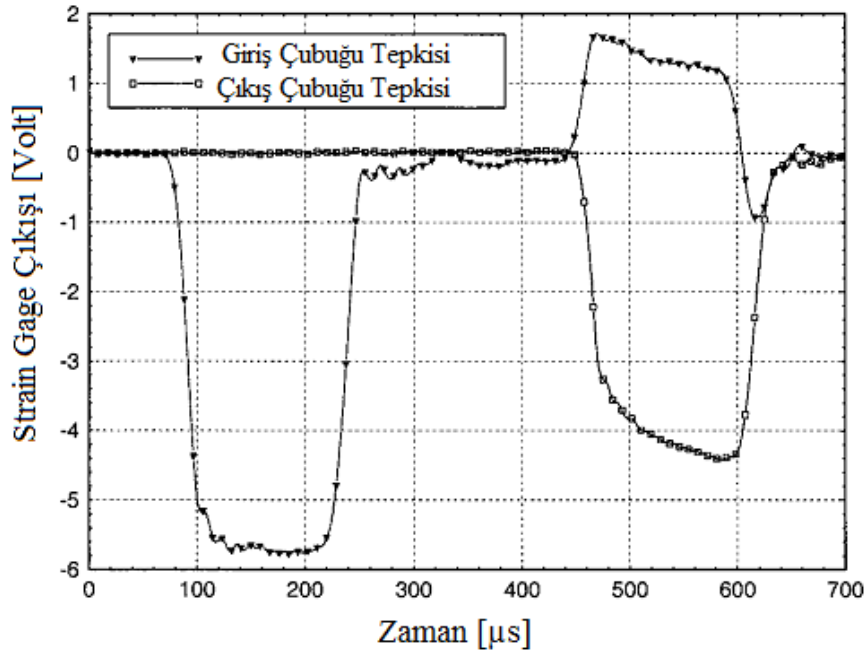
$$\varepsilon_s = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (3.46b)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_B}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (3.46c)$$

3.5 Veri İşleme ve C_0 Değerinin Belirlenmesi

3.5.1 Veri işleme

PHBÇ ile yapılan deneyler tamamlandıktan sonra strain gauge'ler ile ölçülen sinyaller kullanılır. Genellikle strain gauge'ler numune-çubuk ara yüzeyinden eşit uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilir. Ölçülen sinyaller şekil değişimi verilerine dönüştürülerek gelen $\varepsilon_I(t)$, yansıyan $\varepsilon_R(t)$ ve geçen $\varepsilon_T(t)$ şekil değiştirme verileri elde edilir. Ancak bu şekil değiştirme verilerini elde etmeden önce, bu verilerin başlangıç noktasını belirlemek ve dispersiyon etkilerinden uzaklaştırmak için bir düzeltme işlemi yapmak gerekmektedir.



Şekil 3.7 : PHBÇ deneyinden elde edilen tipik strain gage kayıtları [2].

Eğer $L_S/D_S \sim 1,0$ ve/veya numunenin empedansı çubuğun empedansından çok küçük ise yansıyan ve geçen sinyallerin başlangıç noktaları arasında önemli bir zaman gecikmesi oluşacaktır. Ayrıca strain gage'lerin ara yüzeyden olan uzaklıkları eşit değilse yansıyan ve geçen sinyallerin başlangıç noktalarını zaman cinsinden belirlemek zorlaşacaktır. Sonuç olarak PHBÇ deney düzeneğinde elde edilen verileri

işlemeden önce gelen, yansıyan ve geçen sinyallerin zaman cinsinden başlangıç noktalarını belirlemek ve bunları bir zaman ekseninde ortak bir sıfır noktasına dönüştürmek gerekmektedir. Ancak yayılan dalga üzerinde meydana gelen dispersiyon etkisi sıfır noktasının (zero point) elde edilmesini zorlaştırır. Bu durumu gidermek ve daha doğru veriler elde edebilmek için dispersiyon düzeltme işlemi yapılır [2,5,7].

3.5.2 C_0 değerinin belirlenmesi

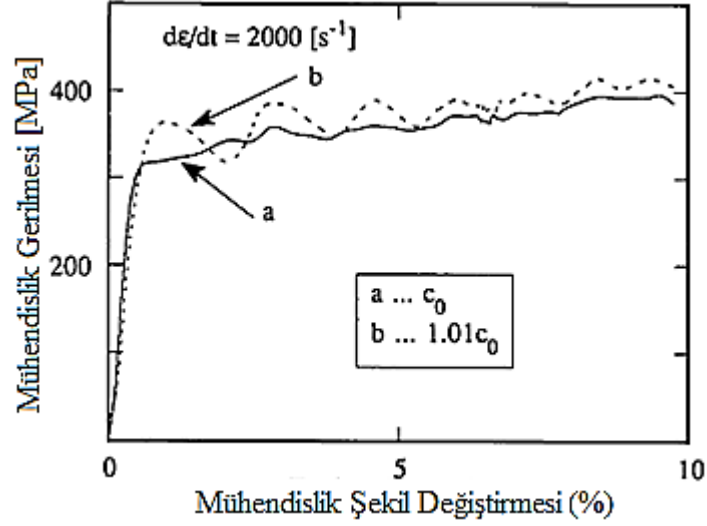
PHBÇ deney düzeneğinde kullanılan çelik çubukların sahip olduğu bir dalga yayılım hızı (C_0) değeri vardır. Bu değer çelik çubuğun malzeme türüne bağlı olarak değişir. Darbe çubuğunun giriş çubuğuna çarpması sonucu oluşan gerilme dalgasının hızı C_i ile çubuğun dalga hızı C_0 değeri eşit olduğunda sistemde dispersiyon meydana gelmez. Dolayısıyla böyle bir sistemde dispersiyon düzeltme işlemi yapmaya gerek yoktur. Ancak C_0 ve C_i değerleri gerçekte eşit değildir. Davies'in de belirttiği gibi sonsuz uzunlukta ve çaptaki bir çubukta yayılan dalga doğal olarak dispersiyon göstermektedir [7].

C_0 değeri çubukların kalibrasyonu ile elde edilir. Kalibrasyon işlemi iki şekilde yapılmaktadır. Kalibrasyon yöntemlerinden ilki, giriş veya çıkış çubuğuna ayrı ayrı kalibrasyon işlemi uygulamaktır. Darbe çubuğu yalnızca giriş çubuğuna çarpar, giriş çubuğu üzerindeki strain gage'ler ile veriler ölçülür. Strain gage'lerin orta noktası ile giriş çubuğunun darbe uygulanmayan diğer boş ucu arasındaki mesafe belirlenir. Bu mesafe l ile belirtilmektedir. Darbe sonrası elde edilen ϵ_i ve ϵ_R sinyalleri arasındaki zaman aralığının bu mesafeye oranı çubuğun C_0 değerini verir [7].

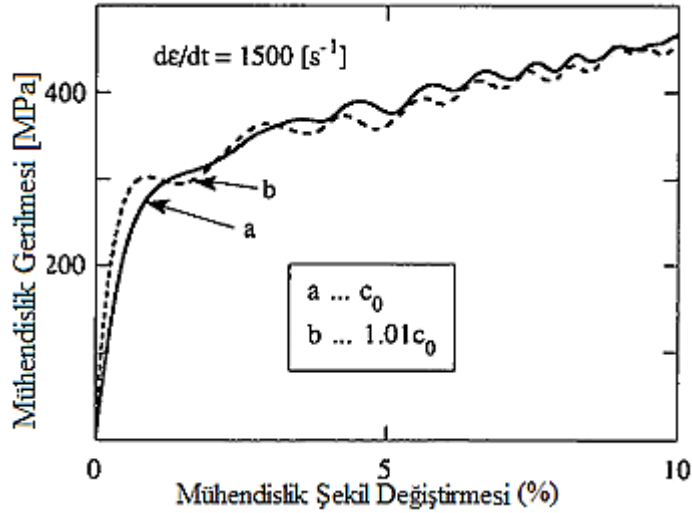
$$C_0 = \frac{2l}{\Delta t} \quad (3.64)$$

Diğer bir kalibrasyon yöntemi ise giriş ve çıkış çubuklarına birlikte uygulanan kalibrasyon işlemidir. Bu işlem sırasında çubuklar arasında numune yoktur. İki çubuk birleştirilir ve darbe çubuğu giriş çubuğuna çarpar. Böylece ϵ_i ve ϵ_T sinyalleri arasında kalibrasyon işlemi yapılmış olur. Çubuklar arasında empedans farkı bulunmaz. Dolayısıyla yansıyan sinyaller ihmal edilecek seviyede oluşur. Eğer hizalama düzgün olarak yapılmamış ise yansıyan sinyaller çok belirgin bir şekilde oluşur ve bu istenmeyen bir durumdur.

Lifshitz ve Leber tekrarlamalı dispersiyon düzeltme yöntemini kullanarak C_0 değerinin hassas bir şekilde belirlenmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermişlerdir [7]. Bu yöntemle C_0 değerindeki en küçük bir değişimin dinamik gerilme-şekil değiştirme eğrisinde salınımlara neden olduğunu görülmüştür.



Şekil 3.8 : C_0 değerindeki küçük bir değişimin AL-6061-T6'nın dinamik gerilme-deformasyon eğrisinin biçimine etkileri [7].



Şekil 3.9 : C_0 değerindeki küçük bir değişimin AL-6061-T6'nın dinamik gerilme-deformasyon eğrisinin biçimine etkileri [7].

4. PARÇALI HOPKINSON BASMA ÇUBUĞU (PHBÇ) DENEY DÜZENENEĞİ KURULUMU

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu için gerekli olan bileşenleri temin etmek ve deney düzeneğinin kurulumunu gerçekleştirmek ne kadar kolay gözükse de sistemin doğru çalışabilmesi titiz bir çalışma gerekmektedir.

4.1 PHBÇ Deney Düzeneği

PHBÇ deney düzeneğinde kullanılan bileşenler; giriş ve çıkış çubukları, darbe mermi, strain gage'ler, veri toplama sistemi ve gaz tabancasından oluşmaktadır.



Şekil 4.1 : Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu deney düzeneğinin genel görünümü.

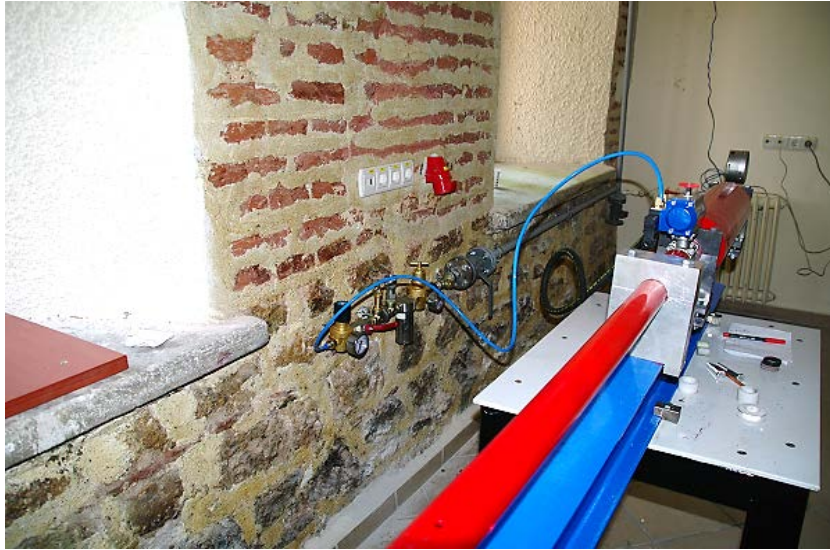
Çelik çubukları türü 55Cr3 yay çeliğidir. Giriş ve çıkış çubuklarının uzunlukları 1,5 metre, mermi uzunluğu ise 20 cm olup, tümü 55Cr3 yay çeliğidir. Tüm çubukların çapları 19 mm'dir.

PHBÇ deney düzeneğinde kullanılan çubukların uzunluk/çap oranı yapılan çalışmalar sonucu en az 20 olması gerektiği belirtilmiştir. Giriş çubuğunun uzunluğu ise darbe sonrası oluşan gerilme dalgasının en az iki katı olacak şekilde belirlenmelidir.



Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin çıkış çubuğu tarafından görünüşü.

Numunede darbe sonrası meydana gelen deformasyon, strain gage'ler ile ölçülerek kaydedilir. Basma çubuklarının ortasına, basma eksenine paralel olacak şekilde iki strain gage yerleştirilmiştir.



Şekil 4.3 : Kompresörden gelen basınçlı havayı kontrol eden sistem.

Gaz tabancası, rezervuar ve namlu olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Namlu olarak 130 cm honlanmış boru kullanılmıştır. Namlu ucunda yaklaşık 40 cm mesafe boyunca 2,5 cm ara ile karşılıklı ikişer delik açılmıştır. Rezervuar içine kompresörden basınçlı hava akışı sağlanmış ve basınç miktarı rezervuar girişinde bulunan manometre ile kontrol edilmiştir. Pnömatik aktüatörlü vana sayesinde rezervuar içindeki basınçlı hava 30 ms gibi çok kısa bir sürede serbest bırakılmış ve böylece namlu içindeki merminin hızlanması sağlanmıştır. Hızlanan mermi, namlu

ucundan fırlatarak giriş çubuğuna darbe uygulamıştır. Namlu ucunda bulunan delikler vasıtasıyla basınçlı hava boşaltılarak kontrollü ve öngörülebilir bir darbe etkisi elde edilmiştir.

4.2 Basınç Çubuğunun Fiziksel Özellikleri

Çelik çubukların akma dayanımı numunenin maruz kalacağı maksimum gerilmeyi sınırlamaktadır. Darbe sonrası oluşan gerilme çubuğun akma noktasının altında, diğer bir deyişle uygulanan gerilme çelik çubuğun elastik limiti içinde olmalıdır. Yüksek akma dayanımına sahip çelik çubuklar seçilerek daha yüksek basma kuvveti uygulanabilir. Çelik çubukların numune ile temas eden ve darbe uygulanan yüzeyleri paralelliği sağlayacak şekilde düz olmalıdır.

Çizelge 4.1 : Basınç çubuğunun özellikleri

Akma Gerilmesi	554 MPa
Çekme Gerilmesi	970 MPa
Sertlik	310-315 Hv
% Uzama	%16,50

PHBÇ deney düzeneğinde test edilecek malzemenin cinsine göre deformasyon hızı değişiklik göstermektedir. Basma çubuğunun cinsini belirlemeden önce istenen deformasyon hızı belirlenmelidir. Numune üzerinde sabit bir deformasyon hızı ve gerilme dengesi elde edebilmek için bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir.

4.3 PHBÇ Deney Düzeneğinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

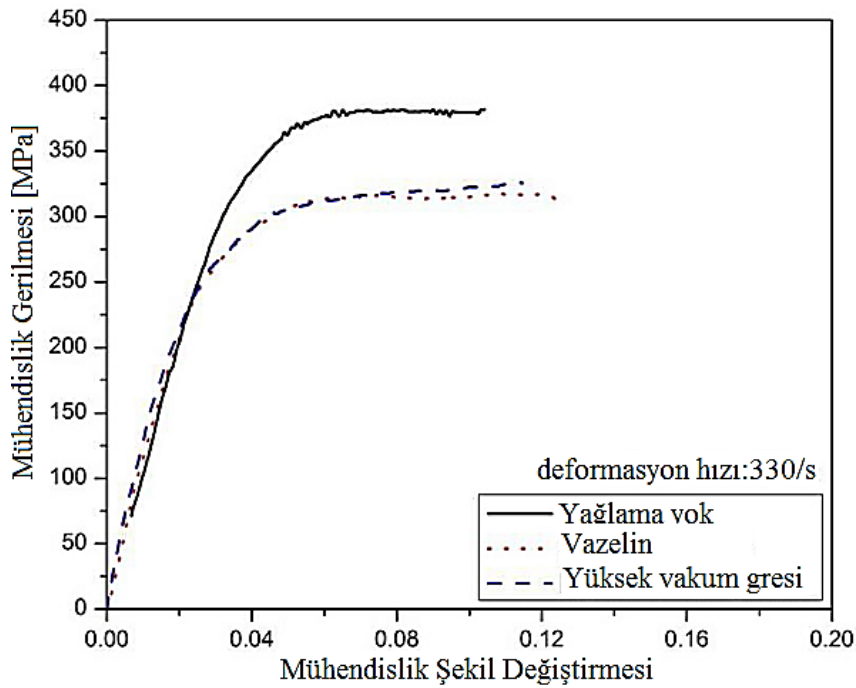
4.3.1 Atalet etkileri

PHBÇ deney düzeneğinde test edilen numune ilk etapta hareketsizdir ve sonra yüksek hızda deformasyona maruz kalmaktadır. Bu durum numunede atalet etkilerinin görülmesine neden olmaktadır. Deneylerin amacı, malzemenin başlangıç tepkilerini ölçmektir ve bunun için atalet etkisini minimize etmek gerekir. Atalet etkisini ortadan kaldırmak için uygun numune tasarımı ve deneysel koşullarda bazı iyileştirmeler yapılmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre numunenin uzunluk/çap

oranı $\sqrt{3/4}$ olduğunda ve sabit bir deformasyon hızı uygulandığında ataletsel etkinin ortadan kalktığı görülmüştür [1,5]

4.3.2 Ara yüzey sürtünmesi

Numune ve çubuk arasında meydana gelen sürtünme, numunede üç boyutlu gerilme yayılımına neden olabilir. Ancak PHBÇ deney düzeneğinde üç eksenli gerilme yerine tek eksenli bir gerilme yayılımı elde edilmelidir. Sert malzemeler üzerinde yapılan deneylerde ara yüzeydeki sürtünme nedeniyle, numunede normalden daha az bir gerilmenin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum sürtünmenin sert malzemelerde çok eksenli gerilmeye neden olduğundan, malzemenin olması gerekenden daha kısa sürede kırıldığı şeklinde açıklanmıştır. Yumuşak malzemelerde ise ara yüzey sürtünmesi numunenin yanal genişmesini engellediğinden, numunede ölçülen gerilmeyi arttırdığı görülmüştür.



Şekil 4.4: Alüminyum dolgulu epoksi'de yağlama işlemi sonucu elde edilen dinamik tepkiler [1].

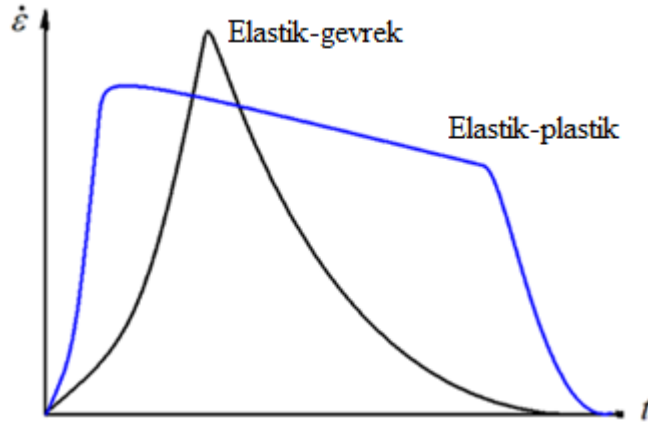
Ara yüzeyde yağlama olmadığında, ara yüzey sürtünmesinin numunenin yanal olarak genişmesini engellediği ve özellikle numune yüksek deformasyona maruz kaldığında, yüksek akma gerilmesine neden olduğu Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Yağlayıcı kullanıldığında bu etkilerin azaldığı belirtilmiştir. Yağlayıcıların cinsi test edilecek malzemenin cinsine göre değişiklik gösterebilir [1].

4.3.3 Sabit deformasyon hızı

Sabit deformasyon hızı Kolsky tarafından da belirtildiği gibi numunedeki atalet etkisini minimuma indirmektedir. PHBÇ deney düzeneğinde test edilecek olan malzemenin türüne göre deformasyon hızında değişiklikler görülür. Elastik-gevrek ve elastik-plastik malzemelerde deformasyon hızı sabit değildir. Özellikle elastik-gevrek malzemelerde bu durum daha net görülmektedir.

Deformasyon sertleşmesine maruz kalmış bir malzemeyi, sabit bir deformasyon hızında deforme edebilmek için uygulanan gerilme miktarı gittikçe artar. Aksi takdirde deformasyon hızında azalma görülür. Gelen gerilme dalgasının genliğinin kontrollü olarak artırılmasıyla numuneye uygulanan gerilmede artış meydana gelir.

Sabit deformasyon hızına ulaşabilmek için deney düzeneğinde bazı ayarlamalar yapmak gerekir. Deney düzeneğinde yapılan bu ayarlamaların geçen dalga sinyali göz önünde bulundurularak yapılması daha doğru sonuçlar vermiştir. Geçen dalga sinyalini değerlendikten sonra bir sonraki deneyde dinamik denge ve sabit deformasyon hızına ulaşmak için, gelen gerilme dalgasına sinyal şekillendirme işlemi uygulanır [1,5].



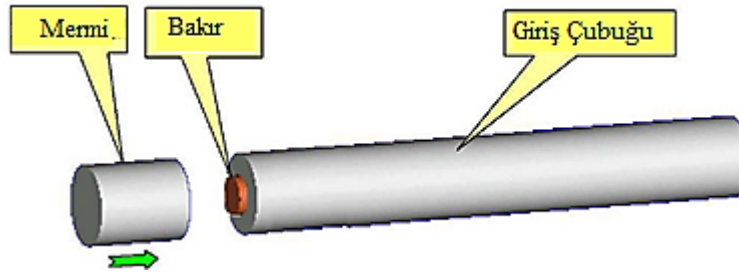
Şekil 4.5 : PHBÇ deney düzeneğinde elde edilen elastik-sert ve elastik-plastik malzemelerin deformasyon hızı [1].

4.3.4 Sinyal şekillendirme tekniği

Sinyal şekillendirme tekniği PHBÇ deney düzeneğinde numune üzerinde bir gerilme dengesi ve sabit deformasyon hızı sağlayabilmek için kullanılan bir yöntemdir. Sinyal şekillendirme işlemi, gelen gerilme dalgasına uygulanan bir düzeltme işlemidir. Gelen gerilme dalgasına sinyal şekillendirme tekniği uygulanmadığında,

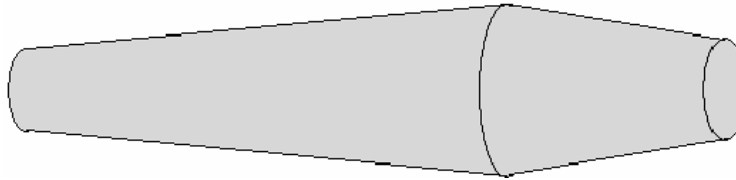
yüksek frekanslı ve salınım miktarı fazla sinyaller elde edilmektedir. Giriş çubuğunun ucuna yerleştirilen metal parça ile istenmeyen sinyallere bir filtre uygulanır ve daha kısa frekanslı ve salınımı az olan gelen dalga sinyalleri elde edilir.

Sinyal şekillendirme tekniğinde uygulanan metal parçalar alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve pirinç gibi malzemelerdir. En etkili sonuç veren sinyal şekillendirme malzemesi ise OFHC bakır malzemesidir. Daha sert numuneleri test ederken daha sert sinyal şekillendirici malzemeler kullanılır.



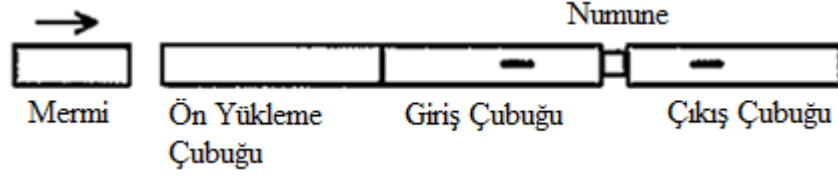
Şekil 4.6 : Bakır ile sinyal şekillendirme tekniği [1].

Merminin şeklinin değiştirilmesiyle de gelen gerilme dalgası modifiye edilebilir. Örneğin merminin silindirik şekil yerine konik şekilde kullanarak gelen gerilme dalga sinyalinin şekli değiştirilebilir. Konik şeklindeki mermi, daha çok sert malzemeler test edilirken tercih edilmektedir.



Şekil 4.7 : Konik biçimde şekillendirilmiş darbe çubuğu [1].

Diğer bir sinyal şekillendirme tekniği ise üçüncü basma çubuğu tekniğidir. Ön yükleme işlemine maruz kalan bu üçüncü basma çubuğu, darbe sinyalini yumuşatır ve dispersiyonu azaltır. Mermi ve giriş çubuğu arasına yerleştirilen üçüncü basma çubuğu, sinyal şekillendirici görevi görür. Kullanılan üçüncü çubuk diğer basınç çubukları ile aynı malzemedendir [1,5].



Şekil 4.8 : Üçüncü bir ön yükleme çubuğu ile sinyal şekillendirme tekniği [12].

4.3.5 Deformasyon hızı limiti

Malzeme üzerinde istenen sabit deformasyon hızını elde etmek için, malzemenin bu deformasyon hızına ulaşıncaya kadar akma veya kopma gösterip göstermeyeceğini bilmek gerekir. İstenen deformasyon hızı malzemenin maksimum akma gerilmesinin üzerinde bir gerilme yaratıyorsa, bu deformasyon hızı elde edilmeden önce numune akma veya kopma gösterebilir. PHBÇ deney düzeneğinde dinamik gerilme dengesinin ve sabit deformasyon hızının eş zamanlı olarak elde edebileceği bir maksimum deformasyon hızı limiti vardır.

4.3.6 Numune tasarımı

PHBÇ deney düzeneğinin en önemli ve kritik aşamalarından biri de numune boyutlarının belirlenmesi aşamasıdır. Bu işlem PHBÇ için yapılan genel kabulleri takip etmekten ibarettir. Bu kabuller şöyledir:

- Numunenin her yerinde eşit deformasyon olmalı ve herhangi bir atalet etkisi ve sürtünme etkisi mevcut olamamalıdır.
- Numune tek eksenli gerilme etkisi altında olmalıdır.

Tüm numune tasarımları bu üç kabule uygun olacak şekilde yapılmalıdır. Pratik olarak bu koşullar optimum olacak şekilde numune tasarımı yapılır.

PHBÇ deney düzeneğinde test edilecek malzemenin cinsine bağlı olarak numune boyutlarında farklılıklar görülür. Ancak genel olarak numunede hem radyal ve doğrusal ataleti hem de sürtünme etkilerini azaltmak için basınç çubuğu ve numune arasındaki bölgesel uyumsuzluk minimize edilmelidir. Bu sebepten numune uzunluğu L_S ve numune çapı D_S arasındaki oran L_S/D_S yaklaşık olarak 0,5 ile 1,0 arasında tutulur. Basınç çubuğunun çapını göz önünde bulundurarak numune boyutu kolayca hesaplanabilir. [2].

$$\sigma^c_s(t) = \sigma^M_s(t) + \rho_s \left[\left(\frac{L_s^2}{6} \right) - \left(\frac{v_s D_s^2}{8} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(t)}{\partial t^2} \right) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de s indisi numuneyi, σ^c_s ve σ^M_s düzeltilen ve ölçülen numune gerilmelerini ifade etmektedir. L, v , ε , ρ ve D_s terimleri ise sırasıyla numune uzunluğunu, poisson oranını, şekil değiştirme miktarını, yoğunluğu ve numunenin çapını ifade etmektedir. Denklemdeki ikinci terim ortalama numune gerilmesini de içeren bir düzeltme terimidir. Deformasyon hızı sabit olduğunda düzeltme terimi sıfır olacaktır. Sonuç olarak minimum atalet etkisi için optimum L_s/D_s oranı denklem 4.2’deki gibi olur.

$$\frac{L_s}{D_s} = \sqrt{\frac{3v_s}{4}} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de v_s numunenin poisson oranıdır. Metallerin poisson oranı 0,33 (elastik deformasyon) ve 0,50 (büyük plastik deformasyon) değerleri arasında değişmektedir. Atalet etkisini azaltmak için kullanılan bu oran sürtünme etkisini gidermek için uygun olmadığı belirlenmiştir. Fakat Gray, numune boyutlarının $0,5 < L_s/D_s < 1,0$ değerleri arasında olması durumunda atalet ve sürtünme etkisi arasında bir uygun değer sağlandığını belirtmiştir [2,5, 11].

5. PHBÇ DENEY DÜZENEĞİNDE MALZEME UYGULAMALARI VE DENEYLER

5.1 Malzeme Türüne Göre Deney Tasarımı

PHBÇ deney düzeneğinde bazı değişiklikler yaparak seramik, polimer, metal ve kompozit gibi birçok malzeme türünü test etmek mümkündür. Seramikler gibi sert malzemelerin test edilebilmesi için çelik çubukların uçlarına her iki malzemeden daha sert bir ara malzeme eklenir. Polimer, kauçuk gibi yumuşak malzemelerde ise ortaya çıkan düşük dalga hızı yayılımı, zayıf gerilme dalgası sinyali elde edilmesine neden olur. Bu tür malzemelerde daha iyi gerilme dalgası sinyali elde etmek için basınç çubuğu olarak alüminyum, magnezyum, titanyum gibi basma çubuğu malzemeleri tercih edilmektedir. [1,5,13].

Metalik malzemelerde yüksek deformasyon hızı, plastik bölgede meydana gelen deformasyon hızını ifade etmektedir. Yüksek deformasyon hızına maruz kalan bu tür malzemelerde oluşan dislokasyonlar ilerlemek için yeterli zamana sahip olamadığından, malzemelerin akma dayanımlarında artış meydana gelir. Bu durum malzemede deformasyon oluşturabilmek için daha yüksek gerilmelerin uygulanması gerektiğini göstermektedir [13].

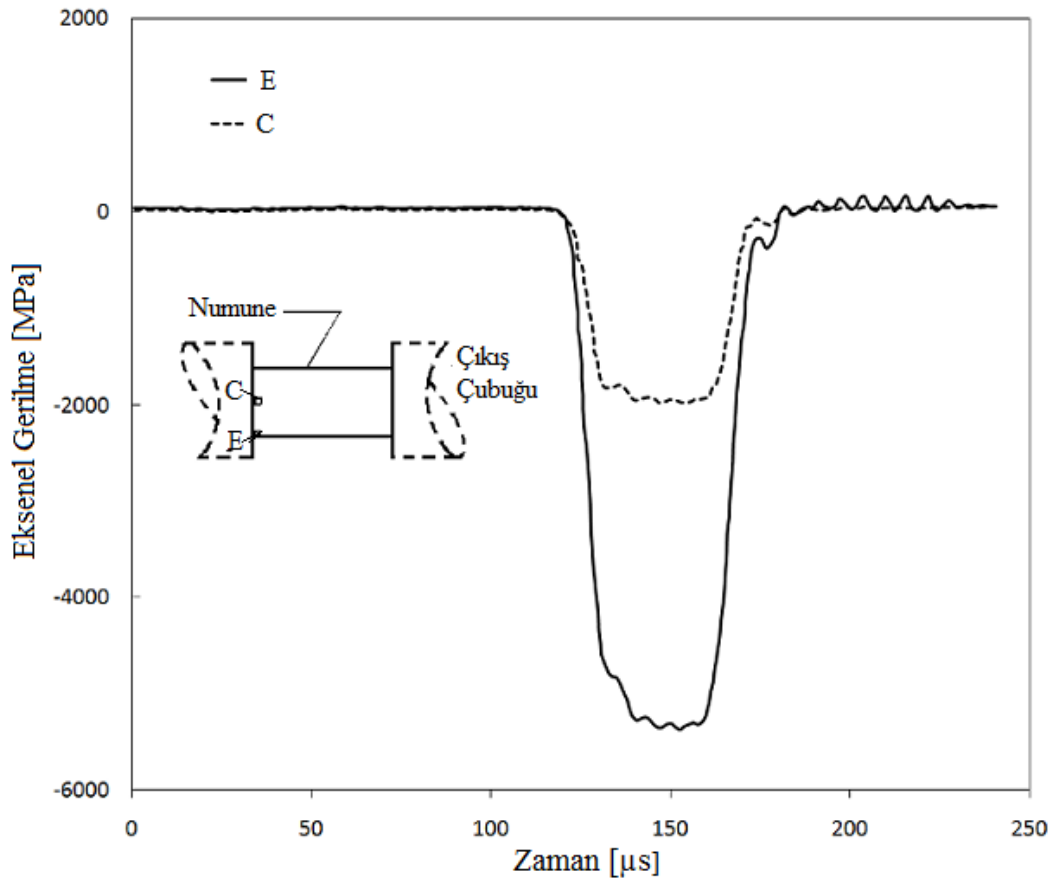
Elastik bölgede meydana gelen deformasyon ise oldukça az olduğundan ve deformasyon hızı bu bölgede düşük olduğundan PHBÇ deney düzeneğinde elastisite modülünü belirleme işlemi zorlaşmaktadır. Birçok alaşım üzerinde yapılan deneylerde elastik modülün deformasyon hızına bağlı olmadığı belirtilmiştir. Ancak şekil hafızalı alaşımlar gibi bazı malzemelerde durum farklıdır. Bu tür malzemelerin elastik tepkileri deformasyon hızı değişiminden hassas bir şekilde etkilenmektedir [1,2,5].

5.1.1 Sert malzemelerde PHBÇ testi

Seramik, cam, taş, beton, tuğla, kemik gibi birçok sert malzemede kırılma gerçekleşinceye kadar görülen deformasyon miktarı %1 veya daha azdır. Bu tür

malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde, kırılma gerçeğleşinceye kadar küçük deformasyonlara tekabül eden lineer elastik davranış görölür. Az miktarda meydana gelen bu deformasyonu ölçmek zordur. Sert malzemeler, sünek malzemeler gibi bölgesel olarak akma göstermez. Dolayısıyla gerilme konsantrasyonu oluşumu ile kırılma gerçeğleşir. Numune üzerinde gerilme konsantrasyonunun fazla olduğu bölgelerde çatlak ilerleyişi artar ve hızlı bir şekilde kırılma meydana gelir. Dolayısıyla PHBÇ deney düzeneğinde seramik malzemeleri test etmek için gerilme konsantrasyonu oluşumunu engellemek gerekir. Bunun için aşağıdaki üç durum göz önünde bulundurulmalıdır.

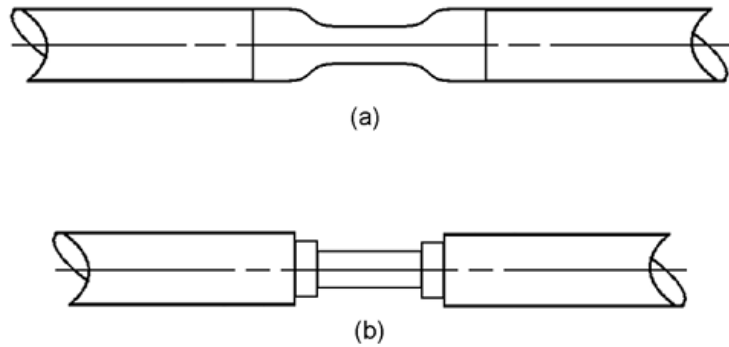
- Numunenin yüke maruz kalan yüzeyleri paralel olmalıdır.
- Çelik çubuklar hassas ve doğru bir şekilde hizalanmalıdır.
- Numune ve çelik çubuk arasına tungsten karbür veya alüminyum nitrat gibi daha sert bir malzeme yerleştirilerek numune üzerinde muhtemel gerilme konsantrasyonu oluşumu engellenmelidir.



Şekil 5.1 : AlN numunesinin kenarlarında oluşan gerilme konsantrasyonu [1].

Şekil 5.1’de PHBÇ deney düzeneğinde test edilen alüminyum nitrat (AlN) numunesine ait veriler gösterilmektedir. Numunenin köşesinde biriken gerilme, merkezdeki gerilmenin %270’i kadardır. Çelik çubuklar arasına yerleştirilecek numunenin çapı, çelik çubukların çapından az olmamalıdır. Aksi takdirde gerilme konsantrasyonu oluşur. Gerilme konsantrasyonunu minimum hale getirmek için numune iki şekilde çubuklar arasına yerleştirilebilir. Bunlar;

- Numuneye köpek kemiği şeklini vermek (Şekil 5.2a)
- Numuneyi daha sert malzemedan yapılmış iki ara malzemenin arasına sıkıştırmak. (Şekil 5.2b)



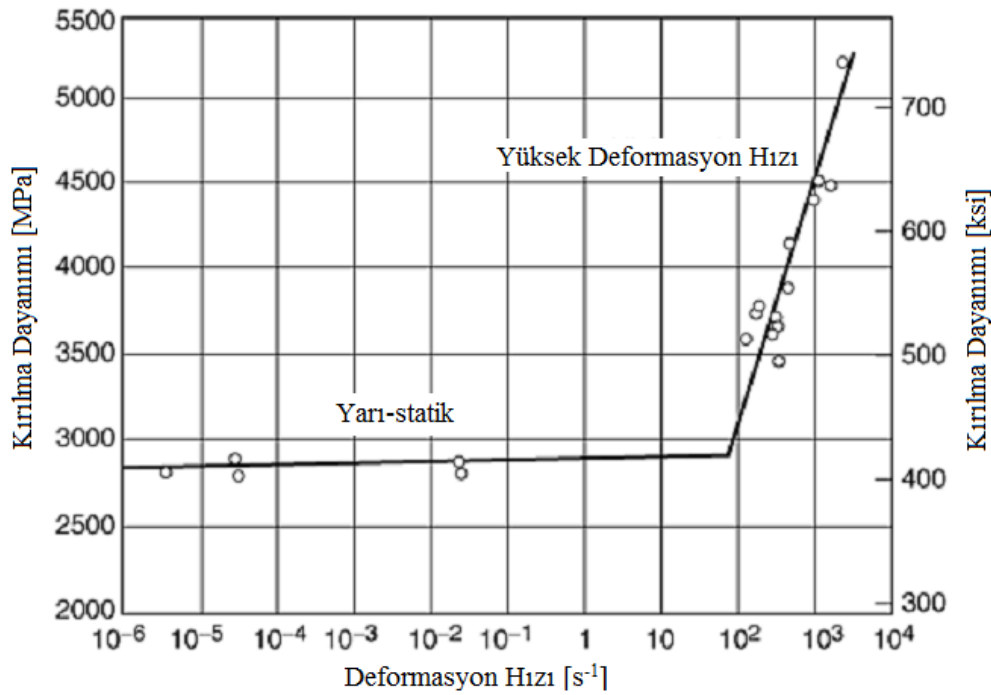
Şekil 5.2 : Sert numunelerin numune-çubuk ara yüzeyine yerleştirilme şekilleri [1].

Şekil 5.2’de belirtilen yöntemlerden en yaygın olarak kullanılan numunenin daha sert iki ara malzeme arasına yerleştirildiği şekil 5.2b seçeneğidir. Şekil 5.2a’daki gibi bir numune şekli elde etmek ekonomik açıdan maliyetlidir. Seramik numunelerin L_S/D_S oranı ise 2,0 ile 1,0 arasındadır. Numune uzunluğu deformasyon hızını doğrudan etkilemektedir. Seramik gibi sert malzemelerde genellikle istenen deformasyon hızına ulaşmadan kırılma meydana gelmektedir. Bu durumu engelleyecek şekilde bir kalınlık seçilmelidir [1,5].

PHBÇ deneyinde kullanılan ara malzemelerin cinsini yine numunenin sertliği belirler. Ara malzeme kullanımında tek boyutlu dalga yayılımını göz önünde bulundurarak mekanik empedansa dikkat etmek gerekir. Örneğin ara malzeme olarak kullanılan WC’ün mekanik empedansı çelik çubukların mekanik empedansı ile aynı olmalıdır. Aksi takdirde istenmeyen bir yansıyan gerilme sinyali oluşabilir.

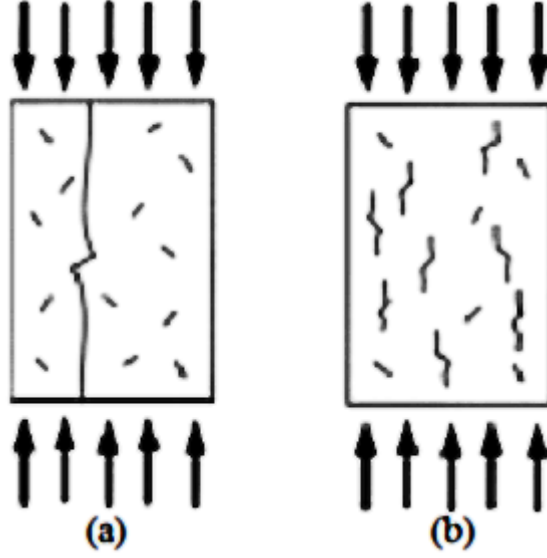
Seramik malzemeler (alümina, silisyum karbür vs.) üzerinde yüksek deformasyon hızlarında yapılan PHBÇ testi sonucu elde edilen kırılma dayanımının, yarı-statik deneylerde elde edilen kırılma dayanımından fazla olduğu görülmüştür. Göze çarpan

diğer bir durumsa numune üzerinde mikroçatlak yoğunluğunun artışıdır. Seramik malzemelerde mikroçatlaklar, inklüzyonlar, tane sınırlarındaki empüriteler ve ikinci fazlar gibi mikroyapısal homojensizliklerden dolayı çekirdeklenme başlar ve seramik malzemelerin kırılmasına neden olur. Deformasyon hızının 100 1/s'den küçük olduğu durumlarda sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş malzemelerde deformasyon hızından etkilenen bir kırılma gözlenmez. Bu durumda kararsız çatlak büyümesi ile kırılma gerçekleşir. Ancak yüksek deformasyon hızlarında çatlağın oluşup ilerleyebilecek yeterli zamanı olmaz. Dolayısıyla daha yüksek gerilmelerde kırılma gerçekleşir. Bir başka deyişle kırılma dayanımında artış meydana gelir [1,13,5].



Şekil 5.3 : AlN seramik numunesinde deformasyon hızına bağlı olarak kırılma dayanımında meydana gelen değişim [5].

Dinamik ve yarı-statik yükler altında oluşan çatlak ilerleyişi arasındaki fark Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Deformasyon hızı arttıkça çatlağın büyümesi için gerekli enerji sağlanmaya devam eder ve aynı anda birçok çatlak bu enerjiden beslenir. Yarı-statik yükler altında ise numune tek bir çatlağın ilerlemesiyle kırılabilir. Çünkü çatlağın ilerleyişi için yeterli zaman ve enerji vardır [1,13,5].



Şekil 5.4 : Yarı-Statik (a) ve (b) dinamik basma yükleri altında meydana gelen çatlak ilerleyişi [5].

5.1.2 Yumuşak malzemelerde PHBÇ testi

Polimer, kauçuk, köpük gibi yumuşak malzemeler PHBÇ deney düzeneğinde test edilirken, düşük elastisite modülüne sahip çubuk malzemeleri tercih edilmektedir. Düşük elastisite modülüne sahip çubukların kullanımı ile strain gage ölçümlerinin sinyal/gürültü seviyesinin arttığı tespit edilmiştir. Bu tür çubuklar yumuşak malzemelerde istenen yüksek çözünürlüklü PHBÇ testinin yapımını kolaylaştırmıştır. Tablo 5.1’de çubuk malzemelerinin elastisite modülleri verilmiştir. Alüminyum, magnezyum, titanyum gibi malzemelerin çelik basma çubukları yerine kullanılmasıyla düşük dalga hızı yayılımı sorunu çözülmüş ve daha doğru geçen gerilme dalgası sinyalleri elde edilmiştir. [1,4,5].

Çizelge 5.1 : PHBÇ basma çubuğu malzemelerinin karşılaştırılması [5].

Çubuk Malzemesi	Elastisite Modülü (E)		Dalga empedansı (ρ/C_0) km.g/s.cm ³	Çeliğe göre Empedans (ρ/C_0)x / $(\rho/C_0)_{\text{çelik}}$,%
	GPa	10 ⁶ ksi		
Çelik	212	31	40,8	100
Ti-6Al-4V	115	17	22,8	56
Alüminyum	90	13	13,5	33
Magnezyum	45	7	8,6	21
Polimetil Metakrilat (PMMA)	4	1	2,2	5

PMMA polimeri de elik basma çubukları yerine kullanılmıřtır. Ancak dūřuk empedanslı diđer metal malzemelerden daha karmařık sonuçlar elde edildiđinden çok tercih edilmemektedir. Yumuřak malzemelerde gerilme dalgasının yayılımı çok yavařtır. Gerilme dalgasının yayılım sūresi azaltmak için daha ince numune kullanılır. Ayrıca kalınlık arttıa gerilme dalgası numune tarafından sūnūmlenir. Sūnūmlenme etkisini minimize etmek ve gerilme dalgasının yayılım sūresini kısaltmak için numuneye ait L_s/D_s 0,25-0,50 oranı aralıđında olmalıdır [1,4,5].

Yumuřak malzemelerden elde edilen geçen dalga sinyalleri zayıf olduđundan kuvars kuvvet sensūru kullanılmaktadır. Būylece numunenin basınç çubukları ile temas eden her iki yūzeyine kuvvet sensūru yerleřtirilerek dinamik gerilme veya kuvvet hassas olarak olūlebilir.

5.2 Parçalı Hopkinson Basma Deneyi Uygulaması

Parçalı Hopkinson Basma ubuđu deney dūzeneđinde yūksək deformasyon hızları altında 6063 alūminyum ve C377 pirinç numuneleri test edilmiřtir. Ayrıca bu malzemelere dūřuk deformasyon hızında basma deneyi de uygulanmıřtır. Būylece yūksək ve dūřuk deformasyon hızları altında meydana gelen mekanik özellikler karřılařtırılmıřtır.



řekil 5.5 : Özel tasarım servo hidrolik dinamik ūniversal test cihazı ve veri toplama sisteminin genel gūrūnūmū.

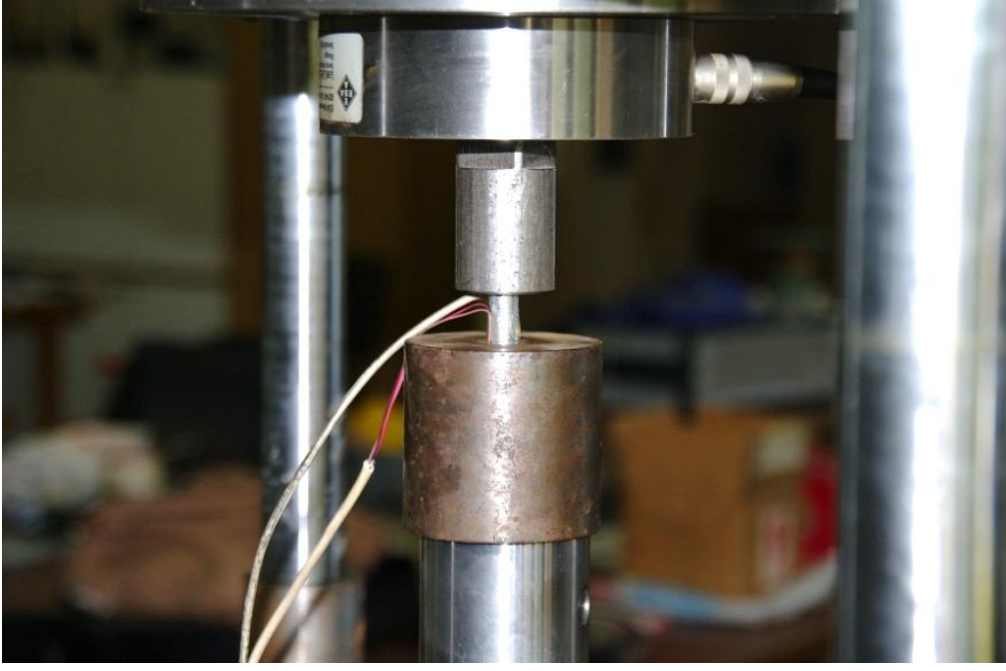
5.2.1 Düşük deformasyon hızında basma deneyi

Düşük deformasyon hızında uygulanan basma deneyi İTÜ Makine Fakültesi Mukavemet Laboratuvarında bulunan özel tasarım servo hidrolik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma testi uygulandığı alüminyum ve pirinç numunelerinin boyları eşittir. Numunelerin çapları (D_S) 10 mm ve numune uzunlukları (L_S) 25 mm'dir. Numunelerin üzerinde basma eksenine paralel olarak yerleştirilmiş iki strain gage bulunmaktadır. Strain gage'ler sayesinde numuneler üzerinde meydana gelen şekil değiştirme ölçülerek kaydedilmiştir.

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi numune iki çene arasına sabit bir şekilde yerleştirilmiştir. Statik basma deneyinde uygulanan deformasyon hızı alüminyum ve pirinç numuneleri için sırasıyla $0,00024 \text{ s}^{-1}$ ve $0,00022 \text{ s}^{-1}$ 'dir. Basma deneyi sırasında strain gage'lerin yanı sıra deplasman ölçer de kullanılmıştır. Ancak deplasman ölçer tarafından elde edilen deformasyon verileri strain gage'ler kadar hassas ve doğru olamamıştır.



Şekil 5.6: Basma deneyi sırasında iki çene arasına yerleştirilen numuneden görünüm.



Şekil 5.7 : Alüminyum numune üzerine paralel olarak yerleştirilmiş iki strain gage'in görünümü.

5.2.1.1 Basma deneyi sonuçları ve değerlendirme

Basma deneyinde birim zamanda ölçülen kuvvet verisinin, numunenin kesit alanına oranı ile gerilme değeri elde edilmiştir. Denklem 5.1'de F , A_0 , σ değerleri sırasıyla kuvvet, numunenin kesit alanı ve gerilmeyi ifade etmektedir.

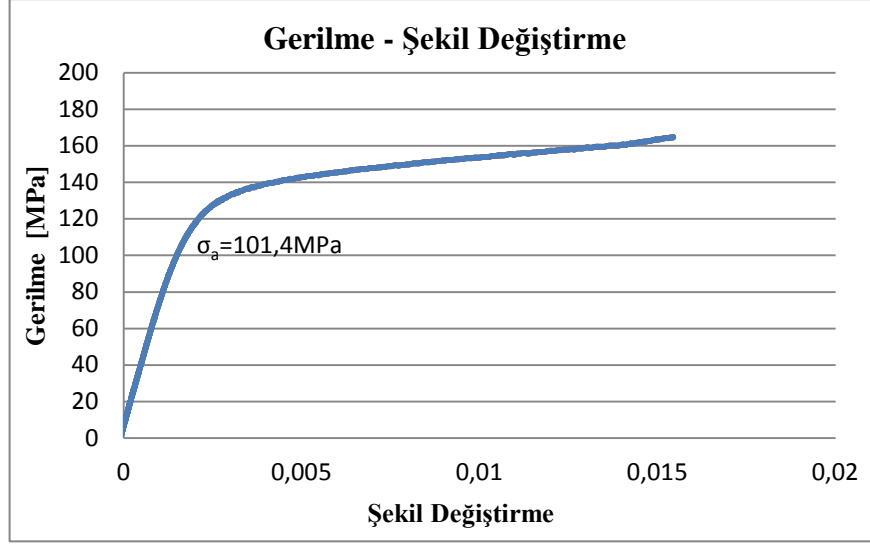
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

Hooke kanunu Denklem 5.2'de belirtilmiştir. σ , ϵ ve E değerleri sırasıyla gerilme, şekil değiştirme (deformasyon) ve elastisite modülünü ifade etmektedir. Hesaplanan gerilme ve deformasyon değerleri Denklem 5.2'te kullanarak numunelerin elastisite modüllerine ulaşılmıştır.

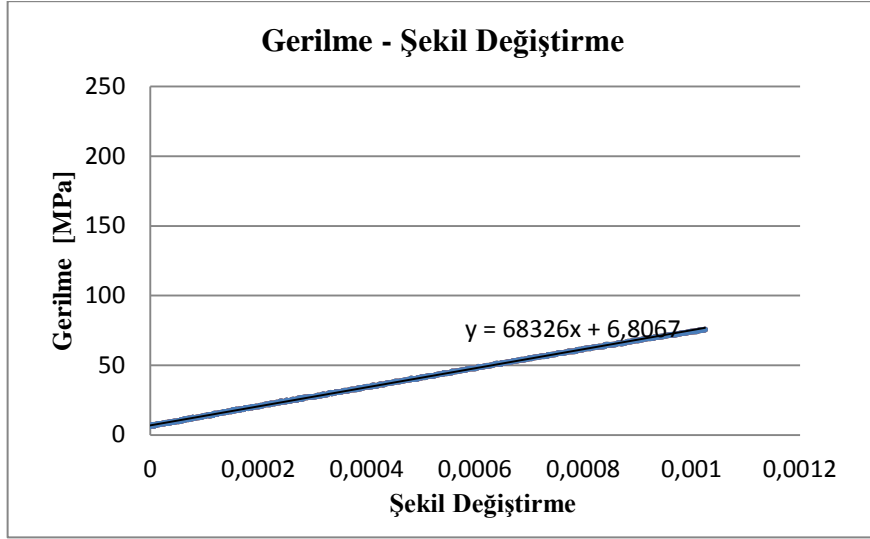
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5.2)$$

Gerçek deformasyon hızı birim zamanda meydana gelen deformasyonu miktarını ifade etmektedir. Denklem 5.3'de $\dot{\epsilon}$, ϵ ve t değerleri sırasıyla deformasyon hızı, deformasyon miktarı ve zamanı belirtir.

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt \quad (5.3)$$

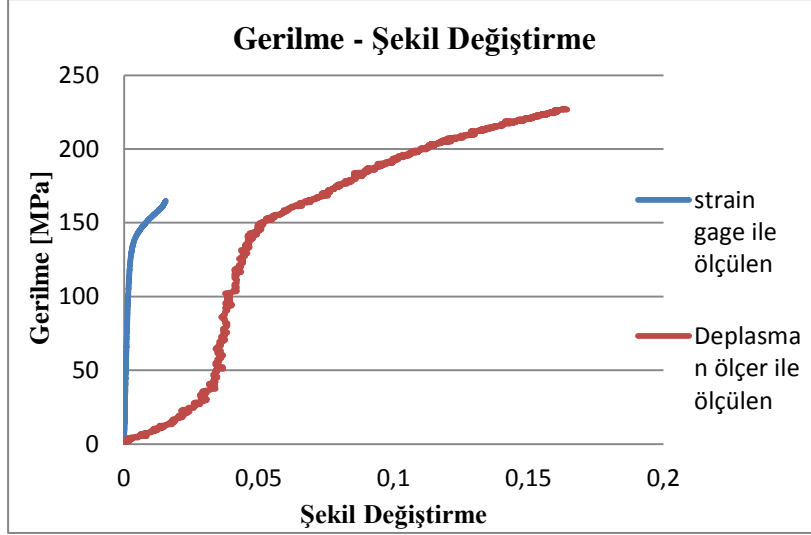


Şekil 5.8 : Alüminyumun gerilme-şekil değişirme grafiği.



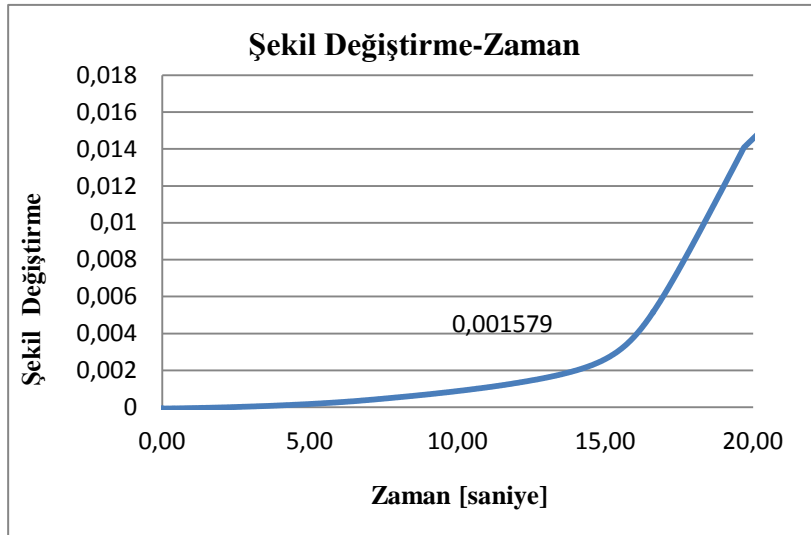
Şekil 5.9 : Alüminyum gerilme-şekil değişirme grafiğinde elastisite modülünün elde edilmesi.

Basma deneyi sonucu alüminyumdan elde edilen gerilme-şekil değişirme grafiği Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Alüminyumun gerilme-şekil değişirme grafiğindeki lineer bölgenin eğiminin hesaplanmasıyla elde edilen elastisite modülü ise 68,3 GPa'dır ve Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Alüminyumun akma dayanımı ise 101,4 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminyumun deformasyon miktarının tespiti için strain gage ve deplasman ölçer kullanılmıştır. Şekil 5.10'da strain gage'ler ve deplasman ölçerden elde edilen veriler sonrası oluşturulan gerilme-şekil değişirme eğrileri tek bir grafikte toplanmıştır. İki eğri arasındaki fark oldukça belirgindir.

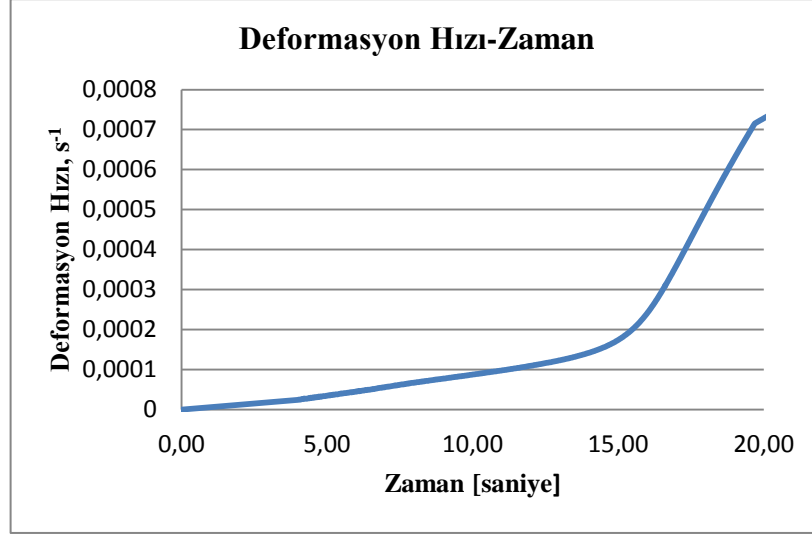


Şekil 5.10 : Alüminyuma ait deplasman ölçer ve strain gage grafiklerinin kıyaslaması.

Strain gage'ler ile elde edilen gerilme-şekil değişirme eğrisinde akma dayanımı %0,2 deformasyondan daha düşük deformasyonda ölçülebilirken, deplasman ölçer ile bu mümkün olamamıştır. Deplasman ölçer ile elde edilen gerilme-şekil değişirme eğrisinde akma 0,015 deformasyonda başlamaktadır. Standart basma veya çekme deneyinde alüminyum maksimum 0,002 deformasyonda akmaya başladığından deplasman ölçer ile elde edilen veriler doğru değildir.



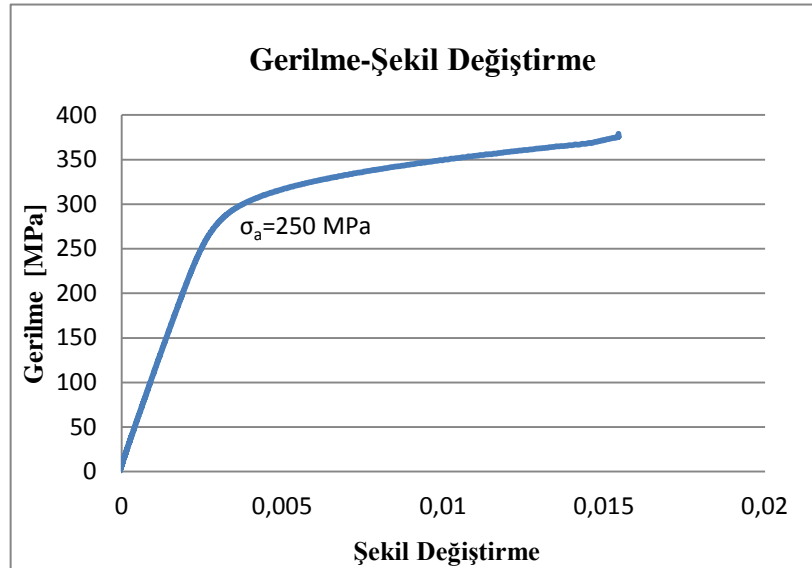
Şekil 5.11 : Alüminyum deformasyon-zaman grafiği.



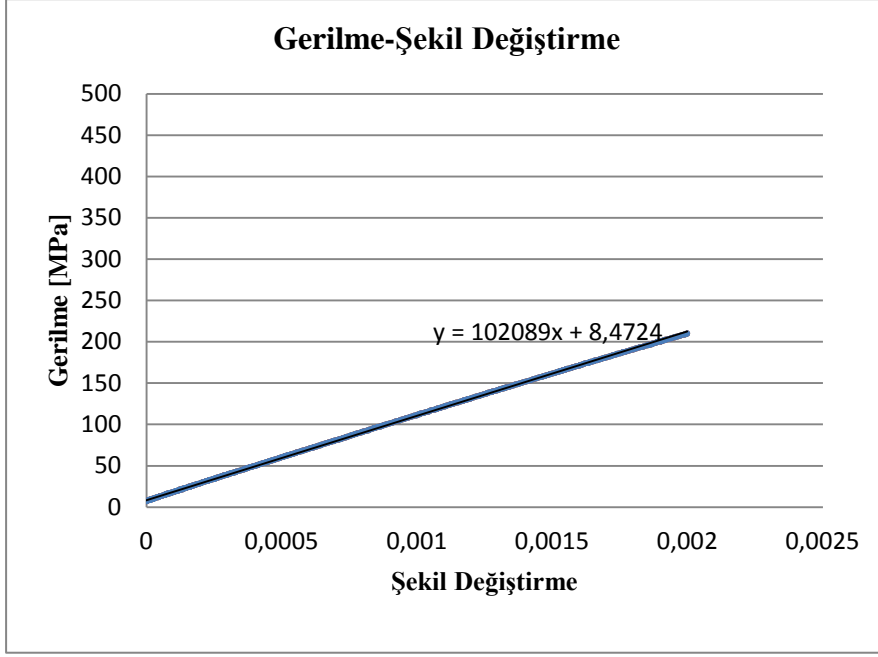
Şekil 5.12 : Alüminyum deformasyon hızı-zaman grafiği.

Alüminyumun plastik şekil değiştirmeye başladıktan kısa bir süre sonra deney sona erdirilmiştir. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi numunede yaklaşık % 1,5 kadar deformasyon meydana gelmiştir. Deney başladıktan yaklaşık 13 saniye sonra numune plastik şekil değiştirmeye başlamıştır ve bu ana kadar 0,001579 deformasyon göstermiştir. Basma deneyinde alüminyumun maruz kaldığı deformasyon hızı $0,00024 \text{ s}^{-1}$ ’dir.

Düşük deformasyon hızında basma deneyi pirinç üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Pirinç’e $0,00022 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında basma deneyi uygulanmıştır.

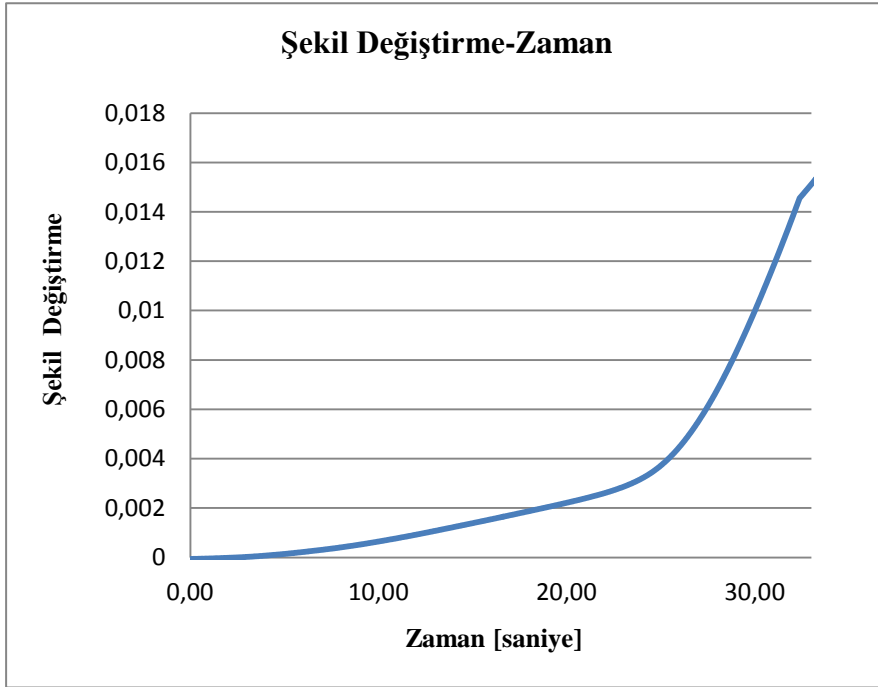


Şekil 5.13 : Pirinç’e ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

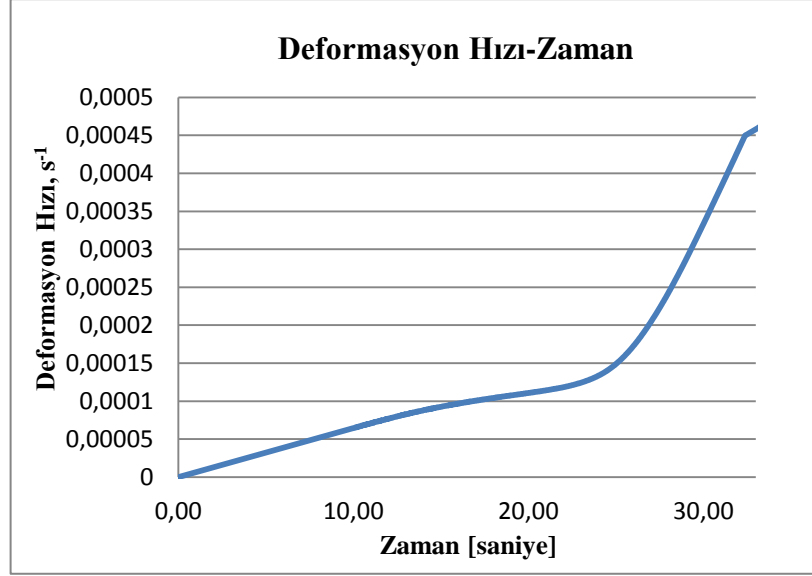


Şekil 5.14 : Pirinç gerilme-deformasyon grafiğinde elastisite modülünün elde edilmesi.

Basma deneyi sonucu pirinç'ten elde edilen gerilme-şekil değişirme eğrisi Şekil 5.13'deki gibidir. Pirincin akma dayanımı 250 MPa'dır. Lineer elastik bölgenin eğiminden hesaplanan elastisite modülü ise 102 GPa'dır. Pirinç üzerine, basma eksenlerine paralel olarak yerleştirilen iki strain gage ile deformasyon ölçülmüştür.

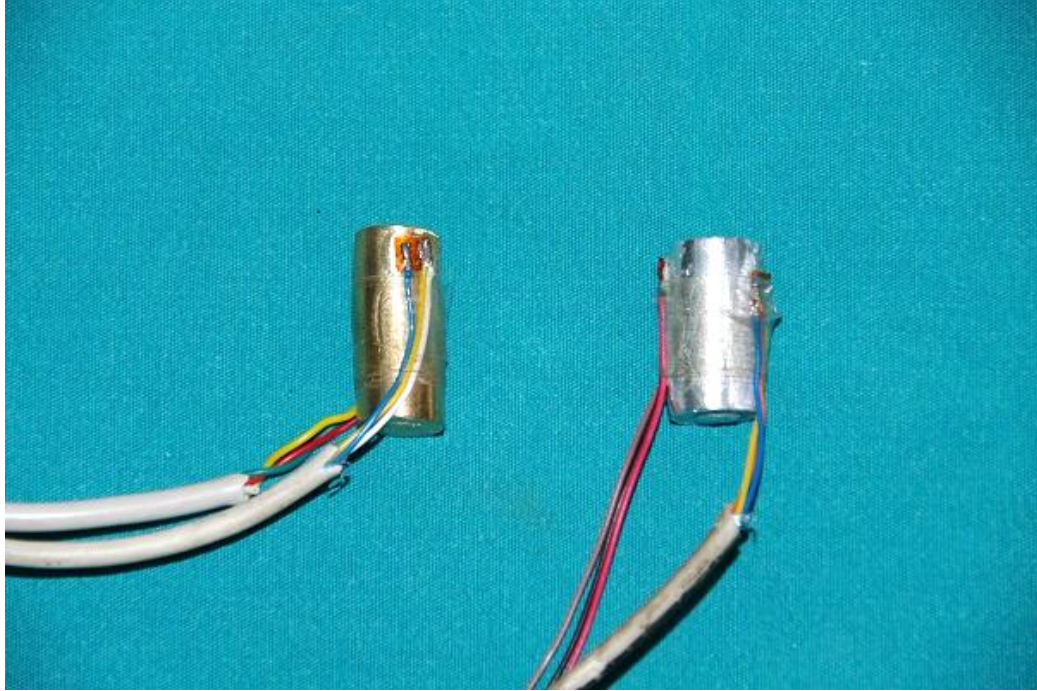


Şekil 5.15 : Pirinç'e ait deformasyon-zaman grafiği.



Şekil 5.16 : Pirinç'e ait deformasyon hızı-zaman grafiği.

Pirinç, deney başladıktan yaklaşık olarak 23 saniye sonra plastik deformasyon göstermeye başlamıştır ve bu anda %0,29 oranında deformasyon göstermiştir.



Şekil 5.17 : Düşük deformasyon hızında yapılan basma deneyi sonrası pirinç ve alüminyumun numunelerinin görünümü.

5.2.2 Parçalı hopkinson basma çubuğu deneyi

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği ile farklı boyutlardaki alüminyum ve pirinç numuneleri yüksek deformasyon hızları altında test edilmiştir. Numuneler çelik çubukların arasına yerleştirildikten sonra gaz tabancası ile yükleme işlemi

gerçekleştirilmiştir. Çelik çubukların türü 55Cr3 yay çeliği olup iki çelik çubuğun uzunluğu eşit ve 1,5 m'dir. Her iki çelik çubuğun üzerinde strain gage'ler yerleştirilmiştir. Strain gage'lerden elde edilen veriler bir veri toplama sistemi tarafından kaydedilmiştir.

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0\varepsilon_R(t)}{L} \quad (3.46a)$$

$$\varepsilon_s = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t)dt \quad (3.46b)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_B}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (3.46c)$$

Strain gage'lerden elde edilen veriler Denklem 3.46a, 3.46b ve 3.46c kullanılarak işlendikten sonra numuneye ait gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon hızı değerlerine ulaşılmıştır. Yay çeliğinin dalga hızını belirten C_0 değeri, 5000,3 m/s olarak ölçülmüştür.

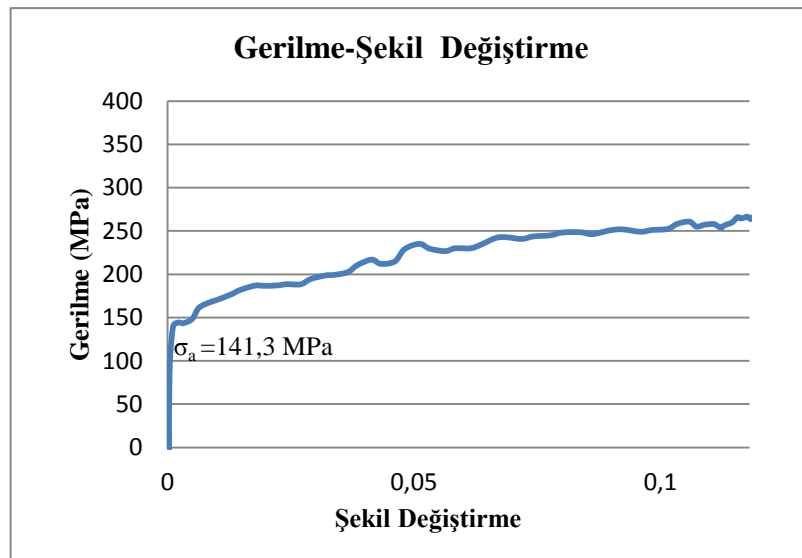
Giriş çubuğunun darbe uygulanan uç kısmına sinyal şekillendirici olarak gazoz kapağı şeklinde bir bakır yerleştirilmiştir. Ancak bu şekilde bakır sabit olarak durmadığından, artan darbe şiddetiyle yüzey düzgünlüğünü kaybettiği görülmüştür. Sinyal şekillendiricinin geometrik şekli değiştirilerek aynı kalınlıkta bakır diskler kullanılmıştır. Gaz tabancasından fırlatılan mermi, ilk olarak giriş çubuğu ucunda bulunan bakır diski deformasyona uğratmıştır. Darbe etkisiyle çelik çubuklar üzerinde oluşan gerilme dalgası numune üzerinden geçerek numune deformasyonu gerçekleşmiştir. Numune deformasyon gerçekleştikten sonra, deney düzeneğinin sonunda bulunan sönümleyici sistem ile kalan darbe enerjisi giderilmiştir.

Çizelge 5.2 : Alüminyum ve pirinç numunelerinin boyutları

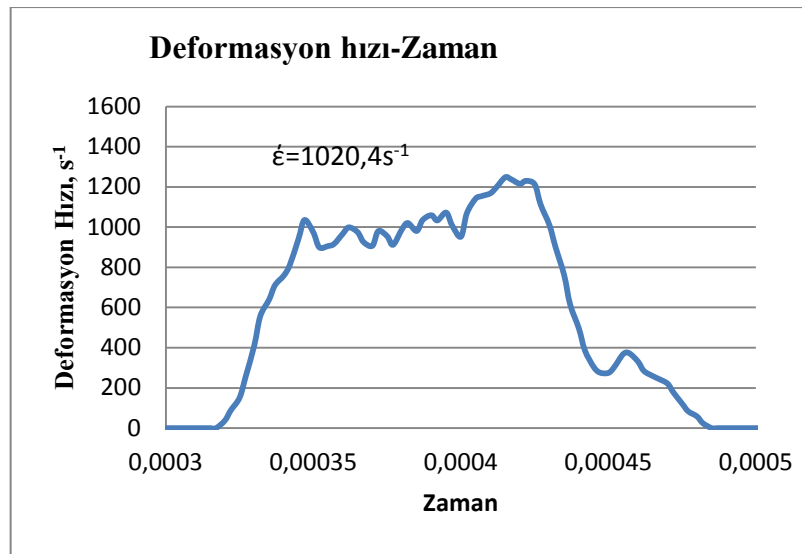
Numune Türü	Numune Tipi	Çap (D)	Uzunluk (L)
6063 Alüminyum	E1	15 mm	10 mm
6063 Alüminyum	E2	10 mm	6 mm
C377 Pirinç	E3	10 mm	6 mm

5.2.2.1 Hopkinson Basınç Çubuğu Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere numuneler boyutlarına göre E1, E2, ve E3 olacak şekilde isimlendirilmiştir. Deformasyon hızındaki artış ve azalma ile numunenin akma gerilmesinde ve deformasyon miktarında meydana gelen değişiklikler gözlenmiştir. Düşük deformasyon hızlarında elde edilen akma gerilmesi ile yüksek deformasyon hızında elde edilen akma gerilmesi kıyaslanmıştır. Gaz tabancasındaki hava basıncının artırılması ile merminin hızı arttırılmıştır. Şekil 5.18’de 1020 s^{-1} deformasyon hızında test edilen E2 tip numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği gösterilmektedir.

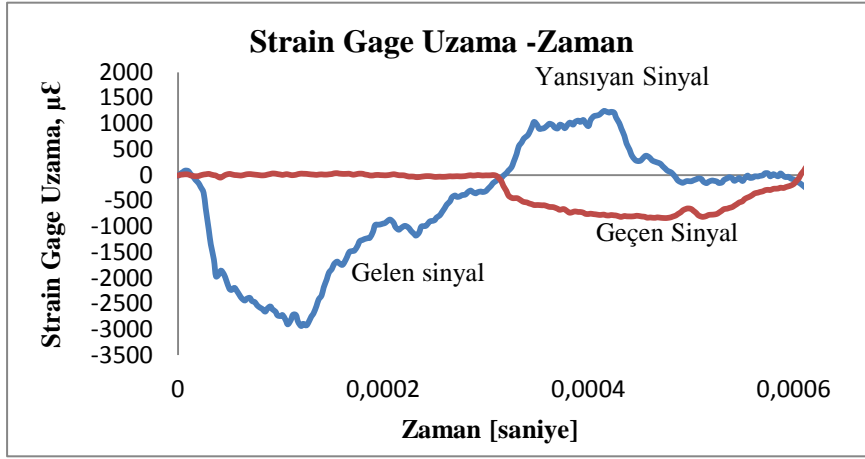


Şekil 5.18 : E2 tipi numuneye ait gerilme-şekil değişimi grafiği.



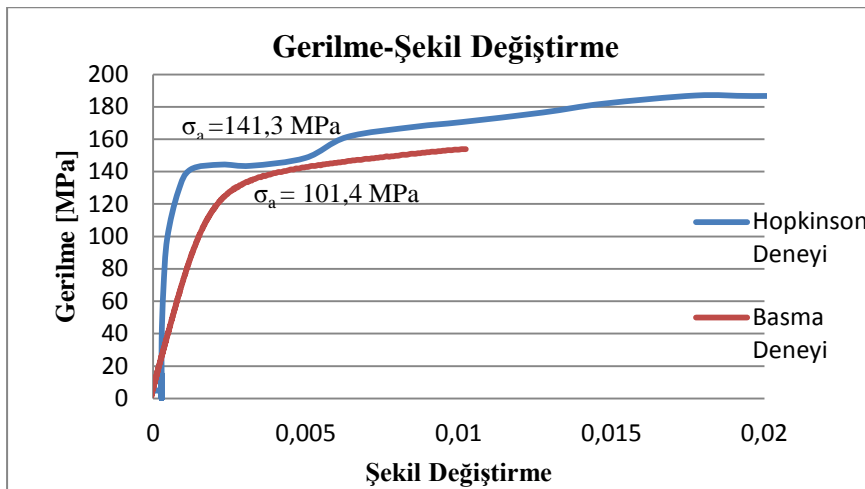
Şekil 5.19 : E2 tipi numuneye ait deformasyon hızı- zaman grafiği.

Giriş çubuğuna darbe uygulandıktan sonra oluşan gelen gerilme dalgasının bir kısmı, çubuk-numune ara yüzeyinden empedans uyumsuzluğundan dolayı geri yansır. Ara yüzeyden geri yansıyan dalganın neden olduğu deformasyon ϵ_R , Denklem 5.4a ve Denklem 5.4b'de görüldüğü gibi numunede meydana gelen deformasyon miktarına ve deformasyon hızına ulaşmamızı sağlamıştır. Gelen gerilme dalgasının diğer kısmı ise numune üzerinden geçer. Numune-çubuk ara yüzeyinden geçen dalga sonucu oluşan deformasyon ϵ_T sayesinde numune üzerindeki gerilme hesaplanmıştır.



Şekil 5.20 : E1 tipi numuneye ait strain gage uzama-zaman grafiği.

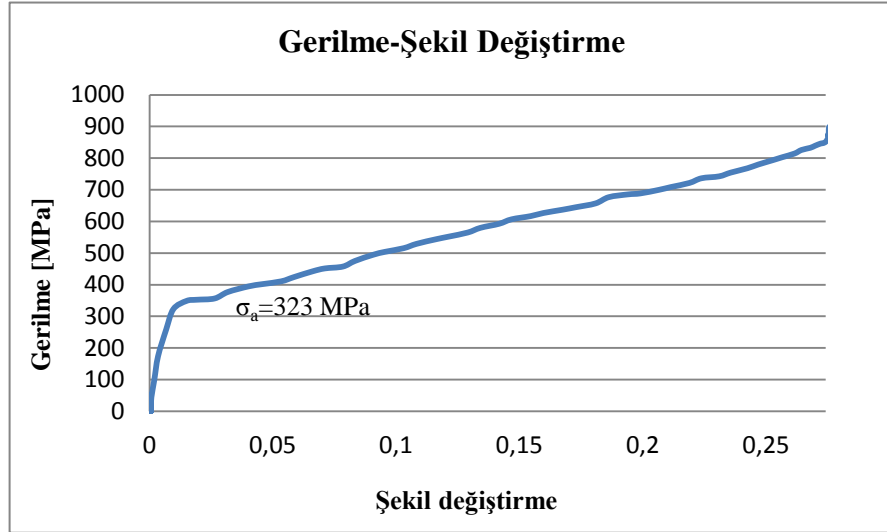
Şekil 5.20'de gelen, yansıyan ve geçen gerilme dalgalarına ait sinyaller gösterilmektedir. Yansıyan sinyal, gelen ve geçen sinyallere göre ters yönde ilerlemektedir. Grafikteki eksi (-) strain gage uzama değerlerinin yönünü ifade etmektedir. E2 tipi numunenin Hopkinson deney düzeneğinde test edilmesi yaklaşık olarak 50 mikrosaniye sürmüştür.



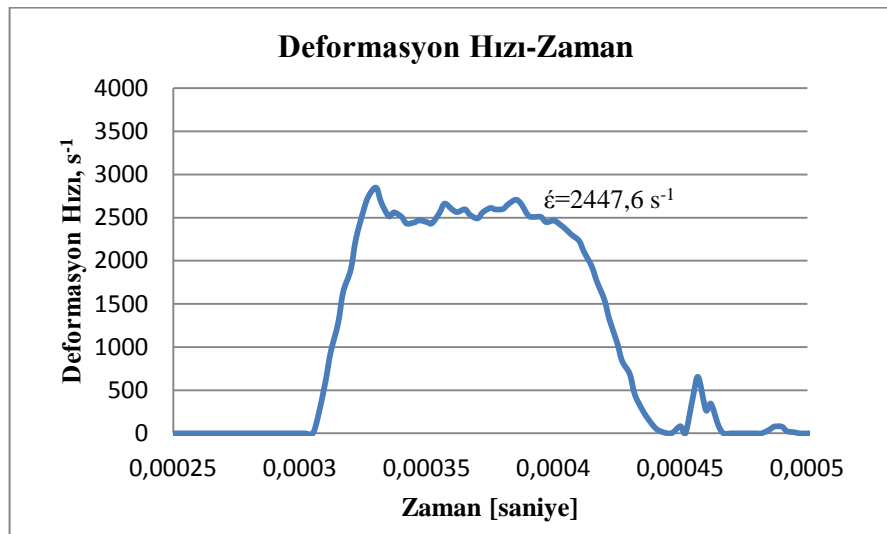
Şekil 5.21 : 6063 Alüminyumun düşük ve yüksek deformasyon hızları altında elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.21’de E2 tipi alüminyum numunenin $1020,4 \text{ s}^{-1}$ ve $0,00024 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri kıyaslanmıştır. Alüminyum 1020 s^{-1} deformasyon hızında $141,3 \text{ MPa}$ akma göstermeye başlarken, $0,000341 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında 101 MPa akma göstermeye başlamıştır. Böylece deformasyon hızının artmasıyla akma gerilmesinin arttığı tespit edilmiştir.

Denklem 3.46a, deformasyon hızının numunenin uzunluğu ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Dolayısıyla numune uzunluğu arttıkça numunenin birim zamandaki deformasyon miktarı azalmaktadır. Gaz tabancasına rezervuarına beslenen hava basıncının artışı merminin daha yüksek hızlarda fırlatılmasına neden olmaktadır. Mermi hızı arttıkça, giriş çubuğuna daha yüksek şiddette darbe uygulanmaktadır.

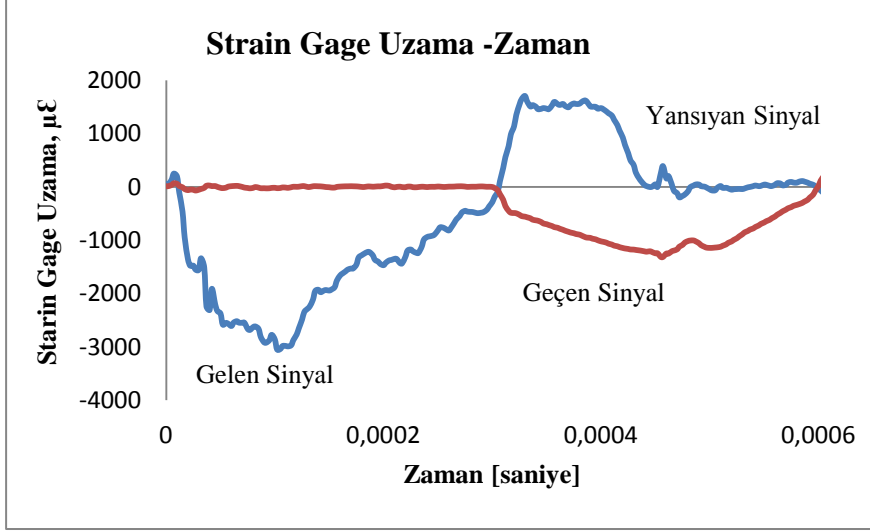


Şekil 5.22 : E4 tipi numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



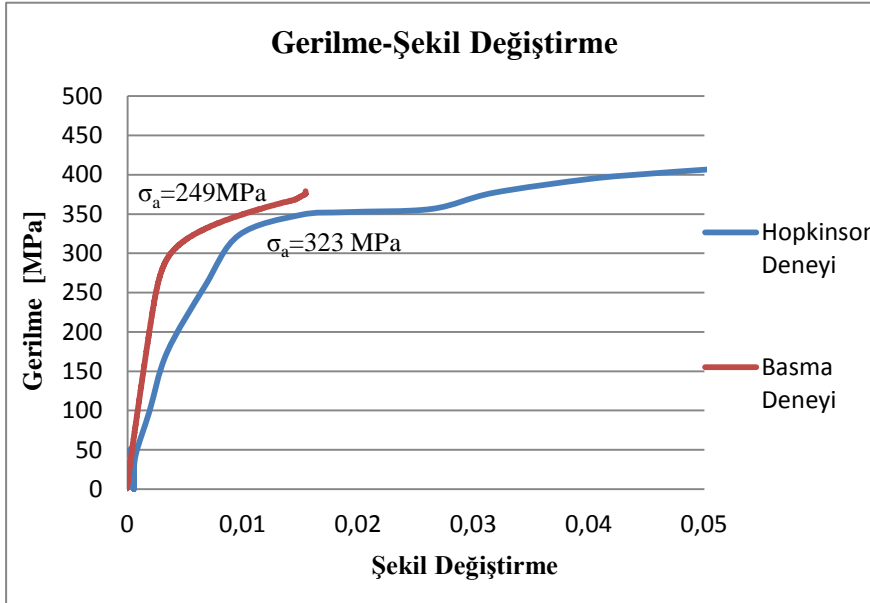
Şekil 5.23 : E4 tipi numuneye ait deformasyon hızı-zaman grafiği.

Pirinç 2447 s⁻¹ deformasyon hızında test edilmiştir. Düşük deformasyon hızında yapılan basma deneyinde 0,00022 s⁻¹ değerinde bir deformasyon hızına ulaşılmıştır. Deformasyon hızları arasındaki fark oldukça belirgindir.



Şekil 5.24 : E4 tipi numuneye ait strain gage uzama-zaman grafiği.

Pirincin deney süresi yaklaşık olarak 60 mikrosaniyedir. Alüminyum ile kıyaslandığında bu süre 10 mikrosaniye fazladır. Yayılan gerilme dalgasındaki dispersiyondan dolayı Şekil 5.24'de gelen gerilme sinyalinde salınım oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 5.25 : C377 Pirinç'in düşük ve yüksek deformasyon hızları altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

Deformasyon hızı artışı ile pirinç numunesinde meydana gelen akma gerilmesi artışı Şekil 5.25’de gösterilmektedir. Akma gerilmesindeki farklılığın yanı sıra, numunede akma oluşana kadar meydana gelen deformasyon miktarının da arttığı gözlenmiştir. Düşük deformasyon hızında numunede akma oluşana kadar görülen deformasyon miktarı yaklaşık %0,25 iken, yüksek deformasyon hızında bu oran yaklaşık % 1 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.26 : Farklı basınçlarla fırlatılan merminin E1 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.

Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu deney düzeneğinde gerçekleştirdiğimiz deneylerde 10 bar gibi yüksek basınçlarda çalışmak mümkün olmuştur. Şekil 5.26, ve Şekil 5.27’de gösterilen E1 ve E2 tip alüminyum numunelerinden en solda bulunanlar, deformasyona uğramamış orijinal numunelerdir. Orijinal numunelerden sonra gelen numuneler sırasıyla 2 bar, 4 bar ve 6 bar basınçlarda Hopkinson deney düzeneğinde test edilmiştir. Şekil 5.28’de ise yine en solda orijinal numune görülmekte olup, orijinal numuneden sonra gelen pirinç numuneleri sırasıyla 2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar ve 10 bar basınçlarda Hopkinson deney düzeneğinde test edilmiştir. Gaz tabancasının rezervuarına kompresörden beslenen hava basıncı arttıkça, namludan fırlatılan merminin hızı arttırmıştır. Hızla fırlatılan mermi, basma çubukları üzerinde daha yüksek gerilme dalgası yayılımı oluşturmuştur. Böylece numunede deformasyon miktarında artış meydana gelmiştir. Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de farklı hızlarda fırlatılan merminin numunede meydana getirdiği deformasyon gösterilmektedir.

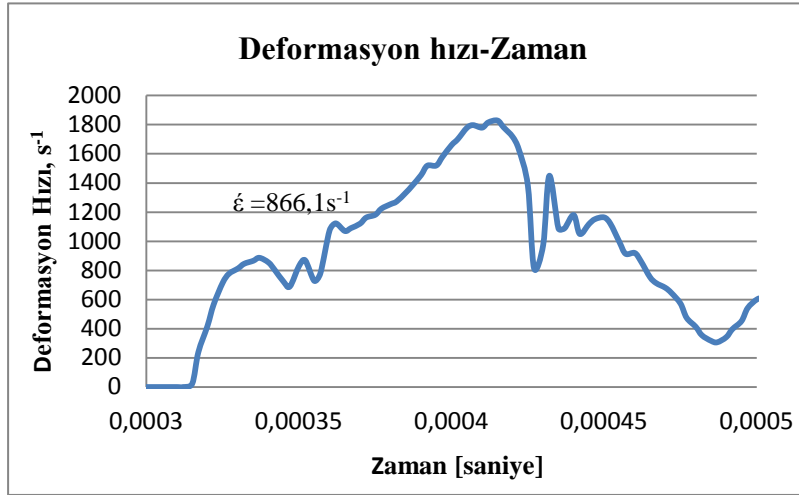


Şekil 5.27 : Farklı hızlarda fırlatılan merminin E2 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.

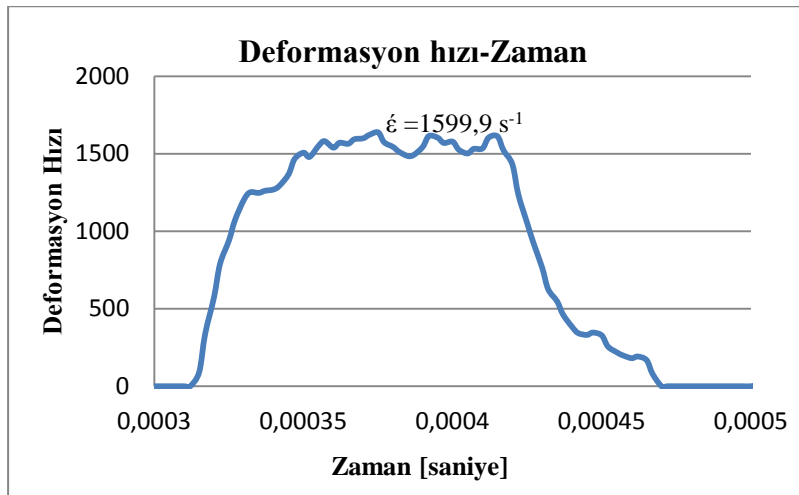


Şekil 5.28 : Farklı hızlarda fırlatılan merminin E3 tipi numunede oluşturduğu deformasyonun görünümü.

Sinyal şekillendirici olarak kullanılan bakır diskin kalınlığı arttıkça numunede oluşan deformasyon hızının azaldığı tespit edilmiştir. E1 tipi numune 6 bar basınçta sırasıyla kalın ve ince bakır diskler ile Hopkinson deney düzeneğinde test edilmiştir. Kalın sinyal şekillendirici ile test edilen numunede daha düşük deformasyon hızı, akma gerilmesi ve daha zayıf gelen sinyal ölçülmüştür.



Şekil 5.29 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta kalın bakır pul ile elde edilen deformasyon hızı-zaman grafiği.



Şekil 5.30 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta ince bakır pul ile elde edilen deformasyon hızı-zaman grafiği.

E1 ve E2 tipi numunelerinin uzunlukları farklıdır. Bu tip numuneler 2 bar basınçta test edildiğinde deformasyon hızlarında belirgin farklılıklar görülmüştür. Uzunluğu 10 mm olan E1 tipi numunede 1059 s^{-1} , 6 mm uzunluğunda olan E2 tipi numunede ise 1998 s^{-1} deformasyon hızı elde edilmiştir. Ancak deformasyon hızındaki artışın sadece uzunluğa bağlı olarak değişmediği tespit edilmiştir. Aynı boyuttaki numuneler 2, 4 ve 6 bar basınçlar ile test edildiğinde yine deformasyon hızında artış meydana geldiği görülmüştür.

Hopkinson deney düzeneğinde gaz tabancasına kompresörden 10 bar basınç beslenmesi sonucu pirinç numunesinde kırılma meydana gelmiştir. Bu basınçta numune maruz kaldığı yüksek gerilme karşısında daha fazla deformasyona göstermeden kırılmıştır. Ayrıca 6 bar basınçta numune farklı bir şekilde kenarlarından deforme olmuştur. Numunenin iki çelik çubuk arasından kayması sonucu kenarlarından deformasyona uğradığı tahmin edilmektedir. Basma çubuğunun uç kısımları, numuneyi kenarlarından daha düşük bir akma gerilmesinde kalıcı deformasyona uğrattığı ve dolayısıyla bu basınçta elde edilen akma gerilmesinin düşük olduğu düşünülmektedir (EK C3 gerilme-şekil değiştirme grafiğinde gösterilmektedir). Şekil 5.27’de 6 bar basınçta meydana gelen farklı deformasyon gösterilmektedir.

Gaz tabancası rezervuarına kompresörden beslenen hava basıncı 10 bar olmasına rağmen, pirinçte çok yüksek deformasyon hızı elde edilmemiştir. Pirinçte 8 bar basınçta elde edilen deformasyon hızı 2684 s^{-1} iken, 10 bar basınçta sadece 2543 s^{-1} ’dir. Bu durum uygulanan yüksek gerilme karşısında numunenin, istenilen deformasyon hızı seviyesine ulaşmadan kırıldığını göstermektedir (EK C3, EK C4 ve EK C5’de deney sonuçları gösterilmiştir).

6. SONUÇLAR

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir. 6063 alüminyum ve C377 pirinç numuneleri Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinde test edilmiştir.

Öncelikle alüminyum ve pirinç numuneleri yarı-statik yüklerin uygulandığı bir servo-hidrolik test cihazında, düşük deformasyon hızında test edilerek bir gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilmiştir. Daha sonra bu numuneler Hopkinson deney düzeneğinde yüksek deformasyon hızlarında test edilmiş ve dinamik bir gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilmiştir. Düşük ve yüksek deformasyon hızları altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır. Her iki malzemede de yüksek deformasyon hızında elde edilen akma gerilmesinin, düşük deformasyon hızındaki akma gerilmesinden yüksek olduğu görülmüştür.

Farklı uzunluklarda olan E1 ve E2 tip alüminyum numunelerinde 2 bar, 4 bar ve 6 bar basınçlarda farklı deformasyon hızları elde edilmiştir. Numune uzunluğu azaldıkça deformasyon hızında ciddi artışlar tespit edilmiştir. Deformasyon hızının sadece uygulanan basınca değil numunenin uzunluğuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Gaz tabancası rezervuarına kompresörden beslenen basınç arttıkça gelen, yansıyan ve geçen gerilme dalgalarının genliklerinde artış gözlenmiştir. Yansıyan ve geçen gerilme dalgalarının genliklerindeki artış, numunede deformasyon ve gerilme değerinin artmasına neden olmuştur. Gaz tabancası tarafından 10 bar basınçta fırlatılan mermi sonrası pirinç numunesinde kırılma gerçekleşmiştir. Bu basınçta yansıyan gerilme dalgası sinyalinin diğer basınçlara göre oldukça düşük, geçen dalga sinyalinin ise yüksek olduğu saptanmıştır. Geçen dalga sinyalinin şiddeti yüksek olduğundan numunenin yüksek gerilmeye maruz kaldığı ve fazla deformasyon göstermeden kırıldığı tespit edilmiştir.

Sinyal şekillendirici olarak kullanılan bakır diskin kalınlığındaki değişimin deformasyon hızını etkilediği görülmüştür. E1 tipi numune üzerinde 6 bar basınçta

kalın ve ince bakır diskler ile deneyler yapılmıştır. Kalın bakır disk ile numuneden elde edilen akma gerilmesi ve deformasyon hızının ince bakır diske göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bakır disklerin boyutlarının azaltılmasıyla daha yüksek deformasyon hızlarına ulaşılabileceği tahmin edilmektedir.

Hopkinson deneyi sonrası numunede sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Bu durum darbe enerjinin bir kısmının numunede ısı enerjisine dönüştüğünü göstermektedir. En fazla deformasyon alüminyumda gerçekleşmiş ve bu değerin % 40'dan fazla olduğu tespit edilmiştir.

Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deney düzeneğinde deneyler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Hopkinson deney düzeneğinde elde edilen en yüksek deformasyon hızı 3369 s^{-1} olmuştur. Daha yüksek deformasyon hızlarına ulaşmak için numune uzunluğu ve bakır diskin kalınlığının azaltılması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca numune ve sinyal şekillendirici boyutunun yanı sıra basma çubuğu olarak kullanılan çeliğin daha yüksek akma dayanımına sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Chen, W. ve Song, B.** (2011). Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Application, Springer, ISBN 978-1-4419-7981-0
- [2] **Gama, B. A., Lopatnikov, S. L. ve Gillespie, Jr. J.W.** (2004). Hopkinson Bar experimental technique: a critical review. *Appl Mech Rev*, **144**(4), Sf. 223-250.
- [3] **Memiş, G.** (2005). *Elastic wave propagation in metal under high strain rates*, (yüksek lisans tezi) İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Kaiser, M. A.** (1998). *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*, (yüksek lisans tezi), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [5] **ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation** (2000). ASM International, ISBN-10: 0871703890, ISBN-13: 978-0871703897
- [6] **Robertson, K. D., Chou S. C. ve Rainey J. H.** (1971). Design and operating characteristics of a Split Hopkinson Pressure Bar apparatus, Army Material and Mechanical Research Center, Watertown, Massachusetts.
- [7] **Lifshitz J. M. ve Leber, H.** (1993). Data processing in the Split Hopkinson Pressure Bar tests. *International Journal of Impact Engineering*, **15**(6), Sf. 723-733.
- [8] **Zhao, H. ve Gary, G.** (1996). On the use of SHPB techniques to determine the dynamic behavior of materials in the range of small strains. *International Journal of Solids and Structures*, **33**(23), Sf. 3363-3375
- [9] **Davies, E. D. H., Hunter, S. C.** (1962). The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. **11**(33), Sf. 155-179
- [10] **Gong, J. C., Malvern, L. E., Jenkins, D. A.** (1990). Dispersion investigation in the Split Hopkinson Pressure Bar. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **112**(3), Sf. 309-314.
- [11] **Follansbee, P. S. ve Frantz, C.** (1983). Wave propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **105**(1), Sf. 61-66.
- [12] **Parry, D. A., Walker, G. ve Dixon, P. R.** (1995). Hopkinson Bar Pulse Smoothing. *Measurement Science and Technology*, **6**(5), Sf. 443-446.
- [13] **Kayalı, S. ve Çimenoğlu, H.** (1991). Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya-Metalurji Yayın No:4, 2. Baskı

EKLER

EK A.1 : E1 tipi numunenin 2 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK A.2 : E1 tipi numunenin 4 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK A.3 : E1 tipi numunenin 4 bar basınçta kalın bakır pulla yapılan deney sonuçları.

EK A.4 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta ince bakır pulla yapılan deney sonuçları.

EK B.1 : E2 tipi numunenin 2 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK B.2 : E2 tipi numunenin 4 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK B.3 : E2 tipi numunenin 6 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK D.1 : E3 tipi numunenin 2 bar basınçtaki deney sonuçları.

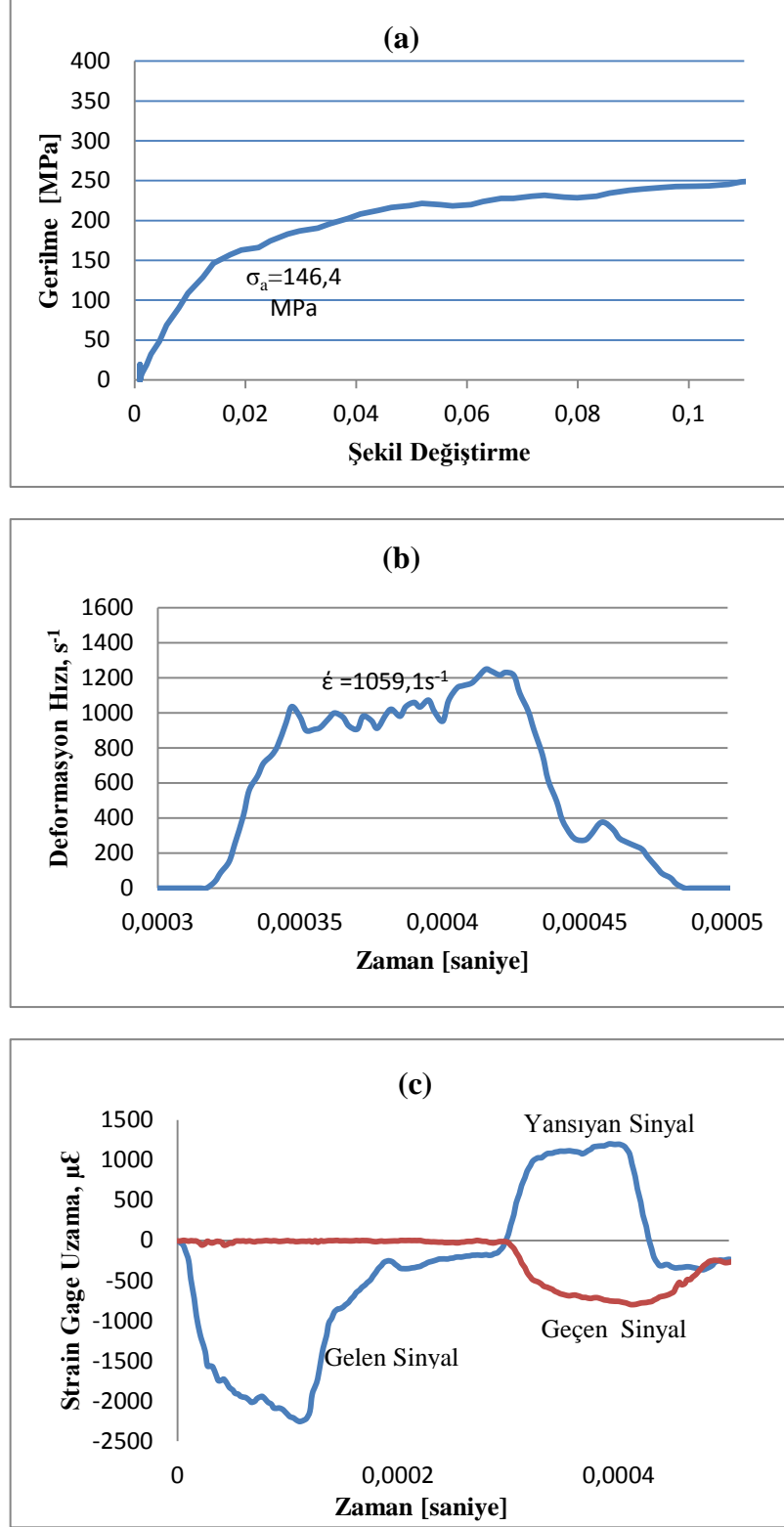
EK D.2 : E3 tipi numunenin 4 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK D.3 : E3 tipi numunenin 6 bar basınçtaki deney sonuçları.

EK D.4 : E3 tipi numunenin 8 bar basınçtaki deney sonuçları.

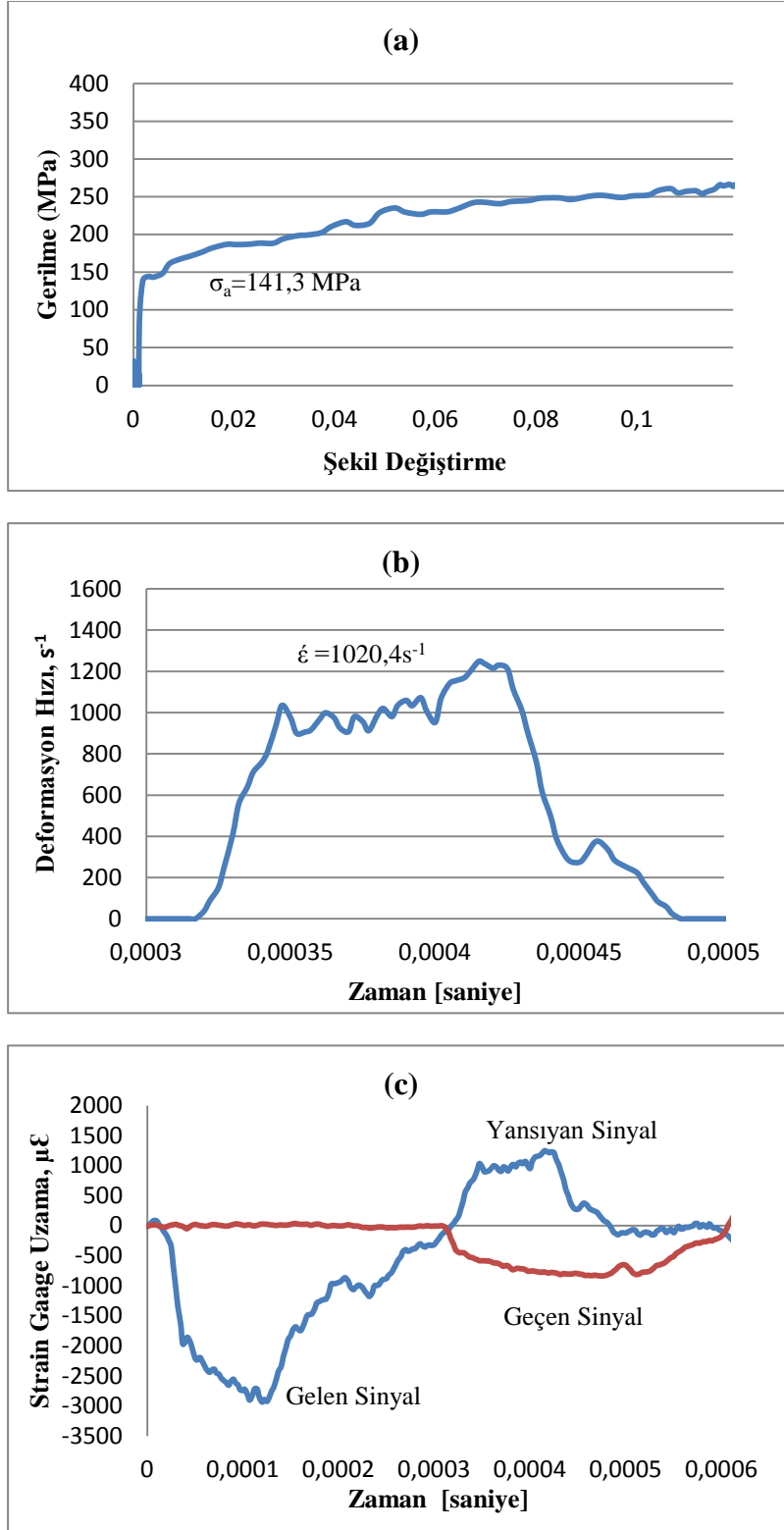
EK D.5 : E3 tipi numunenin 10 bar basınçtaki deney sonuçları .

EK A.1



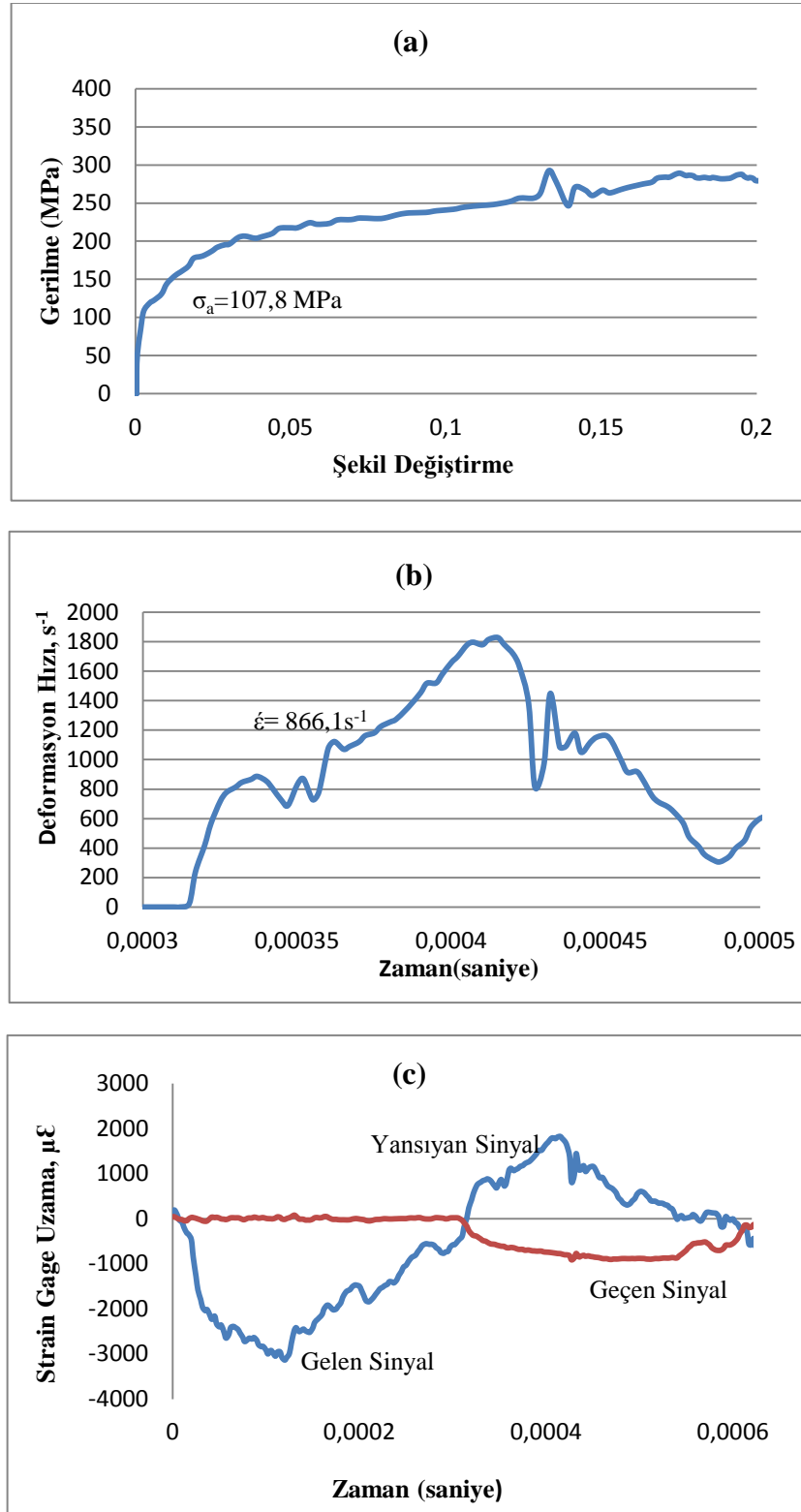
Şekil A.1 : E1 tipi numunenin 2 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK A.2



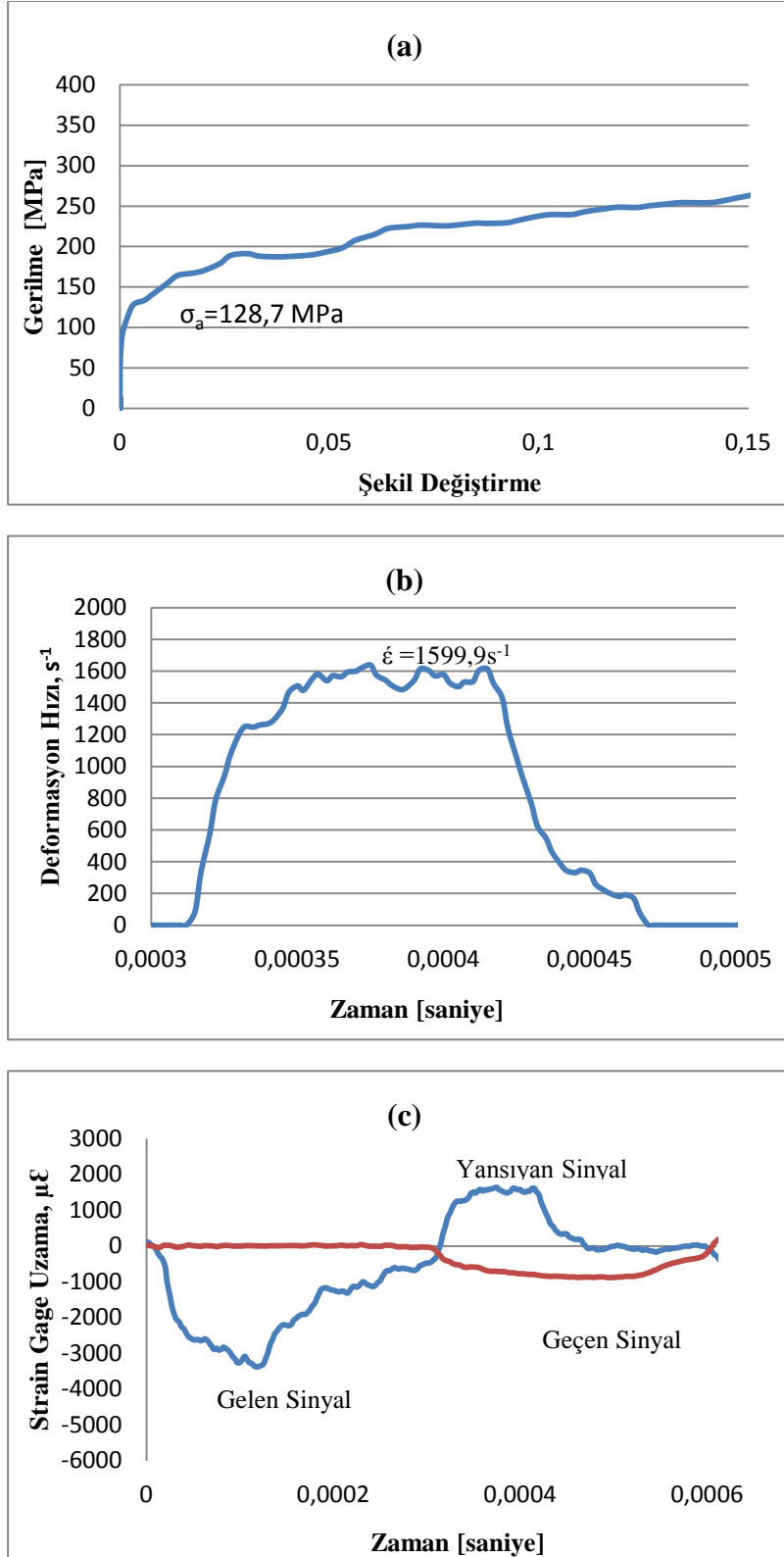
Şekil A.2 : E1 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK A.3



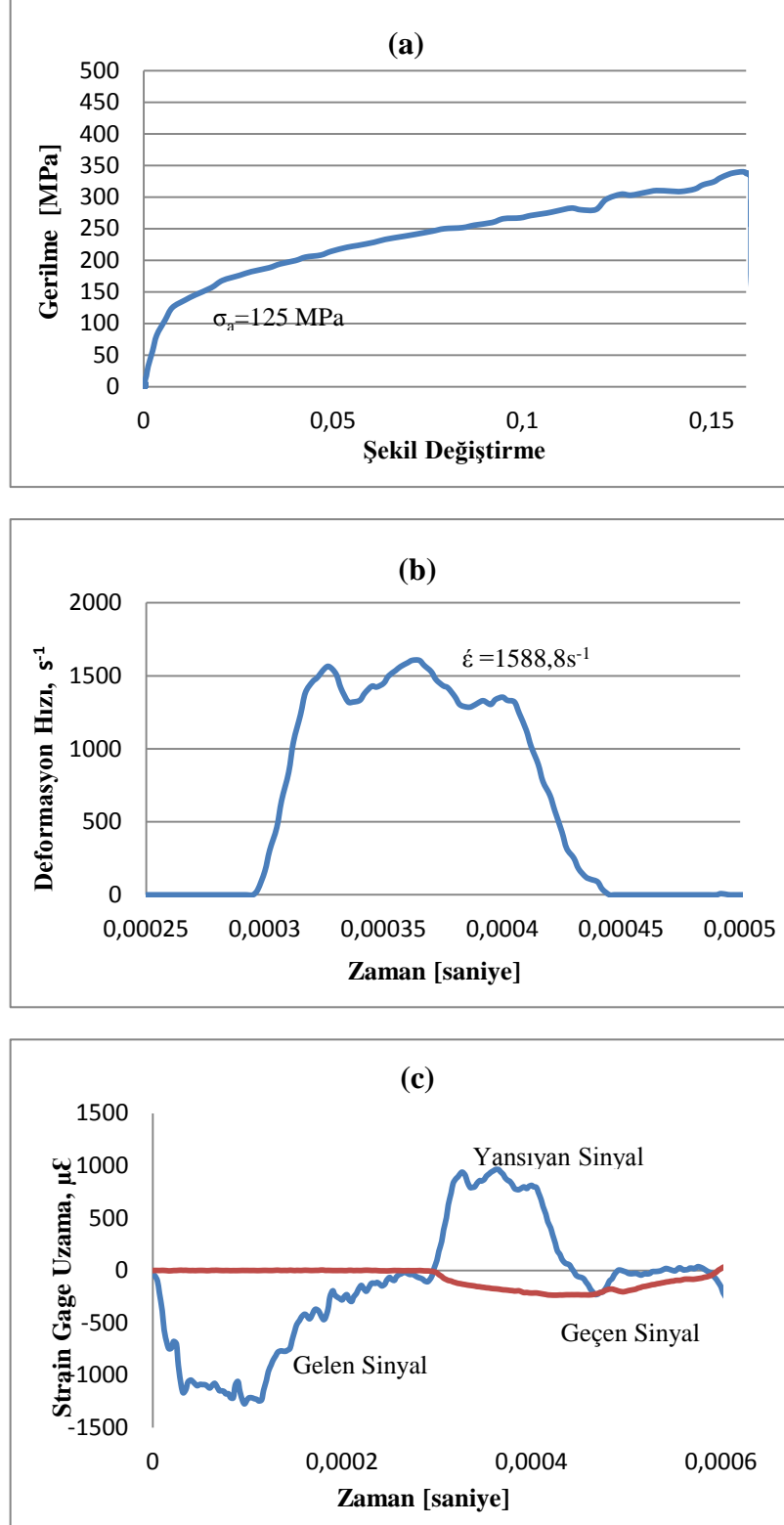
Şekil A.3 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta kalın bakır pul ile elde edilen (a) gerilme-şekil değişirme, (b) deformasyon hızı-zaman, (c) deformasyon – zaman grafikleri.

EK A.4



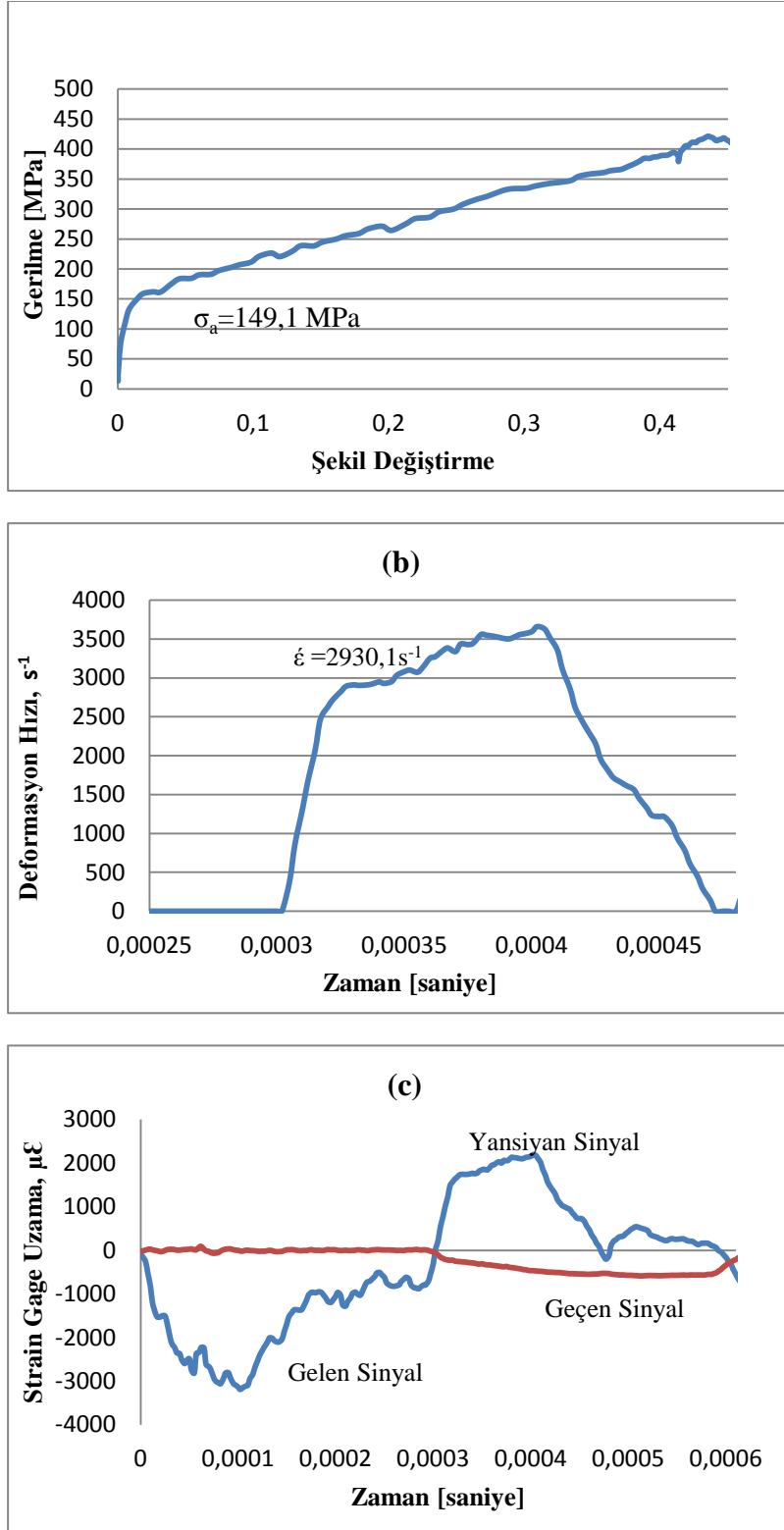
Şekil A.4 : E1 tipi numunenin 6 bar basınçta ince bakır pul ile elde edilen (a) gerilme-şekil değişirme, (b) deformasyon hızı-zaman, (c) deformasyon – zaman grafikleri.

EK B.1



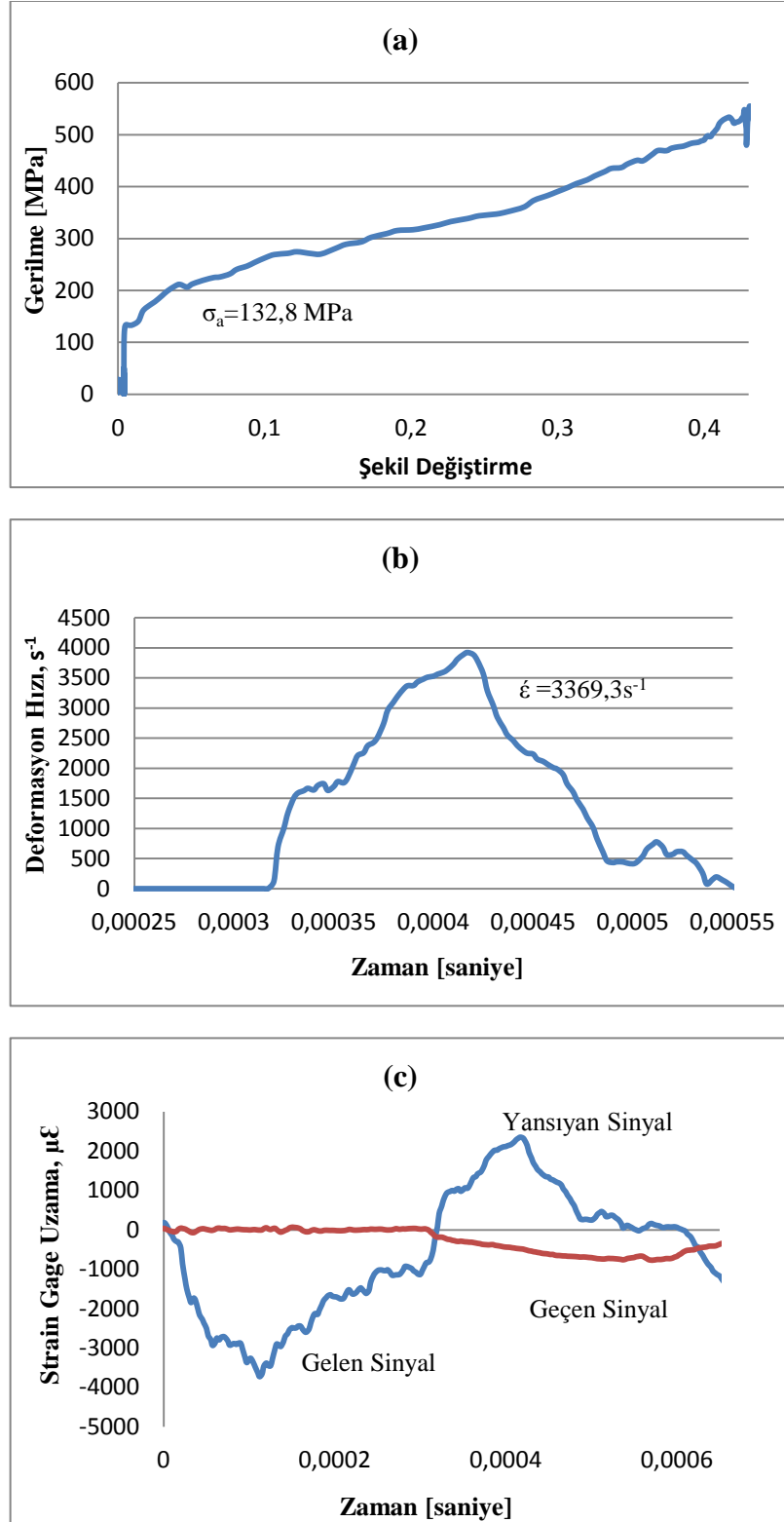
Şekil B.1 : E3 tipi numunenin 2 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon -zaman grafiği.

EK B.2



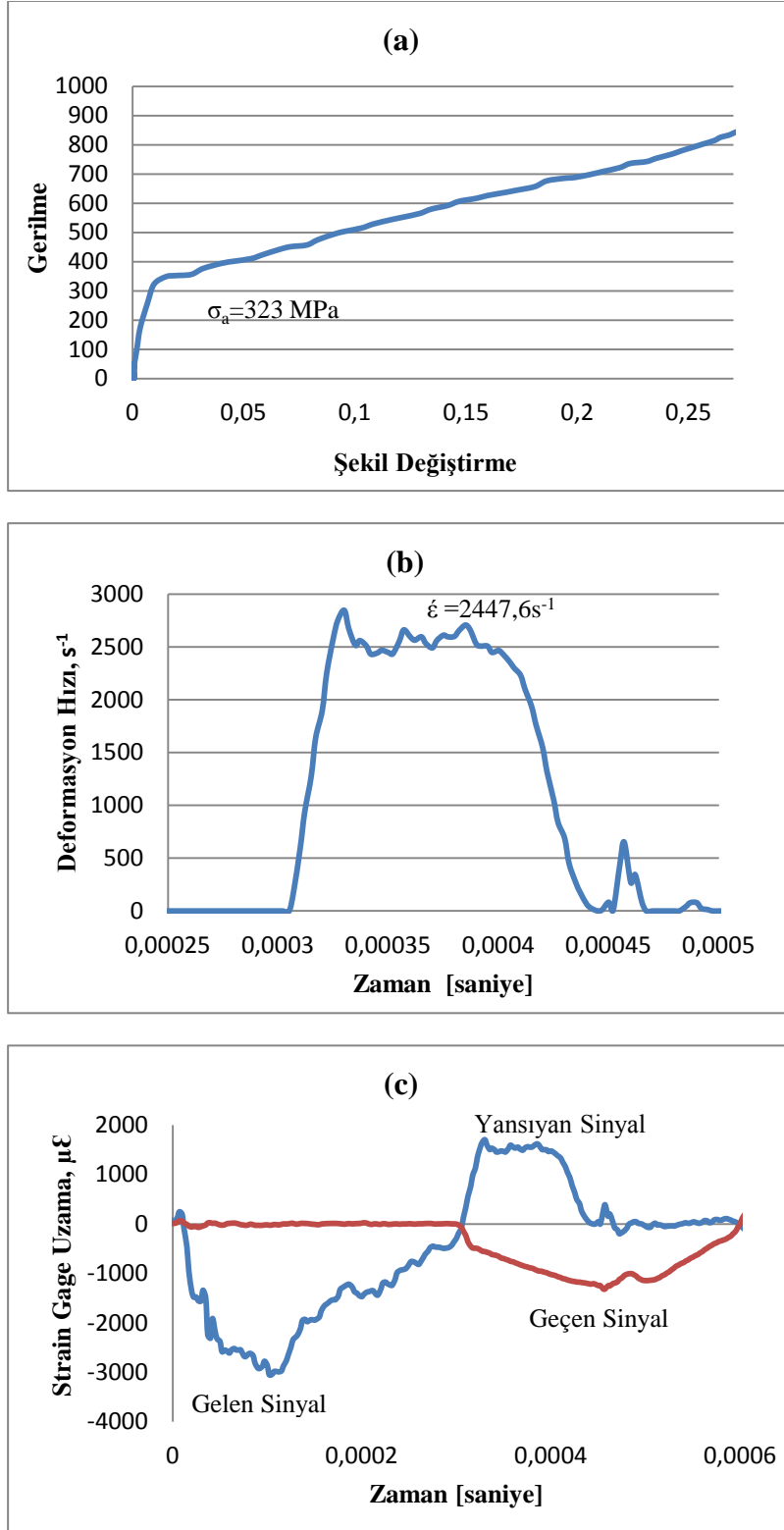
Şekil B.2 : E3 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK B.3



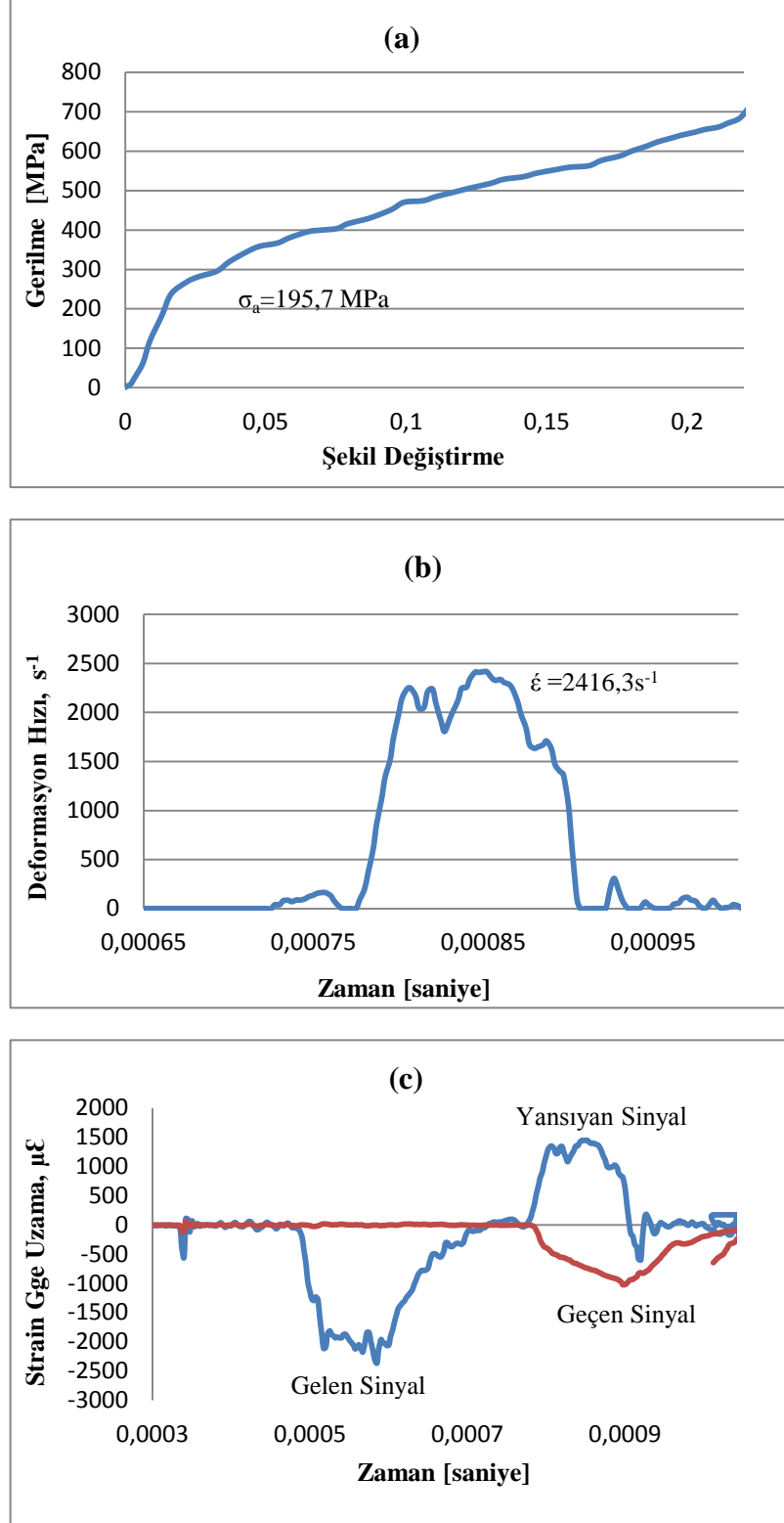
Şekil B.3 : E3 tipi numunenin 6 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK C.1



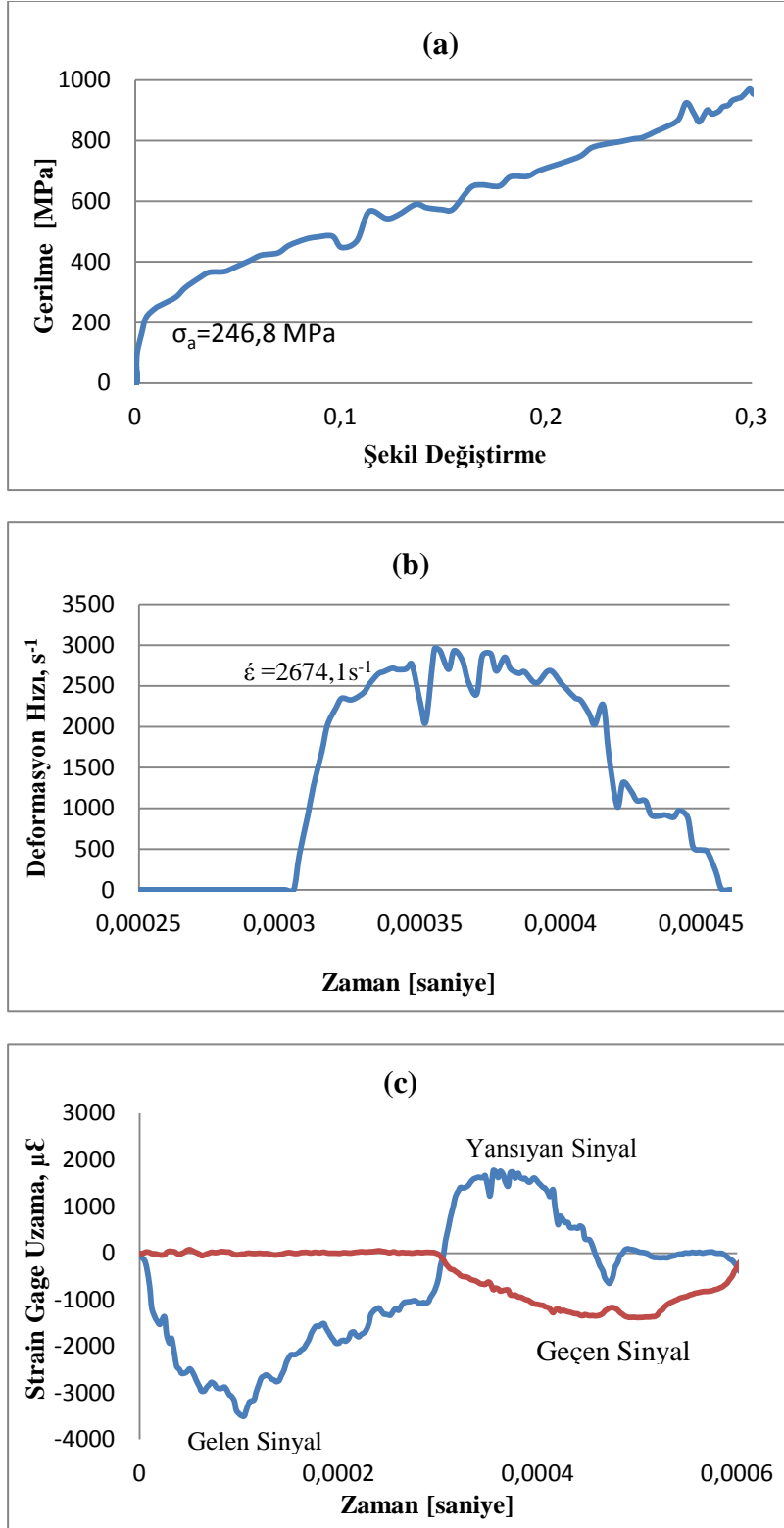
Şekil C.1 : E4 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği

EK C.2



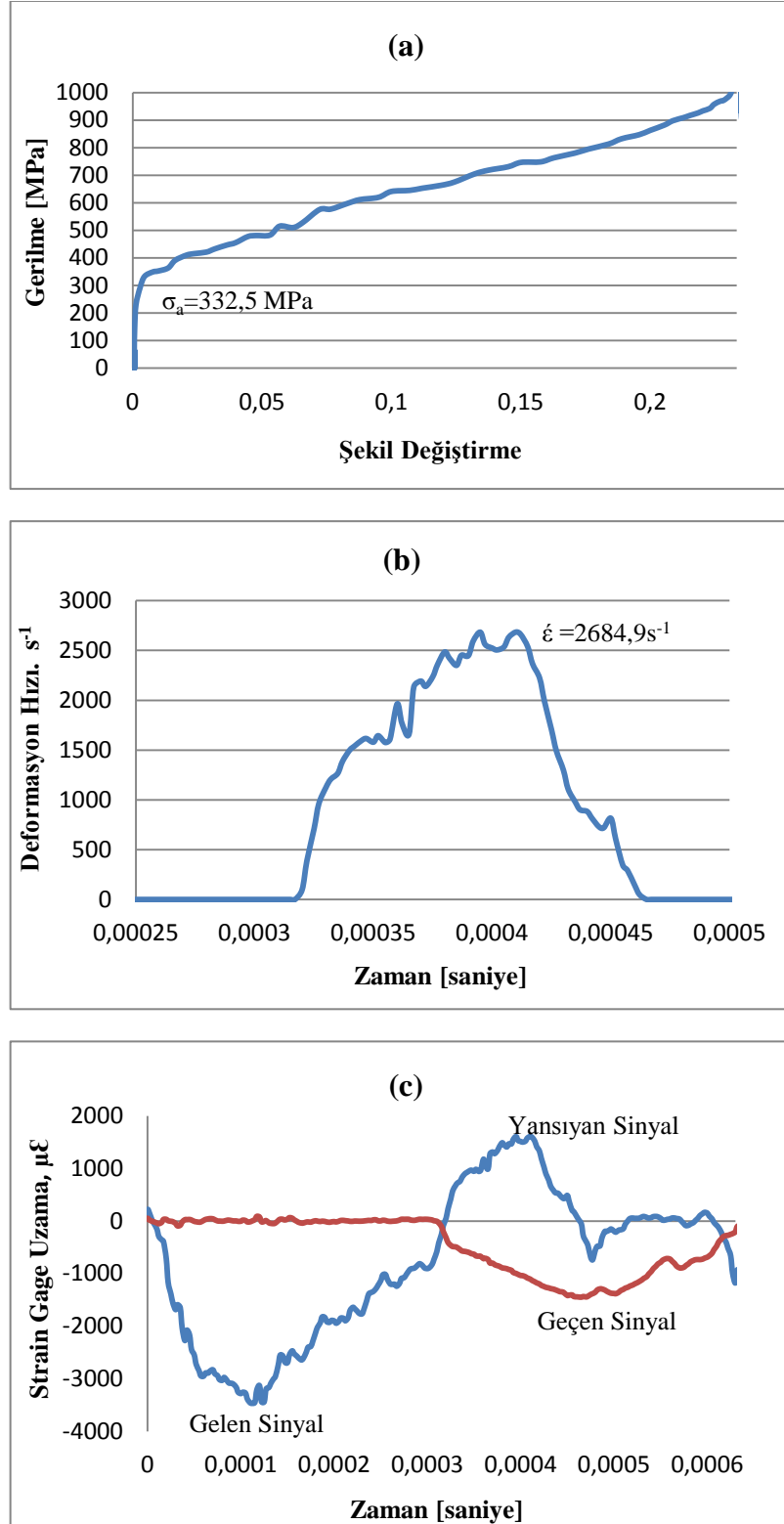
Şekil C.2 : E4 tipi numunenin 4 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği

EK C.3



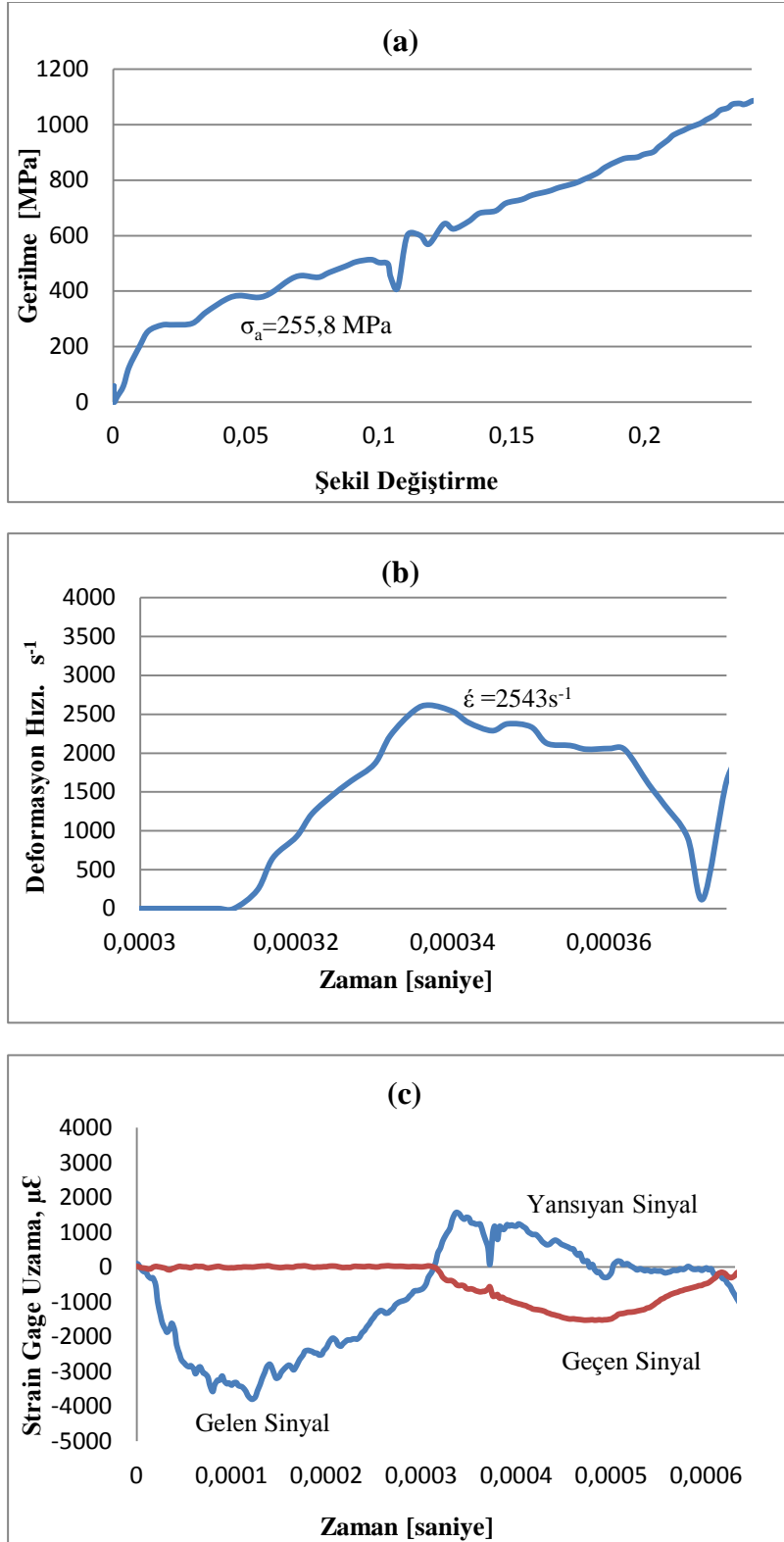
Şekil C.3 : E4 tipi numunenin 6 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK C.4



Şekil C.4 : E4 tipi numunenin 8 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

EK C.5



Şekil C.5 : E4 tipi numunenin 10 bar basınçtaki (a) gerilme-şekil değişirme grafiği, (b) deformasyon hızı-zaman grafiği, (c) deformasyon-zaman grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Zarif Özlem ŞİMŞEK

Doğum Yeri ve Tarihi: Beyoğlu, 21.05.1986

Lise: Dede Korkut Anadolu Lisesi

Lisans Üniversitesi: İstanbul Üniversitesi

Lisans Bölüm: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği