

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZ DARBE TEST CİHAZI İÇİN
GERİNİM VE OPTİK HIZ ÖLÇÜM SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ**



Merve KARPUZ

Mart, 2021

İZMİR

YÜKSEK HIZ DARBE TEST CİHAZI İÇİN GERİNİM VE OPTİK HIZ ÖLÇÜM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı

Merve KARPUZ

Mart, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MERVE KARPUZ, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ AYTAÇ GÖREN** yönetiminde hazırlanan “**YÜKSEK HIZ DARBE TEST CİHAZI İÇİN GERİNİM VE OPTİK HIZ ÖLÇÜM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Aytaç GÖREN

Yönetici

Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde, Dokuz Eylül Üniversitesi BAP kapsamında araştırmacı olarak ortak projede yer alarak beraber çalışmaya başladığım, yüksek lisans hayatımdaki rehberliğiyle beni aydınlatan saygıdeğer danışman hocam, Dr. Öğr. Üyesi Aytaç GÖREN’e bana gösterdiği sabır, ilgi alaka ve üzerimdeki büyük emeğinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansım boyunca içinde yer aldığım projelerde bana büyük yardımları dokunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Yusuf ARMAN ve proje çalışma arkadaşım Abdullah ÇELİK’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yer alan çalışmalarda içerisinde bir kısmı için dahil olduğum Dokuz Eylül Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen 2018 / 205 numarası ile “Savunma Sanayiinde Kullanılan Yüksek Dayanıma Sahip Malzemelerin Farklı Ortam Sıcaklıklarında Karakterizasyonuna Yönelik Deneysel Sistem Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi” adlı çok disiplinli güdümlü araştırma projesi ile yaptığı maddi destek için DEÜ BAP Koordinatörlüğü’ne teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme ve özellikle aynı dönemde tez sürecinden geçtiğim arkadaşlarım Yiğit İŞİÇELİK, Ö. Cem YILMAZ ve Egemen BAYRAKTAR, ’a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Merve KARPUZ

YÜKSEK HIZ DARBE TEST CİHAZI İÇİN GERİNİM VE OPTİK HIZ ÖLÇÜM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Yüksek hız darbe test cihazları (YHDTTC) günümüzde malzeme karakterizasyonunun detaylı bir şekilde yapılabilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Burada bahsedilen karakterizasyondan kasıt darbe testleri sonrasında numunenin malzeme dayanımına bağlı olan analizlerinin yorumlanmasıdır. Yapılan literatür araştırmalarında özellikle savunma sanayinin yüksek dayanıma sahip askeri amaçlı kullanılan malzemeler kapsamında modellerinin oluşturularak geliştirilmesinde ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Bu ihtiyacın giderilmesinde ise yüksek hızlarda darbe test cihazlarında yorumlanabilecek kadar numune malzemelerinin testlerinin yapılması gerekmektedir. Test aşamasındaki yorumlamada ise en önemli unsurlardan biri ölçüm sistemleri olmaktadır. Bu ölçüm sistemleri ise hız ve gerinim ölçümü olmak üzere iki ayrı sistemdir.

Kolsky bar olarak da bilinen parçalı Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) yüksek hız darbe test cihazlarının genel adı olarak bilinmektedir. Bu tez çalışmasında bahsi geçen darbe test cihazları için optik hız ölçüm sistemi ve gerinim ölçüm sisteminin deneysel bir şekilde geliştirilme aşamaları incelenmiştir. Yüksek hız darbe test cihazlarına göre daha düşük hızlarda test yapılabilen düşen ağırlık darbe test cihazlarında ilgili deneysel çalışmalar aktarılarak yorumlanmıştır. Optik hız ölçüm sistemi ile vuruş çubuklarının geçişini yakalayabilen optik sensörler kullanılarak geçiş dalgası yakalanmıştır. Bu geçiş dalgasının algılanabilmesi için belirlenen mesafenin başladığı ve sona erdiği noktalar optik kapı olarak adlandırıldığında; birinci optik kapı ile ikinci optik kapı ifadeleri kullanılmaktadır. Buradan geçme zamanları optik sensörler sayesinde ölçülebilmekte ve sistemin hız ölçümü bu sayede yapılabilmektedir. Sistemin gerinim ölçümü için ise strain-gage algılayıcılar kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek hız darbe test cihazı, ölçüm sistemleri, optik hız ölçüm, gerinim ölçüm, mekanik karakterizasyon, düşen ağırlık darbe test cihazı

DEVELOPMENT OF A STRAIN AND OPTICAL VELOCITY MEASUREMENT SYSTEM FOR HIGH SPEED IMPACT TEST DEVICE

ABSTRACT

High-speed impact testing (HSIT) devices are preferred today for detailed characterization of materials. What meant by the term "characterization" herein is the interpretation of the analysis based on the material strength of the sample after impact tests. The literature review puts forth a need for the development and enhancement of models within the scope of materials used for military purposes, especially in the defense industry. It is necessary to test sample materials at quantities enough to allow interpretation in high-speed impact testing devices in order to meet this need. Measurement systems are one of the key elements in the interpretation during the test phase. These measurement systems are divided into two: velocity and strain measurement systems.

The Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), also known as the Kolsky bar, is the generic name for high-speed impact testers. In this thesis, the development stages of the optical velocity measurement system and the strain measurement system for the mentioned impact testers are experimentally examined. The relevant experimental studies on drop weight impact testing devices, which can be tested at lower speeds than high-speed impact testing devices, are cited and interpreted. A transition wave is obtained by using optical sensors that can capture the transition of strike bars with an optical velocity measurement system. When the points where the set distance starts and ends in order to detect this transition wave are referred to as optical gates, the terms of first optical gate and second optical gate are used. The transition times can be measured by optical sensors and the speed of system can thus be measured. Strain-gauge sensors are used for the strain measurement of the system.

Keywords: High-speed impact tester, measurement systems, optical velocity measurement, strain measurement, mechanical characterization, drop weight impact tester

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – YHDT CİHAZLARINDA MATEMATİKSEL MODELLEME VE HESAPLAMALAR	22
2.1 Matematiksel Modelleme ve Gerekli Hesaplamalar	22
2.1.1 Elastikiyet Teorisi	23
2.1.2 Gerilme, Şekil Değişirme ve Deformasyon Hızı Hesabı.....	25
2.1.2.1 Bir Çubuğun Hareket Denklemi	25
2.1.2.2 Kesit Alanı ve Empedanstaki Değişimin Dalga Yayılımına Etkisi .	28
2.1.2.3 Numunedeki Şekil Değişirme ve Deformasyon Hızı	32
2.1.2.4 Johnson Cook Modeli ile İlgili Hesaplamalar	36
BÖLÜM ÜÇ – ÖLÇÜM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN METARYAL VE MEKANİK TASARIM.....	37
3.1 Yüksek Hız Darbe Test Cihazı İçin Optik Hız Ölçüm Deney Seti	37
3.1.1 YHDT Cihazları İçin DHDT Cihazında Yapılan Denemeler	38
3.1.2 Deney Setine Giriş ve Kullanılan Komponentler	39
3.1.3 Basit Sensör Modeli.....	39
3.1.4 Düşük Darbe Test Cihazı Üzerinde Deneyin Konumlandırılması ve Çalışma Mantığı	41

3.1.5 Uygulamada Algılayıcı Cevabı ve Sonuçlar.....	43
3.2 Yüksek Hız Darbe Test Cihazı İçin Gerinim Ölçüm Deney Seti.....	45
3.2.1 Deney Setine Giriş ve Kullanılan Komponentler	45
3.2.1.1 Gerinim Ölçerlerin Yapısı, Ölçüm Teorisi ve Çalışma Sistemi	45
3.2.1.2 Sensörlerin Yerleştirilmesi veYapıştırılması	47
3.2.1.3 Yük Hücresi, Ankastre Kiriş Aparatı ve Salıncak İle Deney Düzenegi	50
3.2.1.4 Sabit Gerinim Sensörler ile Wheatstone Köprü Düzenegi	53
BÖLÜM DÖRT – ÖLÇÜM SİSTEMLERİNDEN ELDE EDİLEN ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME.....	54
4.1 Sistem İçin Düşük-Yüksek Deformasyon Hızları	54
4.1.1 Matlab Benzetimleri ve Veri Kayıt Cihaz Kullanımı	55
4.1.2 Sistemin Yüksek Hız İçin Geliştirilmesi	58
4.2 Sistemin Hız ve Gerinim Değerlerinin Grafıksel Olarak Karşılaştırılması.....	61
4.2.1 Sistemden Alınan Değerler ve Sonuçlar.....	62
BÖLÜM BEŞ –YARGILAR VE SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	65
EKLER	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Bertram hopkinson deney düzeneği.....	3
Şekil 1.2 Davies tarafından geliştirilen deney düzeneği	4
Şekil 1.3 Kolsky tarafından geliştirilen deney düzeneği.....	5
Şekil 1.4 Lindholm tarafından geliştirilen deney düzeneği	6
Şekil 1.5 Hauser tarafından geliştirilen deney düzeneği.....	7
Şekil 1.6 Nicholas tarafından geliştirilen shpb sistemi	7
Şekil 1.7 Harding ve welsh tarafından geliştirilen ölçüm sistemi.....	8
Şekil 1.8 Staab ve gilat tarafından geliştirilen ölçüm sistemi	9
Şekil 1.9 Verleysen ve diğer. tarafından geliştirilen ölçüm sistemi.....	12
Şekil 1.10 Song, Bo, Antoun, Bonnie, Connelly, Kevin, Korellis, John, Lu, Wei-Yang tarafından geliştirilen ölçüm sistemi.....	15
Şekil 1.11 Gerlach çalışmalarında kullanılan kirana kamera lens	16
Şekil 1.12 Huang ve diğer tarafından geliştirilen ölçüm sistemi	18
Şekil 1.13 Nie ve diğer. tarafından geliştirilen dedektör	19
Şekil 1.14 Nie ve diğer. tarafından geliştirilen ölçüm sistemi	19
Şekil 1.15 Solomos ve diğer. tarafından geliştirilen korelasyon görüntüsü.....	20
Şekil 1.16 Qiu ve diğer. tarafından geliştirilen kilit somunları.....	21
Şekil 1.17 BAP DEÜ projesi yüksek hız deney düzeneği şeması.....	23
Şekil 2.1 Basınç çubuğu üzerindeki diferansiyel eleman.....	25
Şekil 2.2 Diferansiyel eleman etkiyen kuvvetleri	26
Şekil 2.3 Giriş ve çıkış çubuklarındaki parametreler	26
Şekil 2.4 Numune ve kesit alanındaki değişimin gösterimi.....	29
Şekil 3.1 Şekil değiştirme hız aralığı	37
Şekil 3.2 Hız kapısı örnek sistemi.....	37
Şekil 3.3 Deneysel kullanılan optik sensör	40
Şekil 3.4 Yüksek hız darbe tesinde kullanılan hızlı kamera	40
Şekil 3.5 Düşen ağırlık darbe test cihazı için tasarlanan optik hız ölçüm sistematığı	42
Şekil 3.6 Çalışmada kullanılan düşen ağırlık darbe test cihazı.....	42
Şekil 3.7 Düşen ağırlık darbe test cihazında optik ölçüm sisteminin yerleştirilmesi.	43
Şekil 3.8 Düşen ağırlık darbe test cihazında optik ölçüm sisteminin yerleştirilmesi.	43

Şekil 3.9 Yazılım ekran sonuç görüntüsü	44
Şekil 3.10 CEAST 9350 fractovis plus darbe test sinyali a) Osiloskop görüntüsü 1	
b) Osiloskop görüntüsü 2.....	44
Şekil 3.11 DADTC hız ölçüm sisteminin kamera ile doğrulanması.....	44
Şekil 3.12 Strain-gage örneği.....	47
Şekil 3.13 Yük hücresi uygulama	51
Şekil 3.14 Yük hücresi uygulama grafiği.....	51
Şekil 3.15 Ankastre kiriş aparatı ile gerinim sensör deneği.....	51
Şekil 3.16 Ankastre kiriş aparatı ile gerinim sensör deney grafiği	52
Şekil 3.17 Salıncak ile gerinim sensör deneği	52
Şekil 3.18 Tam Wheatstone köprüsü	53
Şekil 4.1 SHPB test cihazı tasarımı.....	54
Şekil 4.2 SHPB test için blok diyagramı.....	56
Şekil 4.3 İMC veri kayıt cihazı	56
Şekil 4.4 İMC Studio arayüz seçim ekranı	57
Şekil 4.5 İMC Studio gerinim ölçer köprü bağlantı görüntüsü.....	57
Şekil 4.6 Gerinim sensörü uygulama	58
Şekil 4.7 Gerinim sensörleri W. köprü bağlantı şeması.....	59
Şekil 4.8 Şekil değiştirme grafiği1	60
Şekil 4.9 Şekil değiştirme grafiği2.....	60
Şekil 4.10 Şekil değiştirme grafiği2.....	61
Şekil 4.11 Sistem hız-gerinim değerleri karşılaştırma grafiği 1	63
Şekil 4.12 Sistem hız-gerinim değerleri karşılaştırma grafiği 2	63

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 a) Birinci ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisi b) İkinci ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisi.....	30
Tablo 3.1 Gerinim ölçer sensörün metal yüzeye uygulama işlem sırası.....	49
Tablo 3.2 Wheatstone köprü düzeneği hesaplamaları.....	53
Tablo 4.1 Hız ve gerinim değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Tablo 4.2 Elde edilen hız ve gerinim değerleri	62



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Gerek zırh malzemeleri ve gerekse yeni nesil kompozitler gibi savunma sanayiinde sıklıkla kullanılan yüksek dayanıma sahip malzemelerin karakterizasyonunun yapılmasında tercih edilen en yaygın yöntem yüksek hız basınç test çubuğu (YHDT) yöntemi olmuştur.

Günümüzde YHDT cihazlarında analizi yapılan malzemeler için test aşamasında kullanıma gereksinim duyulan ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Daha sonrasında bu hesaplamaları yorumlayacak bir analize geçilmesi gerekmektedir. Bu tezde bahsi geçen ölçüm sistemleri ana konu olarak ikiye ayrılmaktadır. İlk olarak yüksek hız darbe test cihazlarında hızın ölçümünün yapılması ikinci olarak ise sistem üzerindeki gerinim ölçümü için hesaplamaların yaptırılmasıdır. Bu tez çalışmasında ölçüm sistemleri ile ilgili elde edilen tüm bilgiler bir arada toplanarak geliştirme aşamaları verilmiştir.

Hız ölçümü ve gerinim ölçümünü içerisinde barındıran SHPB yani yüksek hızlarda numune üzerinde test yapılabilen Split Hopkinson basınç test çubuğu düzeneklerinin ortaya çıktığı ilk aşamasından günümüze kadar olan gelişmesi ile hangi amaçlar için kullanılmasından, sistemsal olarak barındırdığı tezin ana konusu olan ölçüm yöntemlerinden detaylı olarak açıklanarak kronolojik sıra ile verilmiştir.

Bu tezde bahsi geçen hız ölçüm sistemi optik bir ölçüm sistemidir. Geliştirilen optik hız ölçüm sistemi sayesinde oluşturulan dalgaın birinci optik kapı ile ikinci optik kapıdan geçme zamanları ölçülebilmekte ve sistemin hız ölçümü bu sayede yapılabilmektedir. Bu yöntem sonucunda elde edilen hız değerleri, gerinim oranları gibi parametreler bu konuda yapılacak nümerik balistik çalışmalarda kullanılan malzeme modellerinin geliştirilmesinde de etkin bir rol oynayabileceği öngörülmektedir (Karpuz ve Gören, 2019). Tezde bahsi geçen bir diğer ölçüm sistemi ise gerinim ölçüm sistemidir. Sistemin gerinim ölçümü için strain-gage sensörler kullanılarak yapılan ölçüm sonucunda gerinim hesabı yapılarak yorumlanabilmektedir.

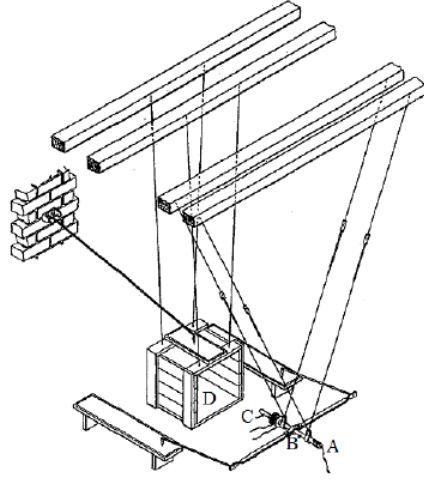
Ek olarak tez çalışması içerisinde yüksek hız darbe test cihazlarında ölçüm ve numune üzerinde oluşan parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi ve hesabının yapılma aşamaları verilmiştir. Böylece gerinim oranı ve hız hesaplamalarının girdi ve çıktılarının tanımlamalarının yapılarak aktarılması sağlanmıştır.

Tez kapsamında, son yıllarda savunma sanayiinde ülkemizin geliştirmiş olduğu milli ve yerli projeler de dikkate alınarak, bu yöntemi gerçekleştirecek bir test cihazı için gerinim ve optik hız ölçüm sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yüksek hız darbe test cihazlarından önce düşük hızda test denemelerinin yapılabilmesi için düşen ağırlık darbe cihazı ile deneysel denemeler yapılmıştır.

Literatürde yüksek hız darbe test cihazları ve sistem ölçüm düzenekleri için yapılan çalışmalarda aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir. Yüksek hız darbe test cihazlarının günümüz genel adlandırması olan Split Hopkinson Basınç Deney Test düzeneğinin adından da aldığı üzere ilk olarak 1914 yılında Bertram Hopkinson tarafından bulunmuştur.

Hopkinson (1914) hızlı bir mermi veya patlayıcının etkisiyle oluşan basıncın ölçümü için Şekil 1.1’de görseli verilen basma çubuğu tasarımını bu alanda ilk olarak yapmıştır. Bertram Hopkinson’un deney düzeneği; uzun bir çelik çubuk, kısa silindirik çelik çubuk ve basit bir balistik sarkaçtan oluşmaktadır. Çubuğun bir ucundaki patlayıcının etkisi ile çubuk boyuna yayılan bir basınç dalgası elde edilmektedir. Çubuğun diğer ucunda bulunan kısa silindirik çubuk ise bu basıncın etkisiyle hareketlenmektedir. Deney düzeneğindeki balistik sarkaç ile silindirik olan giriş çubuğunun momentumu ölçülmüştür. Bu momentumun etki ettiği zaman, kısa çubuktaki uzunlamasına elde edilen dalganın gidiş geliş süresi olarak hesaplandığı belirtilmiştir. Aynı çap değerinde ancak farklı uzunluktaki silindirik çubukların testlerini yaparak bir dizi basınç-zaman eğrisi çıkartılmıştır. Fakat istenildiği kadar hassas bir gerilme dalgası sinyali yakalanamadığından bu deney düzeneği ile istenilen sonuçlara ulaşamadığı belirtilmiş olsa da bu alanda yapılan en önemli gelişmelerden

biri olarak kabul görmüş ve günümüzde yüksek hız darbe test cihazlarının en gelişmiş olarak bilineni olan Split Hopkinson parçalı basınç çubuğu adı ile Hopkinson'ın adını taşımaktadır.



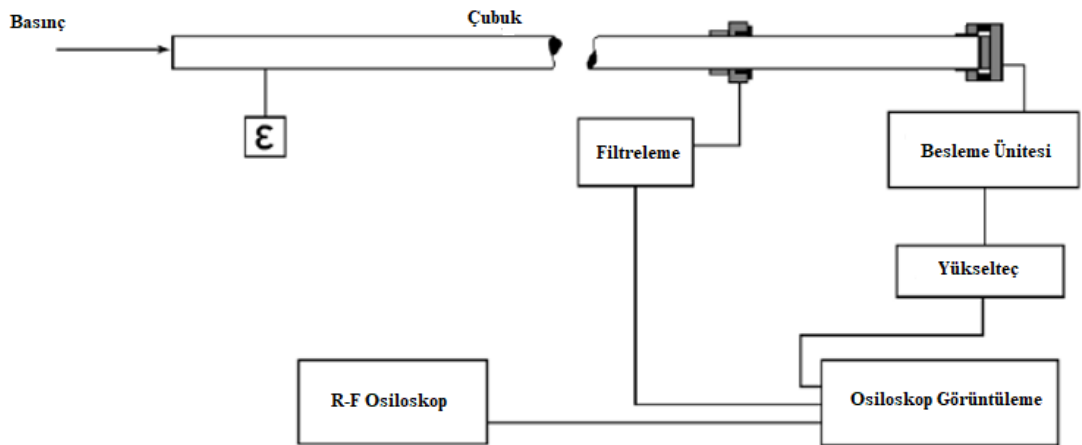
Şekil 1.1 Bertram hopkinson deney düzeneği (Hopkinson, 1914)

Chen ve Song (2011) tarafından Bertram Hopkinson tarafından ilk kez tasarlanan deney düzeneği çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Hopkinson basınç çubuğunun kısa tarihçesini, genel çalışma ilkelerini, tasarımlarının incelendiği kitapta da Bertram Hopkinson deney düzeneği olan Şekil 1.1'deki düzenek ile açıklanmıştır. Kitapta düzeneğin genel çalışma prensibinden bahsedilmiş olup sonucunda sınırlı ölçüm teknikleri nedeniyle bu düzeneğin yetersiz kaldığı aktarılmıştır.

Landon ve Quinney (1923), Hopkinson'ın çalışmalarına, savaş yıllarından önce toplanan sonuçları ve 1919'un başlarında Prof. Hopkinson'ın asistanı tarafından elde edilen bazı sonuçları yorumlamak amacıyla devam etmiştir. Landon ve Quinney, çubuk uzunluğunda yaptığı değişiklik ile basınç dalgasının bozulmasını nasıl etkilediğini ve çubuk çapı değiştiğinde ortalama basıncın nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Hopkinson'ın cihazının maksimum basıncın ve bu basıncın uygulanabileceği sürenin hesaplanmasında oldukça yakın değerler verdiği görülmüştür ancak bu yöntem, maksimum basınç meydana geldiğinde darbe anındaki gerinimi göstermemektedir. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda bu eksikliklerin araştırılması yoluna gidilmesi sağlanmıştır.

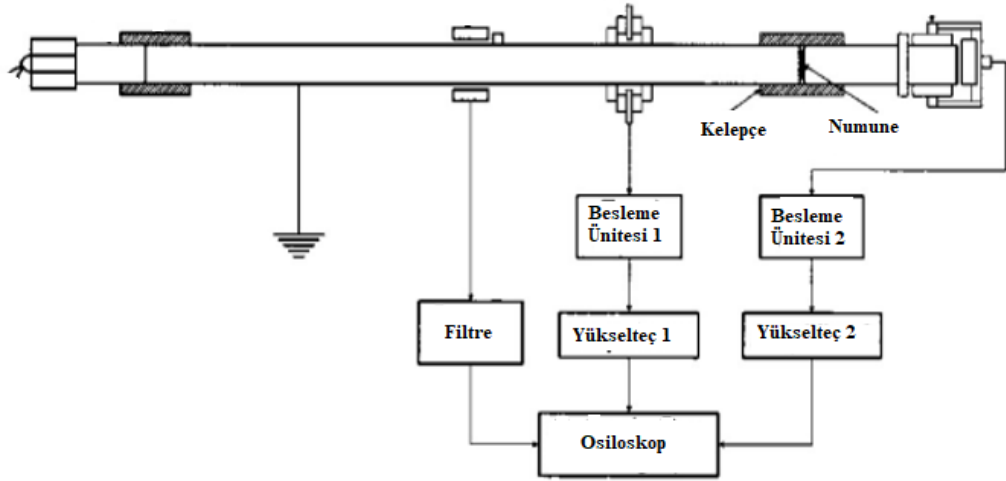
Bancroft (1941), silindirik çubuklardaki boyuna dalgaların yayılımı için Pochhammer-Chree denklemlerini kullanmıştır. Bu denklemlerde, sonsuz uzunluğa sahip silindirik bir çubukta dalga yayılımı için hareket denkleminin çözümüne değinmektedir. Hopkinson basınç çubuğuna uygulanan Bancroft'un çalışmaları, bilgisayarda veri işleme analizlerinin hızı artıncaya kadar tam olarak kullanılamamıştır. Ancak bu çalışma, dispersiyon düzeltme alanında önemli ilerlemeler sağlamıştır.

Davies (1948), elektriksel devre yöntemini kullanarak bir ölçüm tekniğini geliştirmiştir. Hopkinson basınç çubuğunda gerilme dalgası yayılımı sonucunda oluşan aksenal ve radyal şekil değişimini bir osiloskoba bağlı olan devre ve kondansatör ile ölçmüştür. Davies, oluşan dalganın dağılımını belirlemek için Dennison Bancroft 'un da yaptığı gibi Pochhammer-Chree denklemini kullanmıştır. Pochhammer frekans denklemi, çap ölçüsü dikkate alınmadan yapılabilen bir çubukta elastik dalga yayılımının dispersiyon eğilimli olduğunu ifade etmektedir. Bu denklemi kendi çalışmasına adapte eden Davies, elde etmiş olduğu test değerlerinin dispersiyona uğradığı sonucunu çıkarmıştır. Sonuç olarak elde ettiği verilerin istediği hassaslıkta bir ölçüm olmayabileceğine kanaat getirmiştir. Davies'in gerçekleştirmiş olduğu deney düzeneği Şekil.1.2'de belirtilmiştir.



Şekil 1.2. Davies tarafından geliştirilen deney düzeneği (Davies, 1948)

Kolsky (1949) literatürde aktarılan çalışmalara kadar yapılan tüm hız darbe test cihazlarında tek basma çubuğu ile düzenek yapılmıştır. Kolsky, Hopkinson basınç çubuğu düzeneğine ikinci bir basma çubuğu ekleyip iki çubuk arasına bir numune yerleştirmiştir. Bu parçalı çubuk düzeneği 'Kolsky Çubuğu' olarak da adlandırılmaktadır. Her iki çubukta oluşan gerinim Davies (1948) tarafından kullanılanlara benzer kondansatörler kullanılarak ölçülmüştür. Kolsky ölçümlerinde basma çubuğunda oluşan gerilme dalgasının dispersiyondan etkilenmeksizin yayıldığı ve numunedeki tüm kesit alanında doğrusal bir gerilme yayılımının olduğunu varsayan kabuller yapmıştır. Bu deneylerde Kolsky, radyal ataletin numunenin yarıçapının karesiyle orantılı olması nedeniyle numunedeki eksenel ataleti ihmal etmek için numunenin önemli ölçüde ince olması gerektiğini belirtilmiştir. Deneyler sonucunda patlayıcının uygulanması sonrasında numune malzeme ve basma çubuğu ara yüzeyinde oluşan şekil değişiminden, bu değişim miktarını, deformasyon hızını ve gerilmeyi elde ederek Şekil.1.3'te verilen düzeneği geliştirmiştir.



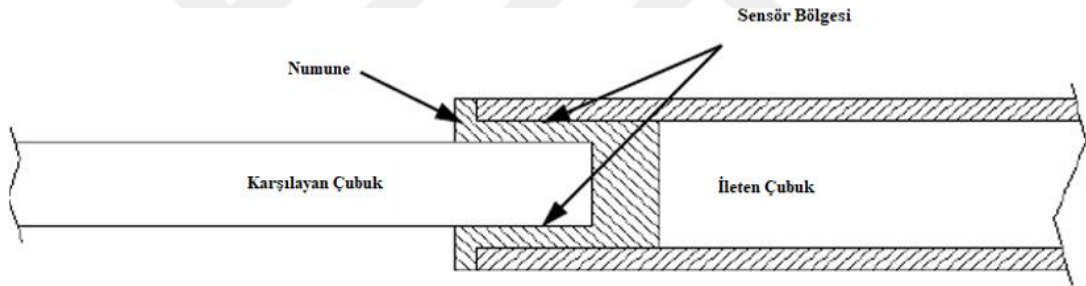
Şekil 1.3. Kolsky tarafından geliştirilen deney düzeneği (Kolsky, 1949)

Kraft ve diğer. (1954), basınç çubukları üzerine kondansatörler yerine gerinim ölçerler yerleştirerek çeşitli ölçüm değerleri elde etmiştir. Gerinim ölçerlerin kullanımı bu çalışmadan sonra artık Hopkinson basınç çubuğu deneyleri için standart ölçüm tekniği haline getirilmiştir. Kraft'tan önce gerinim darbesi dalgalarını ölçmek için çeşitli tetikleyiciler kullanılmıştır. Basma çubuğu ucunda kullanılan patlayıcılarla

tekrarlanabilir sonuçlar üretmek çok zor olmakta iken patlayıcı yerine Krafft bir gaz tabancası tasarlayarak bu sorunu aşmaya çalışmıştır. Gaz tabancası ile merminin basma çubuğuna fırlatılmasıyla “geleneksel olarak Kolsky bar deneyleri için ideal olarak kabul edilen” bir darbe etkisine ulaşılmıştır.

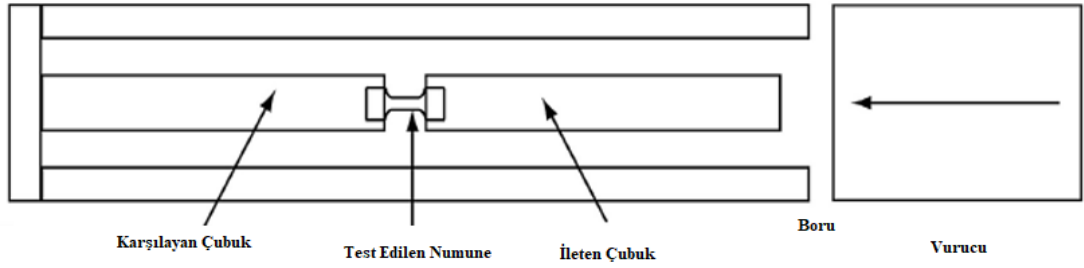
Bu sürece kadar olan çalışmalarda en fazla ilerleme kat edilen çalışma Kraft ve arkadaşlarının olmuştur.

Lindholm (1964), çubuk uzunluklarını ve gerinim ölçüm cihazlarının yerleşimdeki tasarımlarını değiştirmiştir. Her iki çubukta da geçici darbe şekillerini kaydetmek için Şekil.1.4’te verilen tasarım yardımıyla modern gerinim ölçer teknolojisini kullanarak elektronik devre ile tek bir etki için tam gerinim eğrisinin doğrudan ölçülmesini sağlamıştır.



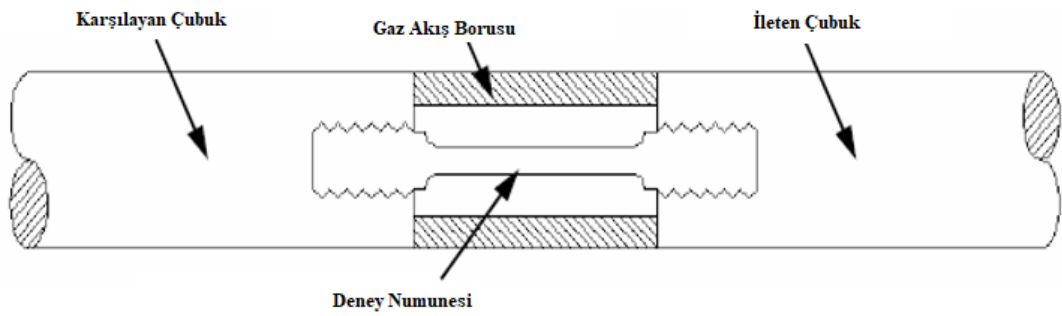
Şekil 1.4. Lindholm tarafından geliştirilen deney düzeneği sistemi (Lindholm, 1964)

Hauser, (1966) tarafından Şekil 1.5’te belirtilen numunede doğrudan dinamik gerilme yüklemesi oluşturmak için Kolsky çubuk sisteminin çekme versiyonları tasarlanmıştır. Dinamik gerginlik deneylerinin ilk tasarımı içi boş bir tüp, içinde arasına sıkışmış bir numune ile gelen ve iletilen çubuklar yerleştirilmiştir. Bu cihazın çalışma prensibi, dış tüpteki eksenel sıkıştırma etkisini, Kolsky çubuk sisteminin yerleştirildiği tüp vasıtasıyla ileten çubuktaki bir gerilim dalgasına dönüştürmektir. Bu yaklaşım, Kolsky çubuk sisteminin sıkıştırma versiyonunun sadece bir uzantısı olup sıkıştırma çubuğu sistemi tetikleme sistemini doğrudan kullanıyordu. Bununla birlikte, tüm kurulum tüpün içinde olduğundan enstrümantasyon (örnek gerinim ölçer) ve örnek deformasyonunun doğrudan gözlemlenmesi için elverişsiz olduğu araştırma sonucunda belirtilmiştir.



Şekil 1.5 Hauser tarafından geliştirilen deney düzeneği sistemi (Hauser, 1966)

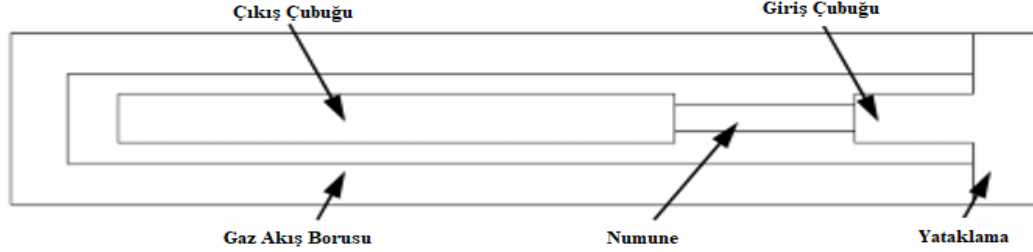
Nicholas (1981), bu çalışmada çekme deneyleri elde etmek için sadece sıkıştırma çubuğu sistemini kullanmanın bir yolunu sunmuştur. Bu sistemde karşılayan basınç çubuğuna ve iletilen çubuklar arasına geçirilen numune ve numune üzerine yerleştirilen rijit bir bilezik bulunmaktadır. Bu rijit bileziğin işlevi, ilk sıkıştırma dalgasının neredeyse numuneye dokunmadan bilezikten geçmesine izin vermesidir ve böylece sıkıştırma enerjisinin çoğu iletilen çubuğa aktarılması sağlanmaktadır. İletilen sıkıştırma dalgası, bir gerilme dalgası olarak yansıtılır ve bilezik gerilme yükünü destekleyemediği için yalnızca numuneyi yüklemek amacı ile geri yayılır. Bununla birlikte, bu tasarımda, numune ilk sıkıştırma dalgasına maruz kaldığında kaçınılmaz olarak deforme olmaktadır. Nicholas, Hopkinson bacinç çubuğu için en verimli yükleme yönteminin doğrudan gerilme yöntemi olduğunu açıklamaktadır. Yöntem için uygulanan sistem Şekil 1.6’da verilmiştir.



Şekil 1.6 Nicholas tarafından geliştirilen SHPB sistemi (Nicholas, 1981)

Harding ve Welsh (1983), fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüksek gerilme oranlarında test etmek için bir sistem geliştirmiştir. Mekanizmada (Şekil 1.7), sönümleyici olarak yataklamaya çarpan bir ölçüm çubuğu ve numuneyi yükleyen giriş

çubuğu kullanmıştır. Gerinim ölçerler sayesinde yükü ve aktarılan gerinimleri kaydedebilmektedir.

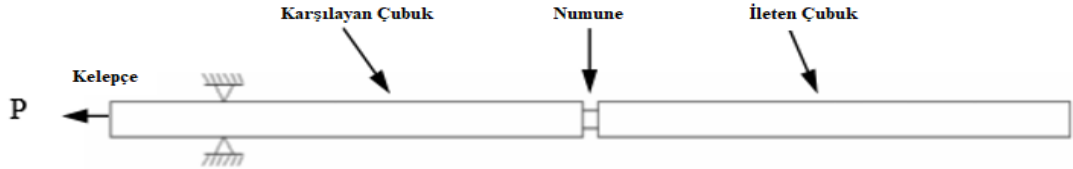


Şekil 1.7 Harding ve Welsh tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Harding ve Welsh, 1983)

Yokoyama ve Kishida (1986) tarafından, parçalı Hopkinson basınç çubuğu tekniği ile yüksek hızlı basınç testi için bilgisayar tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Mevcut test sistemi, kişinin çok kısa bir süre için istenilen malzemelerde güvenilir dinamik gerilim-gerinim verileri elde etmesini sağlamıştır. Düzenekte vuruş çubuğunun çarpma hızı ile ateşleme basıncı seçilerek kontrol edilmiş ve atış sistemi namlusunun ucuna yakın yerleştirilmiş ışık kaynaklarına sahip iki fotodiyot kullanılarak ölçülmüştür. Vurucu çubuğun geçişi, her bir fotodiyottan gelen ışığı kestiğinden dolayı bir elektrik sinyali üretilmiş ve sinyaller arasındaki zaman aralığı bir elektronik sayaç ile ölçülmüştür. Enstrümantasyon sistemi, 16 bitlik bir mikro bilgisayar (Nippon Electric PC-9801E), bir dijital depolama osiloskopu, veri ve programların depolanması ve alınması için bir mini disket sürücü, bir renkli ekran monitör, program listeleri için bir nokta vuruşlu yazıcıdan oluşmaktadır. Gerinim darbeleri, hem alıcı hem de verici çubuklarında 2 mm uzunluklu iki çift yarı iletken gerinim ölçer ile ölçülmüştür. Her bir çubuk üzerindeki bir çift gerinim ölçer, yalnızca doğrudan gerilme sonucunu kaydetmek için seri olarak bağlanmıştır. Gerilim ölçerlerinden gelen çıkış sinyalleri dijital depolamalı osiloskopa bir köprü devresi aracılığıyla gönderilmiştir. Gerinim ölçerlerinden gelen çıkış sinyalleri, dijital depolama osiloskobuna kaydedilip ardından veri analizi için bilgisayara aktarılmaktadır. Sonucunda işlenen veriler monitör ekranında bir dinamik gerilim-gerinim eğrisi biçiminde görüntülenmektedir. Bu test sisteminin temel avantajları gerçekleştirilmenin son derece basit ve hızlı olması ve kişinin test malzemeleri için tekrarlanabilir gerilme-gerinim verileri elde etmesine izin vermesi avantaj olmuştur. Bu tür bir test sisteminin, kullanışlılık ve parçalı Hopkinson

basınç çubuğu tekniği ile geleneksel dinamik basınç testine göre veri azaltma yönteminde önemli bir gelişme sağladığı kanıtlanmış olmuştur.

Staab ve Gilat (1991), doğrudan gerinim uygulanabilen bir Hopkinson cihazı tasarlamışlardır. Gerinim çubuğunda enerji depolamak için bir sıkıştırma mekanizması kullanılmıştır. Çubuğa, numunenin karşısındaki uçtan belli bir mesafede bir kelepçe yerleştirilmiştir. Sonuna statik bir çekme yükü uygulanmıştır ve kelepçe serbest bırakıldığında, çekme gerinimi dalgası numuneye doğru yayılmıştır. Bir kırılma pimi kullanarak, kelepçe tamamiyle serbest bırakılabilmektedir. Bundan önceki sistemlerde, yükleme darbesinin süresi, ateşleyici çubuğun uzunluğuna bağlı olmakta iken bu düzenekte ise avantaj olarak görülen yükleme darbesinin uzunluğunun, enerjinin başlangıçta depolandığı çubuğun uzunluğu ile ilişkili olmasıdır. Böylece, kelepçeyi yük uygulama noktasından daha uzağa yerleştirerek, darbenin süresi değiştirilebilir olmuştur. Önceki mevcut düzeneklerle sadece 100-200 mikrosaniye aralığında yükleme darbeleri üretilebiliyorken Staab ve Gilat tarafından kullanılan Şekil 1.8’de verilen bu düzenek için, yükleme darbeleri 500 mikrosaniyeden fazla üretilebilmektedir.



Şekil 1.8 Staab ve Gilat tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Staab ve Gilat, 1991)

Ramesh ve Narasimhan (1996), bir optik gerinim ölçüm sistemi kullanarak SHPB verilerini yayınlayan ilk araştırmacılar arasına girmiştir. LORD (Lazer Oklüzif Radyus Dedektör) sistemi olarak bilinen optik bir sistem geliştirmiştir. SHBP’de tipik olarak kullanılan silindirik numunenin çapındaki değişikliği ölçmek için; 3 miliwatt (mw) çıkış gücü üretebilen, 670 nanometre (nm) lazer diyot kullanmıştır. LORD sistemleri akademi dünyası için bu alanda istenilecek kalitede sonuçlar vermesine rağmen, bu çalışmadan sonra Hopkinson çubuğunda optik ölçüm yöntemlerinin kullanılmasını içeren çok az çalışma yapıldığı görülmektedir.

Bu tez çalışması ile de Ramesh ve Narasimhan'dan sonra bu alanda çok az çalışma olduğu saptanarak YHDTC için optik hız ölçüm sistemi kısmı ile ilgili araştırmaların devamı niteliğinde olacağı amaçlanmıştır.

Togami ve diğer. (1996), büyük genlikli darbeleri ölçen ivme ölçerlerin performansını değerlendirmek için parçalı bir Hopkinson çubuk tekniği geliştirmiştir. Gerilim darbesi bir alüminyum çubuk içinde yayılmaktadır ve çubuğun ucundaki bir tungsten veya çelik disk ile etkileşime girmektedir. Bir kuvars mastarı ile alüminyum çubuk-disk arayüzündeki gerilim ölçülmektedir ve bir ivme ölçer ile diskin serbest ucundaki ivmeyi ölçmektedir. Diskin enine kesit alanı ve kütlesi bilindiğinden, rijit diskin ivmesi gerilim ölçümü ve Newton'un ikinci kanunundan hesaplanmaktadır.

Kaiser (1998), yeni bir dispersiyon düzeltme tekniği ve gerinim darbelerini hizalamak için yeni bir sayısal yöntem içeren deneysel sonuçlarını sunmuştur. Gerinim ölçer teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, gerinim ölçer ile ilgili hataları büyük ölçüde azaltan yeni ızgara desenleri ve algılama elemanı malzemeleri eklenmiştir. Bu hatalar arasında yanıl gerilme hassasiyeti, termal hassasiyet ve histerisiz etkileri bulunmuştur.

Buraya kadar verilen literatür taramasında genel olarak sıfırdan YHDTC'ler olarak adlandırılan özel adlandırma ile SHPB test cihazlarının tasarımsal gelişmeleri verilmiştir. Bu aşamadan sonra ise 21. yy 'da yakın geçmişten günümüze kadar bu sistemler üzerindeki alt sistemsel parçaların gelişmelerinden ve detayları incelenerek aktarılmıştır.

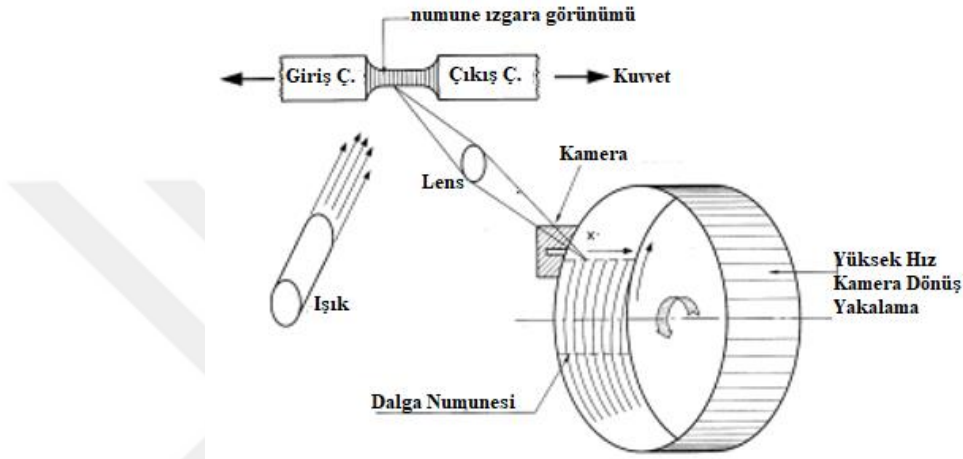
Swantek (2000), tarafından geliştirilen sistemde numune deformasyonunu doğrudan ölçmek için, test numunesinin çapı boyunca yaklaşık 250 mikrometre genişliğinde dikey bir ışık çizgisi üretilecek şekilde SHPB'ye 670 nm dalga boyunda bir yarı iletken lazer diyot sabitlenmiştir. Numunenin arkasına yerleştirilen bir toplayıcı mercek, numunenin çapı tarafından 25 MHz'lik bir fotodetektör tarafından toplanacak ışığı yeniden odaklamak için konumlandırılmıştır. Bu nedenle, darbe iletimi sırasında numune çapındaki değişiklikler, numune tarafından daha fazla ışığın

kapatılmasına ve fotodetektör tarafından daha az enerjinin toplanmasına neden olmaktadır. Fotodetektör tarafından toplanan ışık daha sonra bir dijital depolama osiloskopu ile kaydedilmeden önce bir voltaj çıkışına dönüştürülmektedir. Optik ölçüm sistemi, geleneksel gerinim ölçer cihazlarından daha fazla bant genişliği ve daha fazla çözünürlüğe sahiptir. Bu artan bant genişliği ve çözünürlük, numunenin hem elastik hem de plastik davranışının tanımlanmasını sağlamıştır. Ek olarak, numunenin yükleme ve boşaltma anları da optik gerinim sinyalinde açıkça görülebilmektedir. Geliştirilen bu sistem ile giriş çubuğu gerinim ölçeri, giriş çubuğu dağılımı ve giriş çubuğu gerinim ölçeri ile ilişkili elektriksel ve mekanik hataların nasıl engellenebileceği belirtilmiştir.

Chen, Lu ve Zhou (2000), tarafından gerinim ölçümünde geleneksel parçalı Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) kadar hassas olan dinamik deneysel bir teknik geliştirilmiştir. Geleneksel sistemdeki iletim çubuğuna monte edilmiş bir yüzey gerinim ölçer yerine, yumuşak malzemeli bir numuneden az iletilen kuvvet profilini doğrudan ölçmek için yüksek mukavemetli bir alüminyum alaşımının iletim çubuğunun ortasına bir piezoelektrik kuvvet dönüştürücü yerleştirilmiştir. Bu sistem ile yapılan gerilim ölçümlerinin geleneksel çelik çubuklardan üç kat daha hassas olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar bu yöntemin, elastomerik malzemeler ve yüksek gerinim oranlarında köpükler gibi düşük mekanik empedans ve düşük basınç dayanımına sahip malzemelerin dinamik basınç gerilme- şekil değiştirme tepkilerini belirlemede etkili ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Verleysen ve Degrieck (2004), Şekil 1.9’da verilen tek eksenli darbe yüküne maruz kalan bir numunenin yer değiştirmelerini ve deformasyonlarını elde etmek için bir teknik geliştirmiştir. Deney sırasında numuneye bağlı bir hat ızgarasının deformasyonu bir şerit kamera kullanılarak yakalanmıştır. Deney sırasında, kameranın tamburu sabit bir hızda dönmekte ve deforme olan hat ızgarasının görüntüsü hareketli filme yansıtılmıştır. Böylece numune deformasyonunun oluşum aşamaları filme kaydedilmiştir. Kaydedilen deforme edici ızgaradan numune yer değiştirmeleri, numune ızgarası ve sanal bir referans ızgara arasındaki etkileşime dayalı olarak gelişmiş bir sayısal algoritma kullanılarak otomatik olarak türetilmiştir. Deformasyon

işleminin her anında, referans ızgarasının aralığı, mümkün olan en yüksek doğruluk ve hassasiyet garanti edilecek şekilde seçilmiştir. Bu nedenle, deformasyon genliğinde büyük değişikliklere izin verilmekte ve bu geliştirilen teknik ile çeşitli malzemeler için uygulanabilir olmuştur. Temassız ölçüm tekniği, numunenin tüm uzunluğu boyunca ve deneyin tüm süresi boyunca numune deformasyonu hakkında yüksek çözünürlüklü, niceliğe bağlı olarak bilgi vermektedir.



Şekil 1.9 Verleysen ve Degrieck. tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Verleysen ve Degrieck, 2004)

Gilat, Schmidt ve Walker (2008) tarafından, ticari görüntü yazılımı ve iki dijital yüksek hızlı kamera kullanarak, Hopkinson deneylerinde gerinim ve gerinim oranlarını ölçülmüştür. Numunelerin yüzeyine rastgele bir nokta deseni uygulanmıştır. Görüntü korelasyon algoritması, üst üste binen sanal gösterge kutularının bir alanını tanımlamak için nokta modelini kullanmıştır ve her bir gösterge kutusunun merkezinin 3D koordinatları ile her çerçevede belirlenmiştir. Koordinatlar daha sonra numunenin yüzeyi boyunca gerilmeleri hesaplamak için kullanılmıştır. Görüntü korelasyon yöntemi ile belirlenen gerinimler, çubuklardaki elastik dalgaların analizi sonucunda belirlenenler ve numunelere yerleştirilen gerinim ölçerler ile ölçülen gerinimler ile karşılaştırılmıştır. Sıkıştırma testlerinde, görüntü korelasyonu, çubuklardaki dalgalardan ve doğrudan numune üzerine yerleştirilen gerinim ölçerlerle ölçülen gerinimlerden belirlenen ortalama gerinimle uyumlu bir deformasyon göstermiştir. Çekme testleri, numune geometrisi ve özellikleri yapılan testin sonucunu etkilemektedir. Numunenin deforme olan bölümünün iyi tanımlandığı ve deformasyonun sabit olduğu testlerde, görüntü korelasyon tekniği ile ölçülen

gerinimler, parçalı Hopkinson çubuk dalga kayıtlarından belirlenen ortalama gerilim ile uyumlu olduğu bilgisi elde edilmiştir.

Chen, Huang, Xia ve Lu (2009) tarafından, modifiye edilmiş bir Kolsky çubuk sistemi geliştirmiştir. Bu sistemde numunenin deformasyonunu doğrudan ölçmek ve çubuklara gömülü bir çift piezoelektrik dönüştürücü ile numunedeki düşük genlikli dinamik yükleme streslerini izlemek için bir lazer boşluk ölçer (LGG) kullanılmıştır. LGG, iki çubuk-numune arayüzü arasındaki mesafeyi, yani numunenin uzunluğunu ölçmektedir. LGG'nin çıkışı voltajdır ve numune uzunluğu ölçümlerini elde etmek için kalibre edilmiştir. Gerilim daha sonra numune uzunluğundaki değişimin numunenin başlangıçtaki uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Alınan sonuçlar, bu yeni yöntemin, düşük mekanik empedans ve düşük basınç dayanımı olan malzemelerin dinamik basınç gerilme-uzama tepkilerini belirlemede etkili ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Sharma ve diğer. (2011) tarafından kurulan sistem, sıkıştırılmış nitrojen gazı kullanarak vurucu çubuğa darbe hızı veren gaz tabancasından oluşmaktadır. Darbe, giriş çubuğunda sıkıştırıcı bir etki oluşturmaktadır ve bu daha sonra giriş ve iletim çubuğu arasına sıkıştırılan numuneye iletilmektedir. Bu çubuklar, güç ve düzlük gereksinimlerini karşılamak için özel olarak tasarlanmıştır. Veriler, gerilim ölçerler ve yüksek hızlı veri toplama sistemi ile elde edilmektedir. Oluşturulan veriler, numunede stres-gerilim elde etmek için işlenmektedir. Bu kurulum, $100s^{-1}$ ile $10000s^{-1}$ gerilim oranı aralığında ve $400^{\circ}C$ sıcaklığa kadar malzemeyi test etmek için kullanılabilir. Düzeneğin giriş, iletim ve kilit çubukları, hepsi aynı 13 mm çapa sahip olan 350 dereceli (akma dayanımı 2000 MPa) kademeli bir çeliktir. İletim ve aktarım çubuklarının uzunluğu 1,3 m'dir. Çubukların düzlüğü 0,1 mm / m'dir. 0,1 ile 0,5 m arasında değişen uzunlukta beş kilit çubuğu vardır. Her çubuğun merkezinde, çapsal olarak zıt taraflara iki gerilim ölçer bağlanmıştır ve bir yarım Wheatstone köprüsüne elektriksel olarak bağlanmıştır. Wheatstone köprüsünün zıt kollarındaki ölçerler, bükülme etkisini ortadan kaldırmaya yardımcı olmaktadır. Çubuklar, 0,1 mm/m düzlükte çelik I-kiriş üzerine kenetlenen çelik plakalar üzerinde pirinç burçla desteklenmektedir. I-kirişler, ayarlanabilir dengeleme pedlerine sahip ayaklar üzerinde

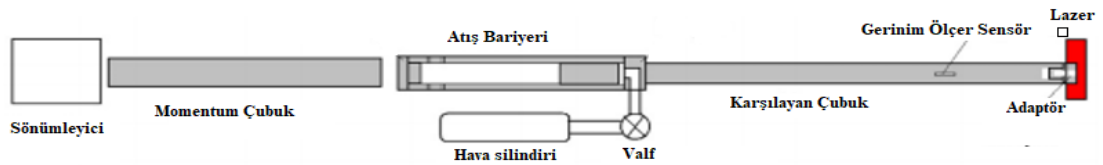
durmaktadır. I-kirişler, tek bir seviyeli yüzey sağlamak için birbirine kenetlenir. Giriş ve iletim çubukları, pirinç burç boyunca uzunlamasına yönde serbestçe hareket etmektedir. İletim çubuğunun sağ ucundaki bir ön blok, durdurucu görevi görmektedir. SS304, soğuk işlenmiş bakır, SA516 Gr. 70 karbon çeliği ve zirkonyum için yüksek gerilme hızında iyi sonuçlar elde edilmiştir. Veri toplama sistemi aracılığıyla elde edilen verilerin sonradan işlenmesi yoluyla test edilen malzemeler için gerçek gerilme ve gerçek gerilme grafikleri oluşturulmuştur. Farklı malzemeler için şekil değiştirme hızı duyarlılığının farklı olmasına rağmen, test edilen malzemelerin akış gerilmelerinin gerilme hızına duyarlı olduğu görülmüştür.

Avinadav, Ashuach ve Kreif (2011) tarafından, fiber bazlı hız ölçer kullanarak çubukların hızlarını ölçen alternatif bir yaklaşım önermiştir. Yüzeyden bir lazer ışını yansıtarak çubuğun yüzey hızının temassız bir ölçümü elde edilmektedir. Kaynak ve geri dönen ışık birleştirilerek, bir çubuğun hız geçmişinin çıkarılabileceği zamanla değişen bir girişim modeli oluşturulmaktadır. Bu yöntemler hızı ölçerek, kütle hareketi ve elastik deformasyon nedeniyle hız bileşenlerinin bulunduğu bir doğrudan çarpma deneyi sırasında, vurucu çubuktan veri elde etmeye çok uygun hale getirmektedir. Hız değerleri, kısa süreli Fourier dönüşümü ve faz tabanlı analizden hesaplanmaktadır ve dinamik gerilim-gerinim eğrisi doğrudan ölçülen hızlardan türetilmektedir. Sonuçlar geleneksel gerinim ölçer ölçümleriyle elde edilen veriler ile örtüşmektedir. Bu yöntem çubuk darbelerinden etkilenmemekte, bu da bulunan bu yöntemi gerinim ölçerlerinden daha sağlam ve güvenilir kılmaktadır.

Casem, Grunschel ve Schuster (2011), küçük çaplı Kolsky çubuk deneyleri için optik ölçüm tekniklerinin kullanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Amaç, çubuk boyutları küçüldükçe pratik olmayan fakat yaygın olarak kullanılan gerinim ölçerlerle olan ihtiyacı ortadan kaldıracak yöntemler geliştirmek olmuştur. Kullandıkları temel yaklaşım, basınç-kesme plakası darbe deneylerinde yaygın olarak kullanılan ölçüm cihazı tabanlı yöntemleri yüksek hızlı Kolsky bar deneylerine uyarlamaktır. Verici çubuğunun serbest ucunun hareketini ölçmek ve iletilen darbenin bir ölçümünü sağlamak için bir Normal Yer Değiştirme Ölçüm Cihazı (NDI) kullanılmıştır. Benzer şekilde, başlangıçtaki ve yansıyan darbeleri, giriş çubuğunun orta noktasında bir

kırınım ızgarası kullanan bir Çapraz Yer Değiştirme Ölçüm Cihazı (TDI) ile ölçülür. Her iki teknik de 1,59 mm çapındaki çelik basınç çubuklarına uygulanır. Bu yöntemlerin daha küçük sistemlere olası uygulamaları da düşünülmüş fakat bu çalışmada uygulanamamıştır.

Song, Antoun, Connelly, Korellis ve Lu, (2011) tarafından Kolsky çubuğu yeniden tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu yeni tasarımda dinamik çekme yükü oluşturmak amacıyla tabanca namlusunun açık ucuna takılı başlığa vurmak için sağlam bir vurucunun ateşlendiği bir sistem kullanılmıştır. Buradaki ateşleme namlusu, yükleme cihazının bir parçası olarak işlev görmektedir. Bu tasarım, ateşleme namlusuna takılı olan olay çubuğunda güvenilir ve tekrarlanabilir yükleme darbeleri üretilmesini ve darbe şekillendirme tekniklerini kolayca uygulanmasını sağlamaktadır. İletim çubuğunda gerinim ölçerler tarafından ölçülen sinyallerin numune gerinim ölçümü için yeterince hassas olmadığı görülmüştür. Bunun yerine, gelen çubuk ucunun yer değiştirmesini doğrudan ölçmek ve ardından iletim çubuğu gerinim sinyali ile numune gerilimini hesaplamak için yüksek frekans yanıtı bir lazer ışını ölçüm sistemi kullanılmışının daha iyi sonuçlar elde edilmesinde kullanılabileceği Şekil 1.10 ile açıklanmıştır.



Şekil 1.10 Song, Antoun, Connelly, Korellis, Lu, tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Song, Antoun, Connelly, Korellis ve Lu, 2011)

Şimşek tarafından (2011) “Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu Deney Düzeneği Kurulumu” adlı tez ile İTÜ tarafından malzemelerin dinamik yükler altında yüksek deformasyon hızlarına çıkılarak deneme numunesinde oluşacak olan tepkilerin analiz edilmesi amacı ile test düzeneği kurulmuştur. Deneyde numune olarak 6063 alüminyum ve C377 pirinç malzemeleri kullanılmıştır. Her iki malzeme numunesinde meydana gelen akma gerilmeleri, gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Sonuç olarak SHPB Test cihazında maksimum $3369s^{-1}$ hıza

çıkılabilmiş ve başarılı bir kurulum gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek hızlar için numune formlarında bazı değişikliklere gidilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ülkemizde gerçekleştirilen bu tasarım 2011 sonrasında da bu tez ile de birçok çalışmaya referans niteliğinde olmuştur.

Gerlach, Kettenbeil ve Petrinic (2012) tarafından tasarlanan 10 mm çapında bir Hopkinson germe çubuğu kullanılarak yüksek hızlı gerilme testleri gerçekleştirilmiştir. Giriş çubuğu Ti6Al4V alaşımından yapılırken çıkış çubuğu bronz alaşımıdır. $700s^{-1}$ ile $3000s^{-1}$ arasında geniş bir gerinim oranı aralığı elde etmek için 0,5 m ve 2,7 m iki uzunluğa sahip Ti6Al4V alaşımından yapılmış kilit çubukları kullanılmıştır. $100^{\circ}C$ ve $200^{\circ}C$ sıcaklıktaki dinamik gerilme deneyleri, yüksek sıcaklığın gerilme tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir indüksiyon ısıtıcısı kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Vurucu çubuk, sıcaklık hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra ateşlenmiştir ve bir dakika boyunca stabil kalmıştır. Yüksek gerilim oranlarındaki deneyler, 924×748 piksel görüntü çözünürlüğüne sahip yüksek hızlı Şekil 1.11'deki Kirana kamera kullanılarak, 1-5 $\times$ 106 fps arasındaki çerçeveleme hızlarında ve 2 us objektif hızında kaydedilmiştir. Kirana kameraya birkaç uzatma tüpüne sahip Tamron SP60mm Makro lens monte edilmiştir. Endüksiyon bobin telleri arasındaki numune ölçme bölümü kamera merceğinin önündedir, dolayısıyla yüksek hızlı deformasyon süreci kaydedilmiştir.



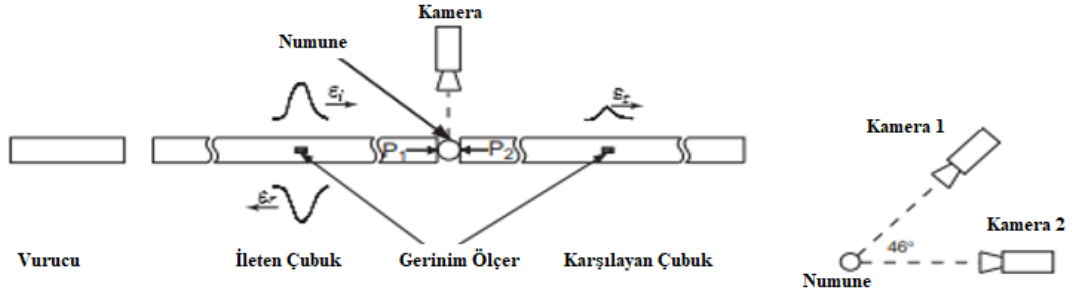
Şekil 1.11 Gerlach çalışmalarında kullanılan Kirana kamera lens (Gerlach, Kettenbeil ve Petrinic, 2012)

Malachowski, Baranowski, Gieleta ve Damaziak (2014), dalga etkileri araştırmasına özellikle dikkat çekerek SHPB aygıtının çalışması sırasında modelleme ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Testler sırasında ortaya çıkan ana sorunlardan biri, sonuçları olumsuz etkileyen gerinim ölçerler tarafından kaydedilen salınımlardır. Bu nedenle, SHPB'nin iletim çubuğundaki tepe şeklinin herhangi bir bozulma olmaksızın mümkün olduğu kadar “pürüzsüz” elde edilmesi istenir. LS-Dyna yazılımından seçilen

iki farklı bakır şekillendirici modelleme yöntemi ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir: tipik sonlu eleman formülasyonu (Lagrange) ve daha sofistike bir Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (SPH) yöntemidir. Çalışmalar sonucunda şekillendiricinin genel deformasyonu elde edilmiştir ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, asıl vurgu dürtü ölçümü ve testine verilmiştir. Sonuçlar, sayısal modellemenin darbe şekillendirici araştırmalarıyla SHPB’de çok yararlı olabileceğini göstermektedir.

Fu, Tang, Li ve Tan (2014) tarafından, Hopkinson basınç çubuklarındaki malzemelerin mekanik özellikleri için yeni bir temassız ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Çubukların yüzeylerine monte edilen geleneksel gerinim ölçerler yerine, fiber mikro yer değiştirme ölçüm sistemi kullanarak doğrudan arayüz hızını ölçmek için çubukların ucuna iki kapak monte edilmiştir. Bu yöntemin temel özelliği, çubukların ortasında yansıyan ve iletilen gerinim yerine çubuklar ile numune arasındaki arayüz hız profillerinin belirlenmesidir. Bu teknik kullanılarak, entegre gerinim uzama tepkileri belirlenebilir. Bu deneysel teknik, SHPB test simülasyonu ile doğrulanmıştır ve sonuçlar yeni deneysel tekniğin SHPB testindeki dinamik davranışa uygulanabileceğini göstermiştir.

Huang, Liu ve Xia, (2014) dinamik yük altında taş malzemenin parçalanma davranışını araştırmak ve dinamik top sıkıştırma testini gerçekleştirmek için yüksek hızlı kameralarla Şekil 1.12’deki düzenek ile birlikte parçalı Hopkinson basınç çubuğu kullanmıştır. Bu testte birkaç yeni teknik benimsenmiştir: atalet etkisinden kaçınmak için darbe şekillendirme, numune üzerindeki ikinci yüklemeleri önlemek için momentum yakalama tekniği ve numune parçalarının kinetik enerjisini belirlemek için yüksek hızlı kameralar kullanılmıştır. Elastikiyet teorisi kullanılarak, ilk olarak yükleme hızı ve dinamik dolaylı gerilme mukavemeti hesaplanmıştır. Moment yakalama tekniği ve yüksek hızlı kameralar yardımıyla her numune için yüzey enerjisi belirlenmiştir. Numunenin kinetik enerjisini hesaplamanın ideal yolu, kırılmadan sonra tüm parçaların hızını ölçmektir, ancak bu sürecin karmaşık olması nedeniyle hesaplamaların tam olarak doğruyu vermesi imkansızdır. Burada, kırılmadan sonra numunenin kinetik enerjisini tahmin etmek için optik bir yöntem kullanılmıştır.



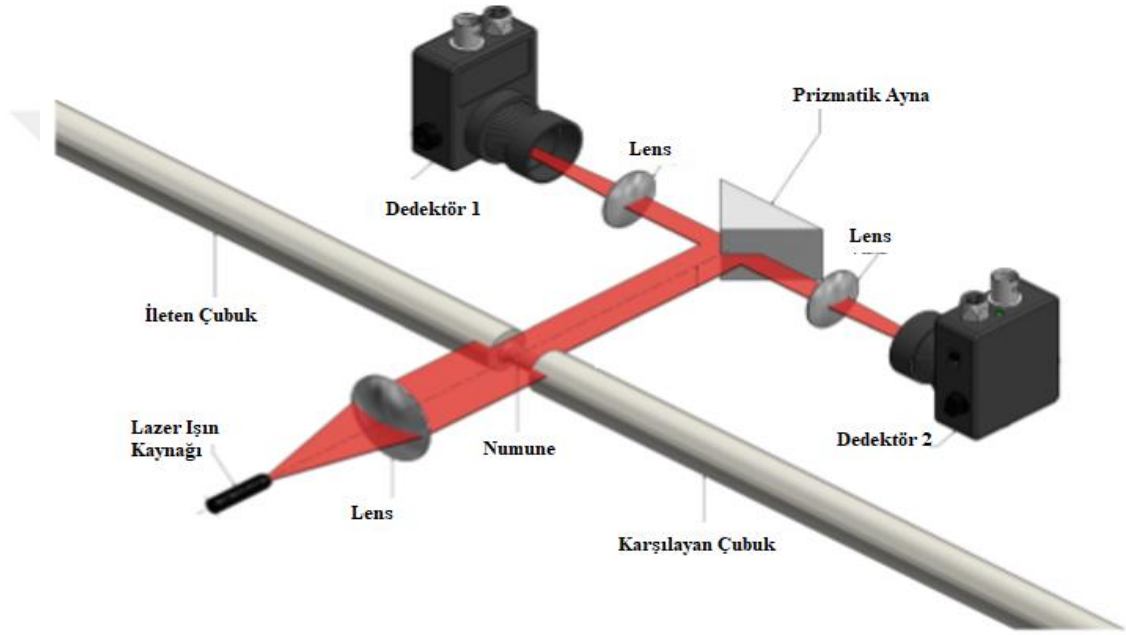
Şekil 1.12 Huang, Liu ve Xia tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Huang, Liu ve Xia, 2014)

Elastikiyet teorisi ile ilgili yapılan hesaplamalar bu tez çalışmasında da ikinci bölümde verilmiştir.

Nie, Song ve Loeffler (2015) tarafından, Hopkinson çubuğu deneylerinde gerilimi istenilen derecede yüksek ve ayarlanabilir çözünürlüklerle ölçmek için bir lazer ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik, büyük gerinim ölçümü kapasitesinden ödün vermeden son derece hassas küçük gerinim ölçümleri sağlamaktadır. Giriş ve iletim çubukları arasındaki boşluktan koşullanmış levha lazer taraması yapmak için bir Kolsky çubuk düzeneğine 50 mW'lık bir çizgi lazer ve optik lens sistemi eklenmiştir. Geçişli lazer ışını dik açılı prizma aynası kullanılarak iki bağımsız bölüme ayrılmıştır. Dik açının tepe noktası, lazeri iki zıt yöne yönlendiren sanal bir referans çizgisi görevi görmektedir ve her bölüm, yalnızca giriş veya iletim çubuğu ucunun hareketini izlemektedir. Bu tasarım, iki lazer kanalı arasındaki olası etkileşimi önlemiştir ve iletim çubuğu - numune ve numune - iletim çubuğu arayüzlerindeki yer değiştirme ölçümlerini bağımsız hale getirmiştir. Her bir sinyal daha sonra bir lazer detektörü (Thorlabs PDA 36A) ile toplanmıştır. Sonuçlar, lazer ekstansometre tekniği ile ölçülen dinamik çekme gerilmesi-gerinim eğrisinin elastik kısmının, hem küçük hem de büyük numune deformasyon ölçümleri için yeteneklerini göstererek, doğrudan numune gerinim ölçer ölçümüyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'te iki adet karşılıklı dedektör olarak belirtilen Thorlabs PDA 36A görseli verilmektedir.



Şekil 1.13 Nie, Song ve Loeffler. tarafından kullanılan dedektör (Thorlabs, 2021)

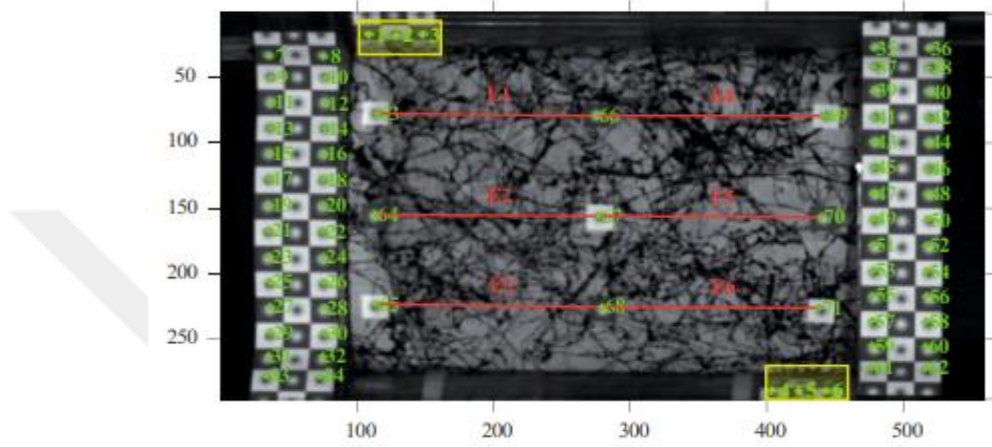


Şekil 1.14 Nie, Song ve Loeffler. tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (Nie, Song ve Loeffler, 2015)

Peroni, Caverzan ve Solomos (2016) tarafından, büyük ölçekli dinamik testlerin gerçekleştirilmesi için Hopkinson basınç çubuğu tekniklerine dayanan yeni bir aparat geliştirilmiştir. Düzenekte ikiz çubuktan oluşan özel bir kurulum kullanılmıştır. İkiz çubuklar, uçlarında büyük numunelerin yerleştirilebileceği güçlü çelik plakalarla monte edilmiştir. Önerilen bu aparat sayısal simülasyonlar ve deneysel testlerle dikkatlice tasarlanmış ve kalibre edilmiştir. Bulunan sonuçların güvenilirliğini kontrol etmek için farklı ölçüm teknikleri uygulanmıştır. Sinyallerin klasik Hopkinson çubuk analizi, uygun düzeltmelerle yapılmış ve optik ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Özellikle, Dijital Görüntü Korelasyonu, Hopkinson çubuk analizinden gelen yer değiştirme ve gerilme bilgilerini kontrol etmek ve tamamlamak için kullanılmıştır.

Böylece, DIC ve Hopkinson çubuk analizini birleştirerek, incelenen malzemenin gerilme ve gerinim eğrilerinin doğruluğunu artırmak mümkün hale gelmiştir.

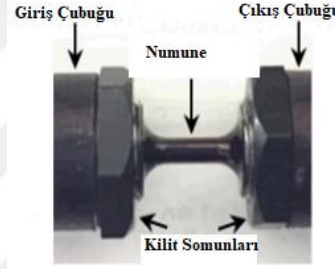
DIC yani dijital görüntü korelasyonu Şekil 1.15'te verilen sistem görüntüsü optik olarak çatlak oluşumunu takip etmede kullanılmaktadır.



Şekil 1.15 Peroni, Caverzan ve Solomos tarafından geliştirilen korelasyon görüntüsü (Peroni, Caverzan ve Solomos, 2016)

Qiu, Loeffler, Nie ve Song (2018) tarafından, giriş ve iletim çubuğu arayüzlerinin yer değiştirmesini doğrudan ve bağımsız olarak izlemek için bir üç kanallı ışın demetli lazer ekstansometre tekniği geliştirilmiştir. Giriş çubuğu tarafında çift kanallı bir konfigürasyon benimseyerek, bu lazer ekstansometrenin çözünürlüğü ve ölçüm aralığı, hem küçük hem de büyük gerilimlerde yüksek hassasiyetli ölçüm sağlamak için iki kanal arasında koordine edilebilmektedir. İletim çubuğu tarafında, yüksek çözünürlükte iletim çubuğu yer değiştirmesini ölçmek için giriş çubuğunda kullanılabilecek bir güçlendirilmiş kanal benimsenmiştir. Bu yeni tasarımla, yer değiştirme ölçümü için yaklaşık 500 nm'lik bir maksimum çözünürlük elde edilebilmektedir; bu, 6,35 mm uzunluklu bir örnekte % 0,0079'luk bir gerinime karşılık gelmektedir. Yeni üç kanallı ışın demetli lazer ekstansometre tekniğine dayanarak, numune ve çubuklar arasındaki dış bağlantısını geliştirmek için kilit somunları kullanmanın etkinliği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kilit somunları kullanılmadan, yansıyan dalga ile hesaplanan gerilim-gerinim eğrisinin lazer ekstansometre sinyalleri ile hesaplanandan

daha düşük bir modüle sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun başlıca nedeni, numune ve çubuklar arasındaki zayıf dış geçmesidir. Kilit somunları 15,6 N m'lik bir torka uygulandıktan sonra, yansıyan dalga ile hesaplanan gerilme-gerinim eğrisi, hem küçük hem de büyük gerilimlerde lazer ekstansometre sinyalleri ile hesaplanan ile hemen hemen aynıdır. Bu kanıta dayanarak, kilit somunlarının, numune deformasyon ölçümünü iyileştirmek için metal numunelerin Kolsky gergi çubuğu testinde önemli bir değişiklik olduğuna inanılmaktadır. Bu tekniğin bir göstergesi olarak, 304L paslanmaz çelik numuneler test edilmiştir ve sonuçlar, dinamik çekme gerilme gerinim tepkisinin hem elastik hem de plastik deformasyonlar için yüksek çözünürlükte ölçüldüğünü göstermiştir.



Şekil 1.16 Qiu, Loeffler, Nie ve Song tarafından geliştirilen kilit somunları (Qiu, Loeffler, Nie ve Song, 2018)

Brizard (2019), dalga hızını (C_0), dalga hızındaki belirsizliği $u(C_0)$ ve SHPB ölçüm çubuklarında Poisson oranını (ν) belirlemek için bir yöntem sunmuştur. Bölünmüş Hopkinson basınç çubuklarındaki gerilme dalgalarının işlenmesinden sonra, numunedeki gerilme-şekil değiştirme bilgisini elde etmek için, ölçüm çubuklarındaki karakteristik dalga hızı (C_0) bilgisi gerekmektedir. C_0 değerindeki ölçüm belirsizliği değerlendirilmelidir ve C_0 'ın belirlenme şekline bağlı olan bu belirsizlik en aza indirilmelidir. Çünkü numunedeki son gerilme ve şekil değiştirme belirsizliği üzerinde etkisi bulunmaktadır. SHPB ile ölçümde kalite bağlamında, numunedeki gerinim ve gerinim oranındaki belirsizliği değerlendirmek önemli bir ön adımdır. Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda 2018 / 205 nolu BAP projesinin bir kısmını kapsayan bu tez projesinde başlangıçta düşük hızlardaki test cihazları için denemeler yapılmış sonrasında maksimum çıkılacak hız değerleri için gerekli aşamalar izlenmiştir.

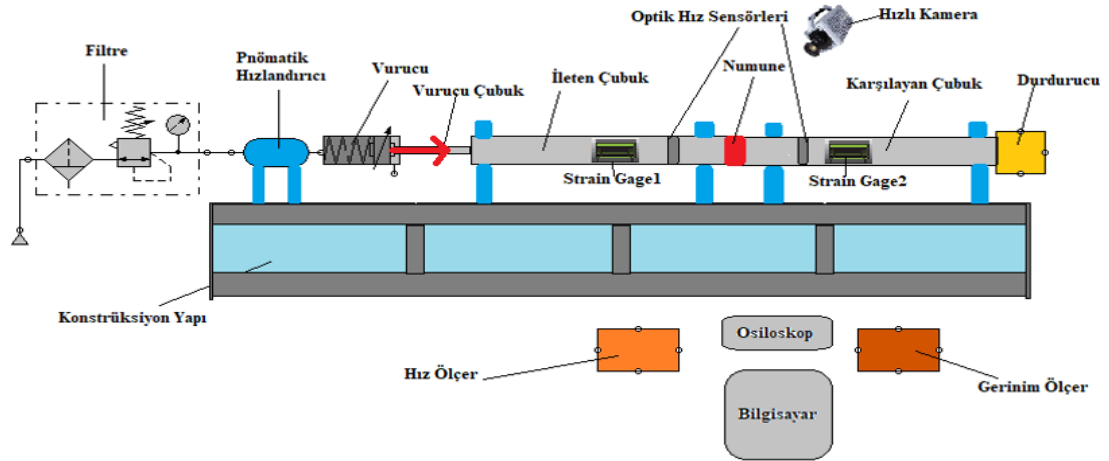
BÖLÜM İKİ

YHDT CİHAZLARINDA MATEMATİKSEL MODELLEME VE HESAPLAMALAR

2.1 Matematiksel Modelleme ve Gerekli Hesaplamalar

Yüksek hız darbe test cihazlarının matematiksel modellemesinden önce SHPB gibi test sistemlerinin bileşenlerinden ve kısaca çalışma mantığından bahsetmek gerekmektedir. Böylelikle yapılan hesaplamaların nerelerde kullanılacağına dair bilgiler edinilmiş olmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 1.17’de görüleceği üzere sistem bileşenlerini sınıflandırmak gerekir ise;

- İlk olarak girişte pnömatik hızlandırıcı olarak tanımlanan çubukların içerisinden gönderilen gaz karışımı bulunmaktadır.
- Sistem üç ana çubuktan oluşmaktadır. Bunlar; Vurucu çubuk, giriş çubuğu bir diğer adı ile ileten çubuk ve son olarak çıkış yani karşılayan çubuk olarak adlandırılmıştır.
- Sistemde hız kapısı olarak belirtilen bölgeler bu tezde üçüncü bölümde bahsedilecek olan optik sensörler yardımı ile hızın ölçümünü sağlayan ölçüm sisteminin konumlandırıldığı yerdir.
- Bir diğer ölçüm sistemi ise resimde gerinim ölçer algılayıcısı olarak belirtilmiş olan strain-gage’lerin konumlandırıldığı ve gerinim ölçümünün yapıldığı kısımdır.
- Ek olarak test yapılan numune yani deney malzemesi, vuruş hızının doğrulanması için hızlı kamera ve test sırasında oluşacak olan ısınma soğuma işlemi için gerekli sistem ile vuruş sonrası çubukların en ucunda stopper görevi gören durdurucu sistem yer almaktadır.



Şekil 1.17 Yüksek hız darbe deney düzeneği şeması

Yüksek hız darbe test cihazlarında tek boyutlu dalga yayılımı elde edilmesi yapılacak hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır. Bu da deney düzeneğinde kullanılan vurucu çubuk, iletken çubuk ve karşılayan çubuk olarak adlandırılan sistem çubuk boyutlarının uzunluğuna ve yapısına bağlı olarak değişmektedir. Deney sisteminde sonuçların eldesi ve analizi için gereken matematiksel hesaplamalar mevcuttur. Bu tez çalışmasının bu bölümünde yüksek hız darbe test cihazlarında kullanılan hesaplamalar aktarılmış ve literatürde tespit edilen bazı hatalar düzeltilerek verilmiştir.

Numunedeki bu gerekli hesaplamalar şekil değiştirme, gerilme ve deformasyon hızı hesabı olmuştur (Şimşek, 2011).

2.1.1 Elastikiyet Teorisi

Bu noktada elastikiyet teorisinin bir diğer tabiri ile Hooke kanununun ne olduğunu ve YHDT cihazlarında hangi aşamada kullanılabileceğini kısaca açıklamak gerekir ise;

Robert Hooke günümüzden yaklaşık üç yüzyıl öncesinde kendi adı ile anılan Hooke kanununu ilk olarak yayların uzaması üzerine yapmıştır. Bu çalışmada;

- F = Uygulanan kuvvet
- x = Oluşan esneme yani uzama miktarı

- k = Oran sabiti olarak belirtilmiştir.

$$F=kx \quad (2.1)$$

Formülünden uygulanan kuvvet ile uzama miktarı arasındaki orantı ilişkisi kurulabilmiştir. Yaylar üzerine başlanan bu deneyden yola çıkılarak silindir forma sahip çubuklar üzerinde yani YHDT cihazlarındaki ileten ile karşılayan çubukların yer değiştirme hesabı için gereken hesaplamalar kullanılmıştır. Fakat burada kuvvetin geliş yönünden kaynaklı olarak uzama yani esnemeyi çubuk üzerinde oluşan gerilmeden yola çıkılarak gerinim ve gerilim arasındaki ilişkiyi aşağıdaki formül ile belirtebiliyor olmaktadır;

Test Çubuklarında;

- σ = Gerilme
- ε = Şekil değiştirme
- E = Elastisite (Young) modülünü yani sabitini ifade etmektedir.

Hooke kanunu ile olan ilişkisi Leonhard Euler ve sonrasında geliştiren Thomas Young tarafından aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir;

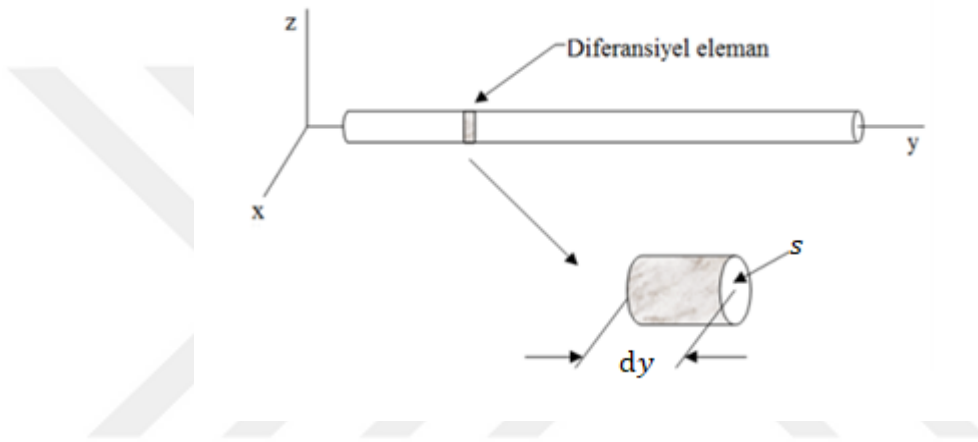
$$\sigma=E\varepsilon \quad (2.2)$$

Burada malzemenin yüksek bir Young modülüne yani E değerine sahip olması, elastik olarak esnemesinin zor olduğunu, düşük bir değere sahip olması ise nispeten kolayca esneyebileceğini ifade etmektedir.

2.1.2 Gerilme, Şekil Değiştirme ve Deformasyon Hızı Hesabı

2.1.2.1 Bir Çubuğun Hareket Denklemini

YHDT cihazlarında test edilecek numune üzerinde gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon hızı hesabı gibi bilinmesi gereken değerlerin elde edilmesinde aşağıda açıklaması verilen hesaplamalar kullanılmaktadır (Şimşek, 2011).



Şekil 2.1 Basınç çubuğu üzerindeki diferansiyel eleman (Şimşek, 2011)

Şekil 2.1’de gösterildiği üzere;

- dy = diferansiyel elemanın uzunluğu
- s =kesit alanını ifade etmektedir.

Test öncesi diferansiyel eleman bir denge halinde durağandır. Şekil 2.2’de ise diferansiyel elemanın test sonrası F_1 ve F_2 kuvvetlerinin basma kuvveti uygulandığı ifade edilir ise (Şimşek,2011);

$$\sigma = \frac{F}{s} \quad (2.3)$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.4)$$

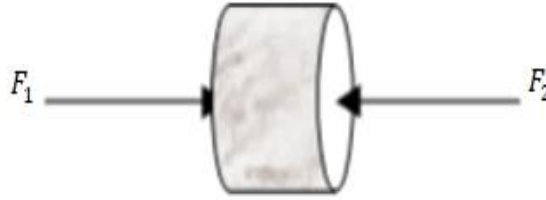
Young modülü ile hooke modülündeki sigmaları birleştirirsek;

$$F = E \varepsilon s \quad (2.5)$$

Denklemini elde edilir burada şekil değiştirme yerine yer değişimi değerlerinin çok küçük varsayılmasından dolayı kısmi olarak verilmiştir;

Denklem 2.6’ da belirtilen j değeri kuvvet 1 ve kuvvet 2 için verilen değerlerdir.

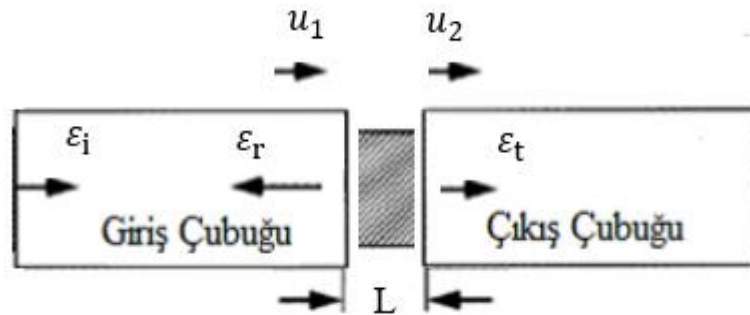
$$F_j = sE \frac{\partial u_j}{\partial y}, \quad j=1,2. \quad (2.6)$$



Şekil 2.2 Diferansiyel Eleman Etkiyen Kuvvetleri (Şimşek, 2011)

Diferansiyel eleman üzerindeki F_1 ve F_2 kuvvetlerini Newton’un ikinci kanunu

$F = ma$ denkleminde göre uygularsak, Denklem 2.8 hareket formülünü vermektedir.



Şekil 2.3 Giriş ve çıkış çubuklarındaki parametreler (Şimşek, 2011)

Denklem 2.7’ de belirtilen j değeri şekil değiştirme 1 ve şekil değiştirme 2 için verilen değerlerdir.

$$\varepsilon_j = \frac{\partial u_j}{\partial y}, \quad j=1,2 \quad (2.7)$$

Diferansiyel eleman üzerindeki parçacığın ivmesi $\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$ ile ifade edilmektedir. Kesit alanı boyunca bu değer sabittir.

Denklem 2.8'deki belirtilen çubuğun hareket denklemi verilmiştir;

$$sE \frac{\partial u_1}{\partial y} - sE \frac{\partial u_2}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (2.8)$$

Çubuğun dalga hızı C_0 ile tanımlanır ise;

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.9)$$

2.9 Denkleminde C_0 dalga hızını yerine yazarsak çubuğun hareket denklemi;

$$C_0^2 \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (2.10)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem 2.10'da belirtilen;

- E = çubuğun elastikiyet modülü
- ρ = çubuğun yoğunluğu olarak alınmıştır.

Çubuğun giriş tarafında oluşturduğu etkinin çıkış tarafında oluşturduğu yer değişimini temel alarak hareket denkleminin sadeleştirilmiş versiyonu aşağıdaki şekildedir;

$$u_2 = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy. \quad (2.11)$$

Diferensiyel elemanın her ucunda da oluşan şekil değişimin aynı değerde olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıdaki denklemin türevi alınarak elde edilen;

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} dy \quad (2.12)$$

2.9 Denkleminde yerine yazılırsa;

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

hareket denklemi elde edilir.

Sonuç olarak elde edilen bilgilerden çubuğun hareket denklemini Hopkinson Basınç test çubuğunda yapılan testlerde tercih edilecek yöntem olarak gelmemektedir ancak dalga hızının teorik olarak hesaplanabilmesi adına gerekli olduğu belirtilmiştir. Böylece yapılan hesaplamalar ile numunede oluşan gerilmeyi, şekil değiştirmeyi ve deformasyon hızının bulunması kolaylaşmaktadır (Şimşek, 2011).

2.1.2.2 Kesit Alanı ve Empedanstaki Değişimin Dalga Yayılımına Etkisi

Çubuk ile numune ara yüzeyinde meydana gelen kesit alanı ve test edilecek olan malzemenin özelliğine göre oluşan dalga yayılımını etkilemektedir. Ortaya çıkan bu dalganın etkisi empedans açısından incelemek gerekir ise;

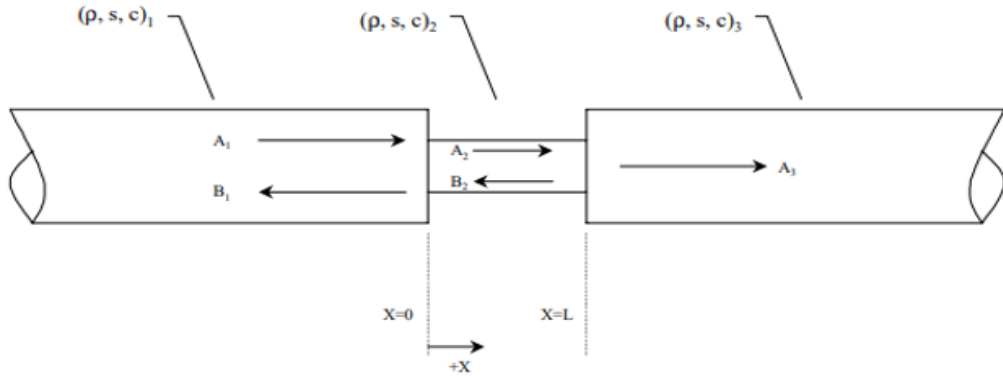
Yüksek hız basınç testlerinde kullanılan çubukların mekanik olarak empedansı Denklem 2.14 ile ifade edilmektedir. Empedans, cismin herhangi bir noktasındaki kuvvetin, o cisme gelen kuvvet hızına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$Z = \frac{F}{V} s \rho C_0 \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te belirtilen;

- F = kuvvet
- V = hız
- s = çubuğun kesit alanı
- ρ = çubuğun yoğunluğu
- C_0 = çubuğun dalga hızını

ifade etmektedir. Buradaki ρC_0 değeri çubuğun malzemesine göre değişmektedir. Empedans değeri fiziksel bir özellik olduğundan uygulanan kuvvet etkisi ile değişmemektedir.



Şekil 2.4 Numune ve kesit alanındaki değişimin gösterimi (Kaiser, 1998)

Şekil 2.4'te olduğu gibi, YHDTTC deney düzeneğinde ileten ve karşılayan çubuklar arasında test edilecek numune malzeme bulunmaktadır.

Verilen A_1, A_2, A_3 ve B_1, B_2 ifadeleri ileten çubuktan karşılayan çubuğa doğru gelen dalganın gerilme genliklerini tanımlamaktadır, $x = 0$ sınırında yani vuruş olmadan önceki sabit konumda A_1 dalgasının bir kısmı B_1 olarak geri yansımakta, bir kısmı ise A_2 olarak numune üzerinde aktarılmakta ve geçmektedir, $x = L$ sınırında ise yani vuruşun gerçekleştirildiği aşamada ise A_2 dalgasının bir kısmı B_2 olarak geri yansımakta bir kısmı da A_3 olarak ikinci çubuğa aktarılmaktadır. Burada empedans yansıyan ve geçen ara yüzeylere de bağlı olmaktadır. Bu da test edilen malzemenin cinsine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Belirtilen bu hesaplamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi adına; numune-çubuk ara yüzeylerindeki dalga hızının her iki yönde eşit olacak şekilde gelmesi ve ileten ve karşılayan numune-çubuk ara yüzeyindeki kuvvetlerin ise de statik yani durağan bir dengede sabit olması istenmektedir (Şimşek, 2011).

Bu şartlar sağlandığında ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisini ifade eden denklemler türetilebilir. Tablo 2.1.a) ve b) 'de birinci ve ikinci ara yüzeydeki dalga yayılımını ifade etmektedir.

Tablo 2.1 a) Birinci ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisi (Kaiser, 1998)

Birinci Arayüzey ($x = 0$)	
Hızın Sürekliliği	$\frac{A_1 - B_1}{(\rho c)_1} = \frac{A_2}{(\rho c)_2}$
Kuvvet Dengesi	$s_1(A_1 + B_1) = s_2 A_2$

Tablo 2.1 b) İkinci ara yüzeyin dalga yayılımı üzerindeki etkisi (Kaiser, 1998)

İkinci Arayüzey ($x = L$)	
Hızın Sürekliliği	$\frac{A_2 - B_2}{(\rho c)_2} = \frac{A_3}{(\rho c)_3}$
Kuvvet Dengesi	$s_2(A_2 + B_2) = s_3 A_3$

Yukarıdaki denklemlerde A_1, A_2, A_3, B_1 ve B_2 olmak üzere beş adet gerilme değişkeni verilmektedir. Bu beş gerilme değişkeninin her biri için bir iletim katsayısı tanımlanması denklem 2.16'da belirtilen ek ifadeler ile yapılarak daha anlaşılır ve hesaplamaların doğruluğuna güvenilir olmasını sağlamaktadır.

İletim katsayısı α olarak ifade edilir ise Denklem 2.15'te de belirtildiği üzere bu katsayı sadece 1 ile 0 arasındaki değerlerde değişmektedir. Buradan varılacak olan sonuç neticesinde eğer iletim katsayısı 0 ise tamamen yansıma meydana gelmiş olup. iletim katsayısı 1 değerinde ise de dalga geçişi %100 sağlanmış yani yansıma yok demektir (Şimşek, 2011). İletim katsayısı;

$$\alpha = \frac{A_i}{A_k} = \frac{\sigma_i}{\sigma_k} \text{ ve } 0 < \alpha < 1 \quad (2.15)$$

ile tanımlıdır (Kaiser, 1998).

Denklem 2.15'te belirtilen i ve k işaretleri iletilen ve karşılayan gerilme değerlerini ifade etmektedir.

Enerji korunumu yasası ise iletim katsayısını aşağıdaki şekilde ifade etmektedir;

$$\beta = 1 - \alpha \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da β yansıma katsayısı olarak tanımlanmıştır.

$$\alpha_{12} = \frac{2s_1(\rho c)_2}{s_1(\rho c)_1 + s_2(\rho c)_2} \quad (2.17)$$

$$\alpha_{23} = \frac{2s_2(\rho c)_3}{s_2(\rho c)_2 + s_3(\rho c)_3} \quad (2.18)$$

Yukarıda ifade edilen 2.17 ve 2.18 Denklemlerinde kesit alanı s değeri ile ifade edilmekte ve ρC_0 değeri ise numune malzemesinin cinsine bağlı olarak iletim katsayısında değişikliğe neden olduğu ifade edilmektedir.

2.1.2.3 Numunedeki Şekil Değiştirme ve Deformasyon Hızı

Yukarıdaki bölümlerde de belirtildiği üzere deformasyon hızı, birim zamanda numune üzerinde oluşan şekil değiştirme miktarıdır. Bu tanımdan yola çıkacak olur isek Denklem 2.18’de verilen ifade ile hareket denkleminde numunedeki şekil değiştirme ve deformasyon hızı hesabı için gerekli parametrelere ulaşmış oluruz.

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

Harmonik dalgalar için aşağıdaki kabuller verilmiştir;

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.20)$$

$$E \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.21)$$

- v = parçacık hızını
- p = kesit alanında oluşan gerilmeyi ifade etmektedir.

Buradan yola çıkılarak hareket denklemi, yukarıda tanımları bulunan çubuğunun kesit alanı, parçacığın hızı ifadeleri ile yeniden düzenlenecek olur ise;

$$-\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.22)$$

Parçacık hızını (v) için formülde bilinmeyen değer olan basıncın bilinmesi gerekmektedir. Bu basınç değeri şu şekilde belirtilir;

$$p(y,t) = P e^{i(\omega t - ky)} \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'te belirtilen; P, w, t, k ve y ifadeleri sırasıyla basınç genliği, frekans, zaman, dalga numarası ve dalganın konumunu tanımlamaktadır.

$$k = \frac{w}{C_0} \quad (2.24)$$

Denklem 2.24'ün y 'ye göre birinci türevi alındığında denklem 2.25 elde edilir;

$$\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = ikPe^{i(wt-ky)} \quad (2.25)$$

Denklem 2.25 içine hareket denklemini yerleştirilirse Denklem 2.26'ya ulaşılır.

$$ikPe^{i(wt-ky)} = \rho i w v(y,t) \quad (2.26)$$

Buradan parçacık hızı, $v(y,t)$, elde edilmiş olur;

$$v(y,t) = \frac{k}{\rho w} P e^{i(wt-ky)} \quad (2.27)$$

Denklem 2.27'de $p(y,t)$ ifadesinden Denklem 2.28 oluşur.

$$v(y,t) = \frac{1}{\rho C_0} p(y,t) \quad (2.28)$$

Sonuç olarak, kesit alanı etkisi üzerine denklemlerden elde edilen değerlerce tek eksenli bir gerilme oluştuğunda gerilme ile basınç birbirine eşit olmaktadır (Şimşek,2011).

Denklem 2.29'da ise $p(y,t)$ değeri, şekil değiştirme ve elastikiyet modül (E) değerleri ise;

$$p(y,t)=\varepsilon(y,t)E \quad (2.29)$$

Denklem 2.28, Denklem 2.29'da yerine yazıldığında Denklem 2.30 elde edilir;

$$v(y,t)=C_0\varepsilon(y,t) \quad (2.30)$$

Parçacık hızı ise şu şekildedir;

$$v(y,t)=-C_0\varepsilon(y,t) \quad (2.31)$$

Ortalama deformasyon hızı Denklem 2.32'de verilmektedir;

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L} (v_{arayüzey2} - v_{arayüzey1}) \quad (2.32)$$

Birinci ara yüzeydeki parçacık hızı;

$$v_{arayüzey1} = C_0\varepsilon_I - C_0\varepsilon_R = C_0(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (2.33)$$

İkinci ara yüzeydeki parçacık hızı;

$$v_{arayüzey2} = C_0\varepsilon_T \quad (2.34)$$

Ara yüzey denklemleri Denklem 2.35'te yerine yazarsak;

$$\frac{d\varepsilon_S}{dt} = -\frac{C_0}{L} (\varepsilon_T - \varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (2.35)$$

Kesit alanlarındaki deformasyon hızlarının eşitliği Denklem 2.36'daki gibi ele alınır ise;

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (2.36)$$

Yukarıdaki denklemleri Denklem 2.37'de ifade edildiği üzere yerine yazarsak;

$$\frac{d\varepsilon_S}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \quad (2.37)$$

Denklem 2.38'de de görüldüğü üzere integrali alındığında ise;

$$\varepsilon_S = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2.38)$$

Yüksek hız darbe test cihazları ya da herhangi bir düşen ağırlık darbe hız test cihazlarında gerinim hesabı denemeleri yapılacak olan sistemlerde mevcut olarak bulunan iki adet gerinim ölçer yani strain-gage'lerin ileten ve karşılayan çubuklar üzerine konumlandırılması ile üzerlerinden geçen ve yansıyan gerilme dalgalarının sebep olduğu test edilen numunedeki şekil değiştirme miktarı ölçülebilmektedir. Bu değerler aşağıda belirtilen 2.39, 2.40, 2.41 denklemlerinde kullanılarak hesaplanmakta ve sonuçlar elde edilebilmektedir.

$$\frac{d\varepsilon_S}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \quad (2.39)$$

$$\varepsilon_S = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2.40)$$

$$\sigma_S(t) = \frac{EA_B}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (2.41)$$

2.1.2.4 Johnson Cook Modeli ile İlgili Hesaplamalar

Bu tez çalışmasında birinci bölümde ifade edilen literatür çalışmalarının içeriklerinde de belirtilen ve çoğunluğunda kullanılan Johnson Cook modelinin kullanıldığı görülmektedir. Yüksek hızlarda test edilen malzemede oluşan deformasyon davranışlarının belirlenmesi için belirtilen Johnson Cook modelini kullanmak uygundur. Cowper – Symonds Modeli;

- σ_{dyn} Dinamik gerilim
- σ_{stat} Statik gerilim
- $\dot{\epsilon}$ Statik gerilim
- C, p CS modelinin sabitleri ifade etmektedir (Korkmaz,2019).

$$\sigma_{dyn} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \sigma_{stat} \quad (2.42)$$

Johnson Cook Modeli;

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n) (1 + C \ln(\dot{\epsilon})) (1 - \hat{T}^m) \quad (2.43)$$

A – Akma gerilmesi (MPa)

B – Sertleşme modülü (MPa)

C – Gerinim oranı hassasiyet katsayısı

n – Sertleşme katsayısı

m – Termal yumuşama katsayısı

$\dot{\epsilon}$ – Referans gerinim oranı (çoğunlukla 1 s^{-1} ‘e eşittir))

ϵ – Plastik şekil değiştirme

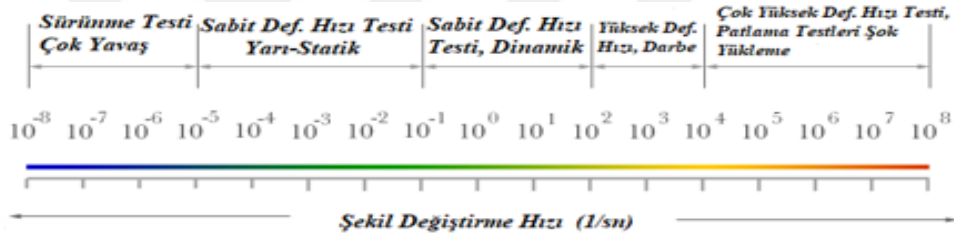
$\hat{T}$ – Homojen sıcaklık değeri (Korkmaz,2019)

BÖLÜM ÜÇ

ÖLÇÜM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN METARYAL VE MEKANİK TASARIM

3.1 Yüksek Hız Darbe Test Cihazı İçin Optik Hız Ölçüm Deney Seti

Günümüzde çoğunlukla darbe testleri için kullanılan düşen ağırlık darbe test cihazlarında yapılan mekanik testlerde deformasyon hız değerleri ile yüksek hızlarda uygulama yapılabilen parçalı Hopkinson basma çubuklarındaki deformasyon hızlarına dair aralıklar Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu şekil değiştirme hız aralıkları test yapılan malzemenin cinsi, testin kullanım alanı, test cihazının özellikleri gibi parametreler ile değişkenlik göstermektedir. Şekil 3.2’de örnek hız kapıları sistemi verilmiştir.



Şekil 3.1 Şekil değiştirme hız aralığı (Karpuz ve Gören, 2019)

Birçok mühendislik uygulaması için malzemelerin düşük deformasyon hızlarından daha yüksek deformasyon hızında test yapabilecek kabiliyete sahip olan ve dinamik yükler altındaki mekanik davranışlarının tespit edilmesini sağlayabilen test düzenekleri tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Fakat yüksek darbe test cihazlarının hız değerlerinin yüksekliği ve testin ölçüm tespiti için kullanılacak olan hız kameralarının maliyetlerinin çok fazla olması nedeni ile ön malzeme değerlendirmesi amacı ile daha düşük hızlarda düşen ağırlık darbe test cihazları tercih edilebilmektedir.



Şekil 3.2 Hız kapısı örnek sistemi (Kişisel arşiv, 2018)

3.1.1 YHDT Cihazları İçin DADT Cihazında Yapılan Denemeler

Bu tez çalışmasında da DEÜ Bap projesi kapsamında talep edilen hızlı kamera maliyet ve temini öncesinde hemen hemen her üniversitenin test laboratuvarlarında erişimi kolaylıkla sağlanabilen daha düşük test hızlarında düşen ağırlık darbe test cihazında hız ölçümü için deneyler yapılmış ve yorumlanmıştır.

Burada bahsi geçen hız değerleri düşük ya da yüksek olarak ele alınırken test edilecek olan malzemenin test esnasındaki deformasyon değerinin akma değeri, malzemenin süneklik ve deformasyon miktarı gibi mekanik özelliklerin önem arz ettiği gözlemlenmiştir.

DADT cihazlarında yapılan deneyler sonucunda yüksek deformasyon hızında yapılan deneylere göre çok daha az miktarda ve daha az detaylı veri elde edilmesi ile numunedeki şekil değiştirme değerlerinde meydana gelen değişikliklerin istenildiği şekilde kontrolünün sağlanamaması dezavantaj olarak tespit edilmiştir. Literatürde bu dezavantajlara yönelik tekrar inceleme yapıldığında ise Kolsky'nin, numuneye doğrudan darbe uygulamaktansa, iki elastik basma çubuğu arasına yerleştirerek çubuklardan bir tanesine kuvvet uygulama deneyi yapmış ve daha yüksek hızlara çıkılabildiği gözlemlenmiştir (Kolsky,1949).

Bu kısımda, elde edilen yüksek hız darbe test cihazlarında test hızının doğru bir şekilde ölçülebilmesi için yapılan deneylerden bahsedilmiştir. İlk olarak hız ölçümünün yapılabilmesi için optik sensörlere ihtiyaç duyulmuştur.

Geliştirilen optik hız ölçüm sistemi ile darbe testi sırasında vuruş çubuklarının geçişini yakalayabilen optik sensörler yardımı ile bir geçiş dalgası olarak algılabilmektedir. Bu geçiş dalgasının algılanabilmesi adına istenilen sistem parametrelerine bağlı olacak şekilde belirlenen mesafenin başladığı ve sona erdiği noktaları kapı olarak adlandırır isek; birinci optik kapı ile ikinci optik kapı ifadelerine ulaşmış oluruz. Buradan geçme zamanları optik sensörler sayesinde ölçülebilmekte ve sistemin hız ölçümü bu sayede yapılabiliyor olmaktadır. Çalışmada arayüz için

geliştirilen yazılımdaki hız değerleri, donanımın osiloskop'a bağlanarak ölçülen hız değerleri ile karşılaştırılıp geliştirilen donanım ve yazılımın performansı değerlendirilmiştir.

3.1.2 Deney Setine Giriş ve Kullanılan Komponentler

Hız ölçümünün optik bir şekilde yapılabilmesi adına istenen özellikleri sağlayabilen optik sensörlere gereksinim duyulmaktadır. Çalışmanın optik hız ölçümü sisteminde yöntem olarak söz edilen hız değerinin belirlenmesinde kullanılacak olan algılayıcının seçimi olmaktadır. Düşen ağırlık darbe test cihazı ile yapılan deney için Dokuz Eylül Üniversitesi mekanik test laboratuvarında bulunan Şekil 3.6'da görseli bulunan CEAST 9350 marka fractovis plus darbe test cihazı kullanılmıştır. Cihazın hız aralığı 0,77 ile 24 m/sn'arasındadır.

Her iki optik kapı için iki adet olmak üzere TCRT5000 kızılötesi yansıma sensör modülü (Optik Sensör Modülü) ilk olarak tercih edilmiştir. Daha sonra testlerin hızını daha iyi tolere edeceği hesaplanmış olan Şekil 3.3'te görseli verilen optik sensörler ile deneyler yapılmıştır. Arduino mega 2560 ile uyumlu olarak çalışabilen bir sensör olduğundan düşen ağırlık darbe test cihazında yerleştirme aşamasında uygunluk sağlamıştır. Deney için yazılan kod eklerde (bkz. Ek 1) verilmektedir. Yazılım açıklaması bir sonraki bölümde aktarılmıştır.

3.1.3 Basit Sensör Modeli

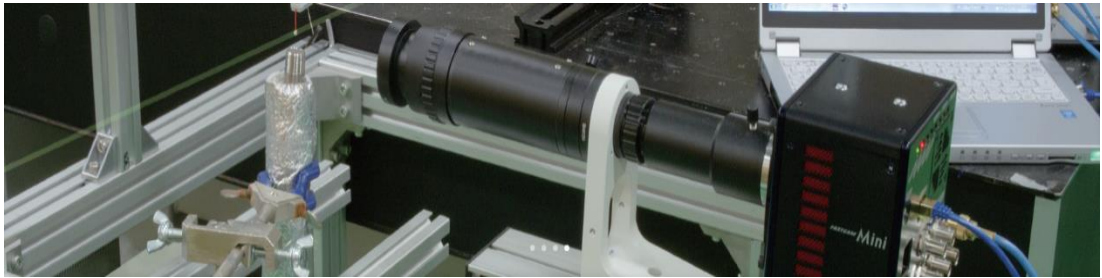
Deneysel olarak kullanılan Şekil 3.3'te görseli verilen optik algılayıcının temel çalışma prensibi bir kontrast algılayıcısı olarak kızılötesi yansıma ile çalışmaktadır. Bu optik algılayıcı içerisinde bir kızılötesi led ve foto transistörden meydana gelmektedir. Deneysel düzenekte belirlenen nokta ya da yüzeye kızılötesi ışık yansıyarak tekrar geri sensör üzerinde gelen ışının parlaklığı ölçülerek foto transistör üzerinden değerleri ölçmekte ve yazılım aracılığı ile ekrana yansıtmaktadır TCRT5000 kızılötesi yansıma sensör modülü (Optik Sensör Modülü) ile dijital ve analog çıkış

alınabilmektedir. Optik sensörün çalışma gerilimi: 3,3 [V]- 5 [V] aralığındadır. (Karpuz ve Gören, 2019)



Şekil 3.3 Deneysel olarak kullanılan optik sensörler: a) Kızılötesi bariyer sensör b) TCRT5000 kızılötesi yansıtıcı sensör modülü (Kişisel arşiv, 2018)

Hız ölçümü yüksek hız darbe testleri için çeşitli yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Bu yöntemlerden ilki olan bu tez çalışmasının optik hız ölçüm sistemi aşamasını kapsadığı optik sensörler yardımı ile tespitin sağlandığı devresel yöntem haricinde bir de hızlı kameralar kullanılarak hız tespitin birebir ve daha doğru sonuçlar ile elde edilebildiği bilinmektedir. Fakat bu hızlı kamera sisteminin temin maliyetleri nedeni ile birçok projede istenilse de tercih edilememektedir. BAP proje desteği içerisinde de bir sonraki aşamada kullanılmak üzere temini sağlanmaktadır. Hız ölçümü için analog-dijital çevirici (ADC) 24 bit kullanılmıştır. Bu tez çalışması içerisinde hız ölçümü deneysel ve yazılımsal olarak sağlanmış yavaş hızlarda düşen ağırlık darbe test cihazı üzerinde yapılan denemelerde ise normal kameranın yakalayabileceği ve doğruluğu saptayabileceği şekilde uygulamalar yapılmıştır. Şekil 3.4'te yüksek hız darbe test cihazlarında tercih edilen ve yüksek hız değerlerini rahatlıkla tespit edebilen Photron şirketi'nin geliştirdiği kameradır. Mini Ax200 serisinin oransal hız çözünürlük değeri 6,400 fps, 1024x1024 piksel kapasitelidir. (Photron, 2021)



Şekil 3.4 Yüksek hız darbe tesinde kullanılan hızlı kamera (Photron, 2021)

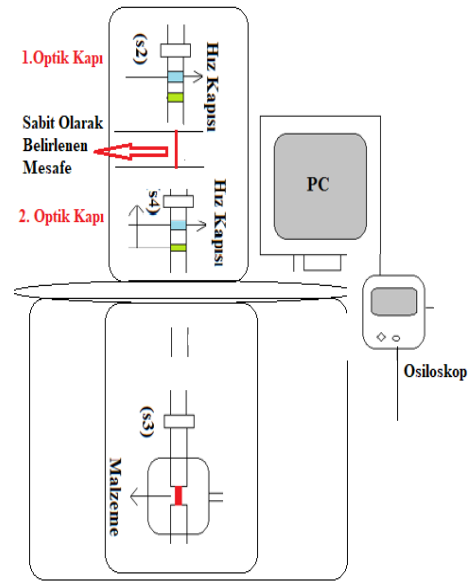
3.1.4 Düşük Darbe Test Cihazı Üzerinde Deneyin Konumlandırılması ve Çalışma Mantığı

Şekil 3.5’te görseli bulunan CEAST 9350 marka fractovis plus darbe test cihazının şematik gösterimi ve deneysel optik ölçüm düzeneğinin cihaz üzerinde konumlandırılması verilmiştir. Görseldeki düşen ağırlık darbe test cihazında uygulanan yazılımın çalışma mantığı ise iki ayrı optik kapı olarak düşünerek iki ayrı arduino tabanlı yansıma modüllü optik sensör1 ve sensör2 olarak tanımlanarak kullanılmıştır. Arduinodnun sensörler ile bağlantısında birini iki numaralı porta diğerini ise üç numaralı porta bağlantısı yapılarak ilgili portların belirlenmesi sonrasında durumlarının kontrolü için tanımlaması yapılmıştır. Bu aşamada tanımlanan s yani sayıcı birimi birinci sensör gördüğü yani algıladığı an ile ikinci sensörün görene kadar geçen sürede saymaya devam ederek ekrana ikinci sensör görünce döngüden çıkmakta ve arada geçen zamanı ekrana yansıtmaktadır.

İki sensör arası mesafe de sabit olarak test cihazının mekanik yapısının uygun olacağı gibi belirlenmiş olup Newton’un ikinci yasası olan $x = v \times t$ (yol=hız×zaman) denkleminden hızın hesabı bulunabilmektedir.

Sistemin ilk sensörü gördüğü anda sayma işlemi başlamıştır. İkinci optik kapı olan sensörü de görene kadar ekrandaki gibi sayma işlemi konsola yansıtılmıştır. İkinci sensör de gördüğü yani osilaskopta gözleendiğinde kare dalganın düşen kenar olarak tamamlandığı sırada sayma işlemi durmuş olup değer ekrana yansıtılmıştır.

Bu deneysel çalışmadan yola çıkılacak olunur ise düşük hızlarda testi yapılan düşen ağırlık darbe test cihazlarında gözardı edilebilecek değerde yakalanıp SHPB gibi çok daha yüksek hızlarda numune testlerinin yapılması sırasında hatanın hassaslığı artacağından dolayı daha fazla önem arzedeceği ve dikkate alınması gereken bir değer çıkabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5 Düşen ağırlık darbe test cihazı için tasarlanan optik hız ölçüm sistematığı (Karpuz ve Gören, 2019)



Şekil 3.6 Çalışmada kullanılan düşen ağırlık darbe test cihazı (Karpuz ve Gören, 2019)



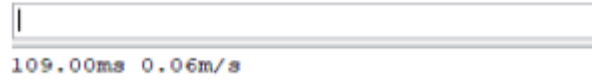
Şekil 3.7 Düşen ağırlık darbe test cihazında optik ölçüm sisteminin yerleştirilmesi (Karpuz ve Gören, 2019)



Şekil 3.8 Düşen ağırlık darbe test cihazında optik ölçüm sisteminin yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2021)

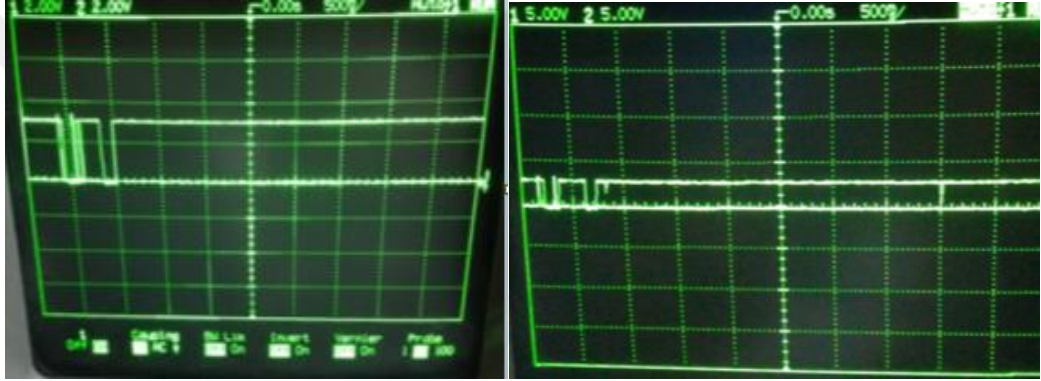
3.1.5 Uygulamada Algılayıcı Cevabı ve Sonuçlar

Düşen ağırlık darbe test cihazı için algılayıcı cevabı Şekil 3.10 a) ve b)'deki gibidir. CEAST 9350 marka fractovis plus cihazı mekaniksel özelliği için hesaplanarak belirlenen mesafenin başladığı ve sona erdiği noktalar optik kapı olarak ifade edilmektedir. Düşük hızlarda deneysel testler yapıldığından dolayı Şekil 3.11'de kameranın geçişi yakaladığı mekaniksel olarak sistem üzerinde belirlenen mesafe çizgileri belirtilmiş ve gösterilmiştir. Optik geçiş kapıları arası mesafe 6.6 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Değerler doğrulanmış ve yazılımsal verideki değerler elde edilmiştir. Ara yüzden alınan ekran değerleri Şekil 3.9'da verilmiştir (Karpuz ve Gören, 2019).



Şekil 3.9 Yazılım ekran sonuç görüntüsü (Karpuz ve Gören, 2019)

Fractovis plus cihazında yapılan hız ölçüm testleri ile cihazın atış sırasında verdiği hız değerleri karşılaştırılmıştır. 10J ile 3687 N kuvvet ile yapılan test sonucunda cihaz bayraklar arası ölçümü 4.041 m/s olarak, yine 10J enerji ile 3564 N kuvvet altında yapılan test sonucunda ise hız değeri 4.045 m/s ekrana yansımaktadır.



Şekil 3.10 CEAST 9350 fractovis plus darbe test sinyali: a) Osiloskop görüntüsü 1b) Osiloskop görüntüsü 2 (Karpuz ve Gören, 2019)



Şekil 3.11 DADTC hız ölçüm sisteminin kamera ile doğrulanması (Kişisel arşiv, 2021)

3.2 Yüksek Hız Darbe Test Cihazı İçin Gerinim Ölçüm Deney Seti

Yüksek hız darbe test cihazlarında bir diğer ölçüm sistemi olarak ifade edilen gerinim ölçme sistemi SHPB gibi yüksek hız ya da Fractovis gibi düşük hız darbe test cihazlarında meydana gelen uzamanın belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bunun için ise elektrik dirençli gage'ların kullanımına gereksinim duyulmaktadır.

Strain gauge'ler günümüzde çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmakta olsa dahi sadece metal gibi genleşme özelliği gösteren malzemelerde uygulamaları yapılabilmektedir. İlk olarak 1938 yılında Edward E. Simmons ve Arthur C. Ruge tarafından icat edilmiş olan gerinim ölçerler negatif ve pozitif doğrultudaki sinyal değerleri ile belirlenmiş olup çekme ve basma gerinimleri anlamına da gelmektedir (Elektrikport,2021). Burada ki çekme pozitif doğrultuyu ifade ederken basma ise negatif doğrultuyu ifade ediyor olmaktadır.

3.2.1 Deney Setine Giriş ve Kullanılan Komponentler

Bu tez çalışmasının bir diğer ölçüm sistemi olan gerinim ölçerler yardımı ile sistemden alınan verilerin yorumlanmasında uygulanan adımlar bu bölümde tek tek verilmiştir. Öncelikle algılayıcı çalışma yapısı ve sensörü içerisinde barındıran yük hücresi ile ağırlık ölçümü, sensörün uygulanması ve SHPB gibi yüksek hız gerektiren test cihazları için uyarlanarak deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçları verilmiştir.

3.2.1.1 Gerinim Ölçerlerin Yapısı, Ölçüm Teorisi ve Çalışma Sistemi

Temel olarak gerinim ölçer sensörlerinin çalışma prensibi dışarıdan herhangi bir dinamik kuvvet uygulandığında gerilim ve gerinim değerleri ortaya çıkmaktadır. Gerinimi direkt olarak ölçmek mümkün değildir fakat gerilme ile gerinim yani strain arasındaki matematiksel hesaplama ile ilişkilendirildiğinde gerinime ulaşılabilmektedir. Bu ilişkilendirme denklem 3.1 ve denklem 3.2'de verilmiştir.

Sensör yapısı olarak istenilen düzeyde çok hassas ölçümler yapabilen, bakır ve nikel karışımı tellerin üzerine yalıtkan bir madde ile kapatılması ile oluşturulan algılayıcılardır.

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

- σ : Gerilim
- F : Kuvvet
- A : Kesit alanı

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

- ε : Gerinim (Strain)
- L : Uzunluk
- ΔL : Uzama miktarı

Çapraz gerinim değerin direkt uygulanan kuvvetten gelen gerinime oranı poisson oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 3.3'te ise elastisite modülünün gerilme ve gerinme ile olan ilişkisi verilmiştir.

- E elastisite modülü;
- $E = \text{Gerilme } (\sigma) / \text{Gerilim yani Strain } (\varepsilon)$ dir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

- Yani $\sigma = E \cdot \varepsilon$ dir.

YHDTTC'da uygulanan gerinim değeri zamanla değiştiğinden dolayı dinamik gerinimdir. Uygulanan gerinim dinamik olsa dahi aynı anda statik ve dinamik olarak

karşılaşmak ve bir kısmının değişim hızı nedeni ile kaybedilmesi olağan kabul edilmelidir.

Gerinim ölçer sensörlerinin yapısı özel olarak üretilen çok ince yapıdaki yaprak şeritler üzerine uygulanan tel malzemenin plastik bir yapı ile kaplanması sonucunda olmaktadır.



Şekil 3.12 Strain-gage örneği (Kişisel arşiv, 2018)

Gerinim ölçümü strain-gage'ler sayesinde çok hassas yapılabilmektedir. Hassaslık değeri mikron boyutuna kadar inebilmektedir. Bu elektriksel direncin ölçümü, istenen malzeme üzerine çok iyi bir şekilde yapıştırılarak uygulanan kuvvetin malzeme üzerinde oluşturduğu şekil değişiminin sonucunda elde edilir. Bu direncin oluşması ile gerinimle doğru orantılı olan direnç değişimlerini ölçüm sistemi yardımıyla ölçülebilmektedir. Bu sayede malzeme üzerine gelen kuvvetlerin, malzemenin üzerinde oluşturduğu şekil değişiklikleri direnç değişimi şeklinde ölçülebilmektedir. Bu direnç değerinden yola çıkılarak gerinim ve gerilim değerleri hesaplanabilmektedir.

Ölçümden alınan bilgiler bu tezde olduğu gibi wheatstone köprüsü kurularak istenilen değerler elde edilebilmektedir. Daha detaylı ölçüm değerleri için ise data logger gibi kayıt sistemleri ile ilgili test esnasında kayıtlar alınarak hesaplamalar yapılabilmektedir.

3.2.1.2 Gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi ve yapıştırılması

Gerinim ölçer sensörler fiziksel olarak çok ince yapıya sahip olduklarından dolayı herhangi bir baskı, kuvvet ya da düşürme hatalarında kullanılamaz ya da yanlış veri verme eğilimi göstermektedir. Ayrıca yapıştırılan yüzeyden gerinim ölçeri yerinden kaldırmak ve tekrar kullanmak gibi bir ihtimal bahsedildiği üzere gerinim ölçerin yapısı gereği bulunmamakta ve sökülürken kullanılamaz hale gelmektedir. Bu nedenle

gerinim ölçerlerin yapıştırılacak olan yüzeye uygulanma işlemleri büyük bir titizlikle yapılmalıdır. Bu yapıştırma işleminin istenilen sonuçları verebilmesi adına Tablo 3.1’de aşamalı olarak verilen yapıştırma adımlarında kullanılan özel malzemelere gereksinim duyulmaktadır. Bu malzemeler meydana gelen deformasyonların sensöre doğru olarak iletilmesi için uygun bağlantının oluşmasını sağlamaktadır.

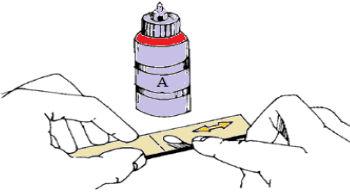
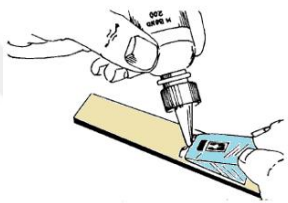
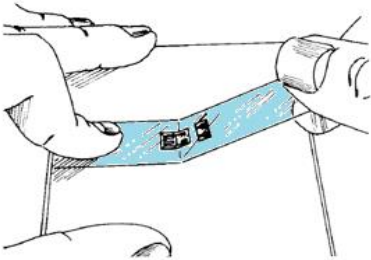
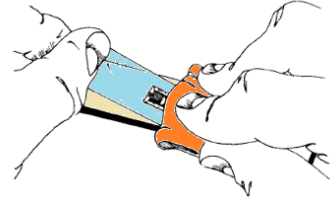
Bu tez çalışmasında gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı yüzey metal olduğu için Tablo 3.1’deki yapıştırma işlemlerini uygulamak yeterli olmuştur.

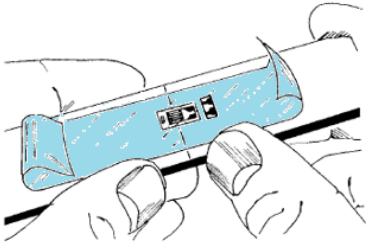
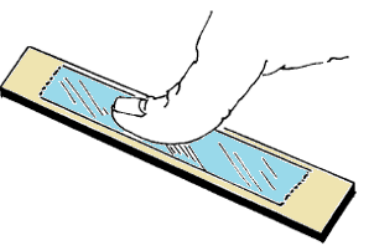
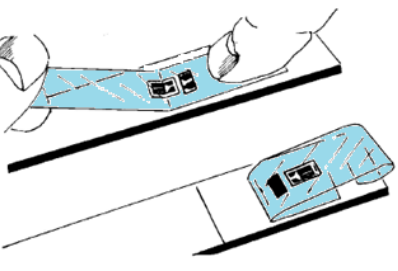
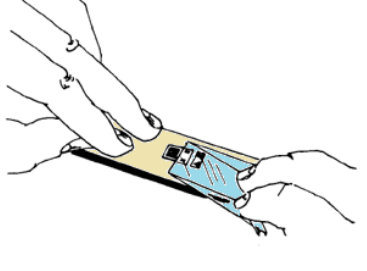
Metalik bir yüzey olan vurucu ve ileten çubukların bulunduğu yüzey önce 1. Adımda görseli bulunan gerinim ölçer deney düzeneğinde uygulanan CSM marka yağ sökücü ya da saf alkol ile yüzeyin yağdan arındırma işlemi yapılmıştır. Sonrasında belirlenen metal yüzey alanı 220 ince zımpara ile kuru bir şekilde zımparalanır. 2.adımda görseli bulunan M-prep conditioner A malzemesi ile ıslatılmış ve tekrar zımparalanarak alan gazlı bez ile silinmiştir. Daha yüksek kalınlığa sahip bir zımpara ile de bu ara geçiş işleminde ıslak zımparalama yapılmıştır. Strain-gage’in yapıştırılacağı yüzey alanı belirlense de tam olarak sensörün boyutuna göre tam yapıştırılacağı yer kulak çöpü ile iyice temizlenmiştir.

3. adımda bu deneysel çalışma için MICRO marka strain-gage kullanılmıştır. Paketinden cımbız yardımı ile çıkarılmıştır. Bu aşamada sensörün yüzeye yapıştırılacağı yüzeye herhangi bir toz vb. gelmesi önlenmelidir. 3. adım görselinde bulunan PCT-2M özel sensör bandı ile sensör banda alınmıştır ve dikkatlice çekilmiştir. 4.adımda banta yapışık olan sensör istenilen metal yüzey alanına yapıştırılmıştır. 5.adımda bant yavaşça kaldırılmış ve M-Bond 200 katalizör özel yapıştırıcısı çok fazla olmayacak şekilde 6.adımda sensöre uygulanmıştır. Gerinim ölçer bu işlem olmadan da sertleşebilmektedir fakat daha yavaş ve güvensiz olduğu için uygulanması tavsiye edilmiş olduğundan bu tezde de uygulanmıştır. Ve ardından kuruması için oda sıcaklığında (24°C sıcaklık ve %30- %65 nem) kurumaya bırakılmıştır. 7.adımda M-Bond 200 yapışkan yüzeye damlatılmıştır. 8.adımda sensör istenilen yüzeye bir gazlı bez yardımı ile kuvvet uygulanarak yapıştırılmış ve 9.adımda görüldüğü üzere üzerine en az 1 dk olacak şekilde baskı uygulanmıştır. Son adım olan

10.adımda ise bant yavaşça ve çok dikkatli bir şekilde sensörün üzerinden çekilmiş yapıştırma işlemi tamamlanmış olmuştur.

Tablo 3.1 Gerinim ölçer sensörün metal yüzeye uygulama işlem sırası (Vishaypg, 2019)

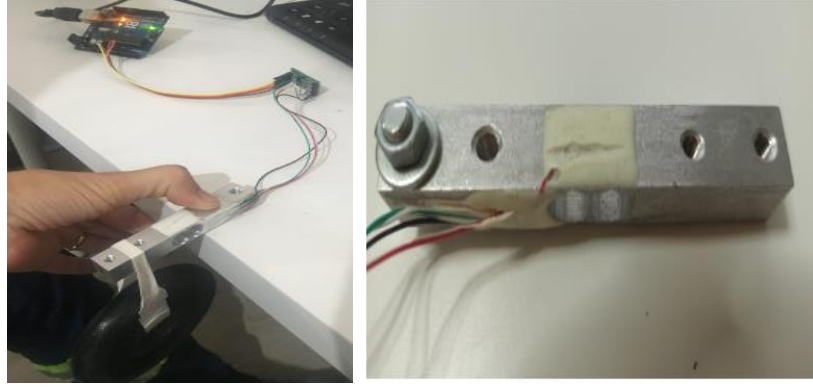
İşlem Sırası	Uygulama Görseli	İşlem Sırası	Uygulama Görseli
1		6	
2		7	
3		8	

4		9	
5		10	

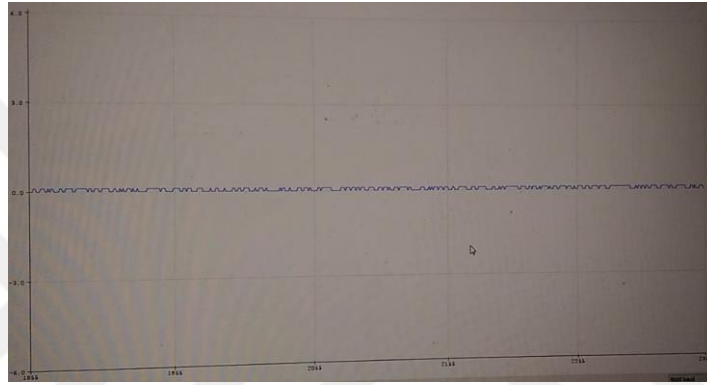
3.2.1.3 Yük Hücresi, Ankastre Kiriş Aparatı ve Salıncak ile Deney Düzeneği

Yük hücreleri metal ya da alüminyum şase tabanından oluşan içerisinde gerinim ölçer (strain-gage) sensörler bulunan ve tez çalışmasının 3.2.1.4'üncü bölümünde detaylı olarak belirtilen Wheatstone köprü düzeneğini barındıran basit ölçüm elemanıdır.

Şekil 3.13'te deneysel düzeneğin görseli verilmiştir. Test aşamasında yük hücreğine farklı değerlerde çeşitli ağırlıklar yüklenmiş ve yazılımsal olarak değişimi gözlemlenmiştir. Sonuç olarak grafikten elde edilen değeri yazılımsal belirlenen bir k sabiti ile çarpıldığında test edilen değere ulaşılabilirdiği gözlemlenmiştir. Bu deneyde yük hücreğini sabitlemek zor olduğundan ankastre kiriş yöntemi ile çalışmalara devam edilmiştir. Bu deneyde sıfır yani denge konumunda sabitlenememesinden kaynaklı olarak Şekil 3.14'te verilen grafik değeri elde edilmiştir.

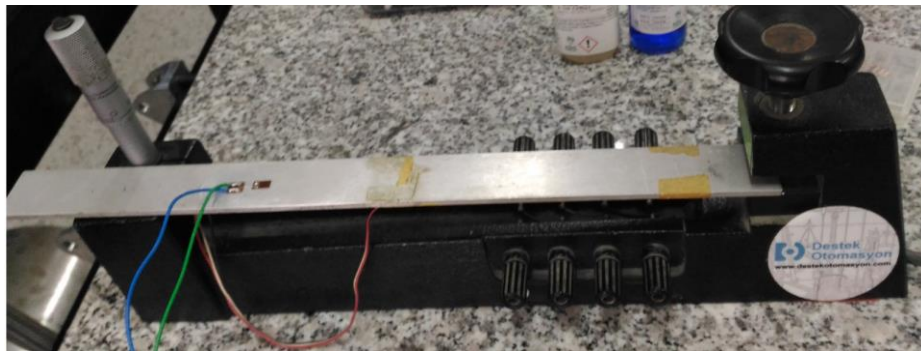


Şekil 3.13 Yük hücresi uygulama (Kişisel arşiv,2020)

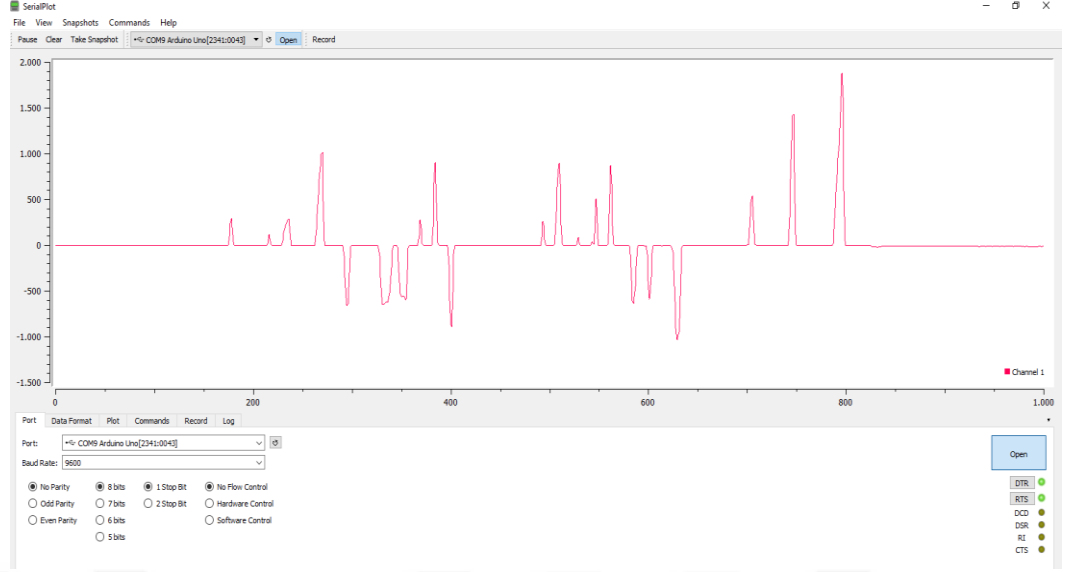


Şekil 3.14 Yük hücresi uygulama grafiği (Kişisel arşiv,2020)

Ankastre kiriş aparatı ile yapılan deneysel gerinim ölçer çalışmasında ise Şekil 3.14'te görseli verilen kirişin sabitlenebilmesi adına aparat ile çalışılmıştır. Ayrıca aparat uç kısmında y ekseninde gelen deplasmanın ölçülebilmesi adına mikrometreye sahiptir (Sayman ve Arman,2017). Şekil 3.15'te 1 adet gerinim ölçerin teminali ile birlikte arduino aracılığı ile ekranda ölçüm değeri Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Ankastre kiriş aparatı ile gerinim sensör deneği (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 3.16 Ankastre kiriş aparatı ile gerinim sensör deney grafiği

Şekil 3.16’da serialport grafiğinde Şekil 3.15’te görseli bulunan kirişe basma ya da çekme yani kirişe belirli bir kuvvet ile ucuna uygulandığında serialportta sıfır değeri sabit olarak sistemin durağan halinden eksi veya artı yönde gerinim elde edilmesi sağlanmıştır. Buradan bu tez çalışmasının diğer bölümlerinde aktarılan gerilim gerinim ilişkisi hesaplamaları yapılarak çalışmalar yapılabilir.

Yapılan bir diğer deneysel çalışma ise dinamik yük uygulanabilen Dokuz Eylül Üniversitesi mekatronik laboratuvarında bulunan deneysel salıncak malzemesinin üzerindeki çalışmanın yapıldığı görsel ise Şekil 3.17’de verilmektedir.



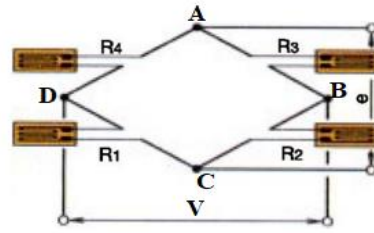
Şekil 3.17 Salıncak ile gerinim sensör deneği (Kişisel arşiv, 2020)

3.2.1.4 Sabit Strain-Gauges ile Wheatstone Köprü Düzenegi

Wheatstone köprüsü gerinim ölçer sensörlerin üzerine düşen direncin değişmelerinin belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Wheatstone tam köprüsünde 4 adet R1, R2, R3, R4 olarak adlandırılan direncin bağlantısı yerine 4 adet gerinim ölçer sensör bağlantısı ile oluşmaktadır. Dirençlerin değerleri ise hepsi birbirine eşit olacak şekilde ya da çapraz olarak karşılıklı direnç değerlerinin çarpımlarının birbirine eşit olacak şekilde alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.18’de devre bağlantısı verilen tam köprüsünde AC uçları arasında ölçüm yapıldığında sıfır değerini göstermektedir. Bu sıfır değeri devrenin dengede yani sonuç olarak herhangi bir değişiklik göstermediği zaman olarak ifade edilmektedir. Belirlenen herhangi bir R değeri yerine devreye gerinim ölçer sensör bağlantısı yapıldığında sıfır gösteren denge bozularak bir gerilim meydana getirir. Gerilim değeri tek bir gerinim ölçer sensör bağlantısı yapıldığında denklem 3.4’te verilen formül sayesinde gerinim ile bağlantılı olduğundan istenilen sonuca ulaşılmış olmaktadır. Bu sensör adedi 4’e çıkarıldığında denklem 3.5’deki formül kullanılmaktadır.

$$V = \frac{I \Delta R}{4 R} \varepsilon \quad (3.4)$$

$$V = \frac{I}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \varepsilon \quad (3.5)$$



3.18 Tam Wheatstone köprüsü (Rmc, 2021)

Tablo 3.2. Wheatstone köprü düzenegi hesaplamaları (Rmc, 2021)

$V_{A+B} = V_{B+C}$	$I_1 R_1 = I_2 R_4$
$V_{A+D} = V_{C+D}$	$I_1 R_2 = I_2 R_3$
$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$	$R_1 = \frac{R_4}{R_3} R_2$

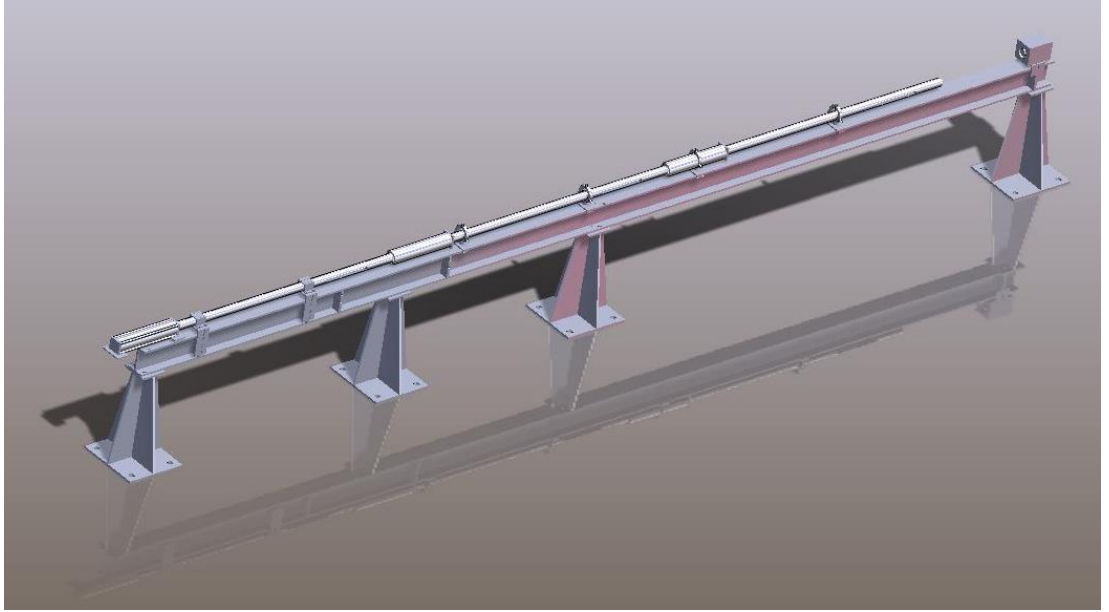
BÖLÜM DÖRT

ÖLÇÜM SİSTEMLERİNDEN ELDE EDİLEN ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME

4.1 Sistem İçin Düşük-Yüksek Deformasyon Hızları

Bu tez çalışmasının üçüncü bölümünde Şekil 3.1’de de yer alan çizelge görselinde yüksek hız değerlerinden kasıt 10^2 ve 10^8 s^{-1} değerleri arasında kabul edilmiştir. Bu değerlerin altında 10^{-1} ve 10^2 s^{-1} ’ye kadar olan değer aralığı ise yine dinamik test yükü altında daha düşük deformasyon hızına sahip değerler olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.1’de SolidWorks montaj görseli bulunan SHPB yüksek hız darbe test cihazının BAP projesi için tasarlanan görseli bulunmaktadır.



Şekil 4.1 SHPB test cihazı tasarımı (BAP Projesi, 2019)

Tablo 4.1’de literatürden elde edilen bilgiler dahilinde dört farklı test cihazının hız, gerinim, test numune malzemesi türü, test ortam sıcaklığı ve matematiksel modellemede kullanılan yöntem verilmiştir.

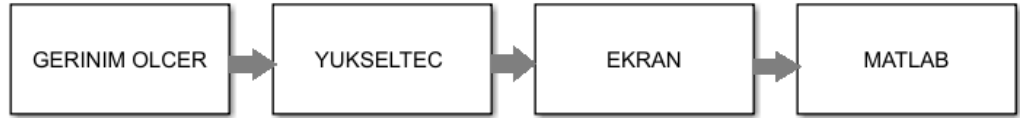
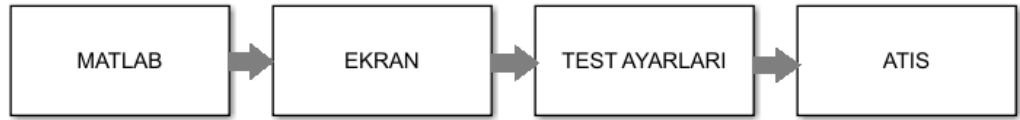
Tablo 4.1 Hız ve gerinim değerlerinin karşılaştırılması (Bap Projesi, 2018)

Malzeme Adı	Gerinim	Modelleme	Sıcaklık	Hız
Armox 500T, Protect 500, Weldox 500 – 700E, Hardox 400	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Johnson•Cook model (JC), Cocraft-Latham	-	83 m/s
Armor	$0,1 \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Johnson•Cook model (JC),	TH=0	85 m/s
Armox 500T, Armor	T=32 μs 7,62 mm	Johnson•Cook model (JC),	-	45, 60, 75 ve 90 m/s
Seramik Elastomer Kompozit	500 s^{-1} ,	Deneysel	Kompozit üretim sıcaklığı 1600°C	85 m/s

Tablo 4.1’den elde edilen sonuç ise yüksek hız tanımına uyan hız değerlerinin eldesinde gerinim oranları sıcaklık ve malzeme türüne bağlı olarak yüksek mukavemetli çeliklerden olan Armox, Hardox gibi numunelerde benzer, fakat seramik gibi daha kırılgan malzemelerde ise çok üzerinde bir gerinim değeri eldesi olduğu görülmüştür.

4.1.1 Matlab Benzetimi ve Veri Kayıt Cihaz Kullanımı

Hopkinson yüksek hız darbe test cihazı matlab benzetimi için sistem geliştirilmesi üzerine Şekil 4.2’de yer alan blok diyagramı ön görülmüştür. Sistem özellikleri için belirli parametrelerin seçim ekranı oluşturulması test edilecek numune malzeme seçimi, vurucu çubuk boyu ile yükselteç kazancı, test sisteminde kullanılan gerinim ölçerlerin “gauge factor” değerleri girilmesi gerektiği bilinmektedir.



Şekil 4.2 SHPB test için blok diyagramı

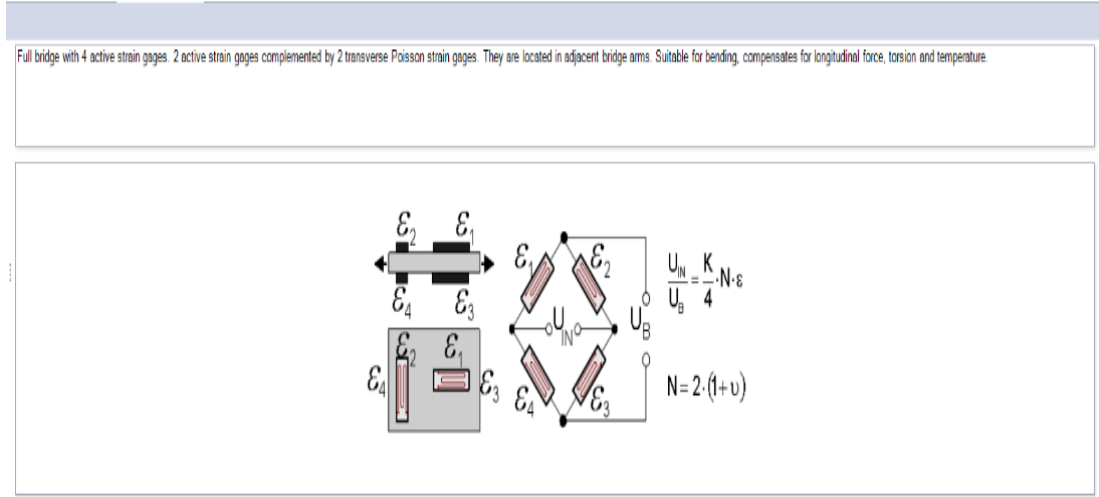
Yüksek hız darbe testlerinde veri kaydının daha kararlı yapılabilmesi ve bilgisayardan hızlı bir şekilde değerlerin yorumlanarak malzeme karakterizasyonu aşamasına geçilebilmesi adına datalogger (veri kayıt cihazı) olarak adlandırılan İMC markasına ait Şekil 4.3'te görseli bulunan cihazlar tasarlanmış olup bu sistemlerde kullanılmaktadır. Hız data kartının çalışma frekansı 100 kHz'dir.



Şekil 4.3 İMC veri kayıt cihazı (Kişisel arşiv, 2018)

Channel name	Straingauge
Coupling	Full bridge with Poisson stra...
Resistor	350 Ω
Mode	Stress
Bridge factor N	$2 \cdot (1 + \nu)$
Gauge factor	2.15
Unit	MPa
Transverse strain coeff. ν	0.3
Modulus of elasticity E	100 GPa
Input range	± 72000 MPa

Şekil 4.4 İMC Studio arayüz seçim ekranı



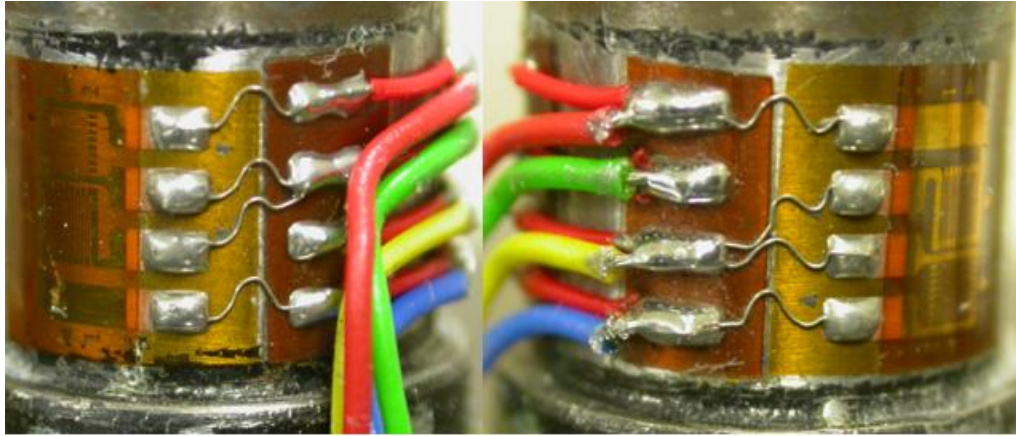
Şekil 4.5 İMC Studio gerinim ölçer köprü bağlantı görüntüsü

Şekil 4.4 ve 4.5 ‘te ise İMC veri kayıt cihazının arayüzü olan “İMC Studio” programının görselleri verilmiştir. Stres ölçümü için gerinim sensörlerin bu tez çalışmasında üçüncü bölümde aktarılan tam köprü devresi olacak şekilde bağlantısının yapılması sonucunda arayüz ekranında direnç değerlerinin seçilmesi, kullanılan sensörlerin çeşidine bağlı olarak gauge factor değerinin manuel olarak girilerek test işleminin gerçekleştirilmesi ve değerlerin eldesi sağlanmıştır. Arayüzdeki değerler standart olmayıp her bir test için seçilen komponentlere bağlı olarak değiştirilmekte ve seçilerek işlemler yapılmaktadır. Örneğin 350 ohm olan direnç değeri sabit değildir.

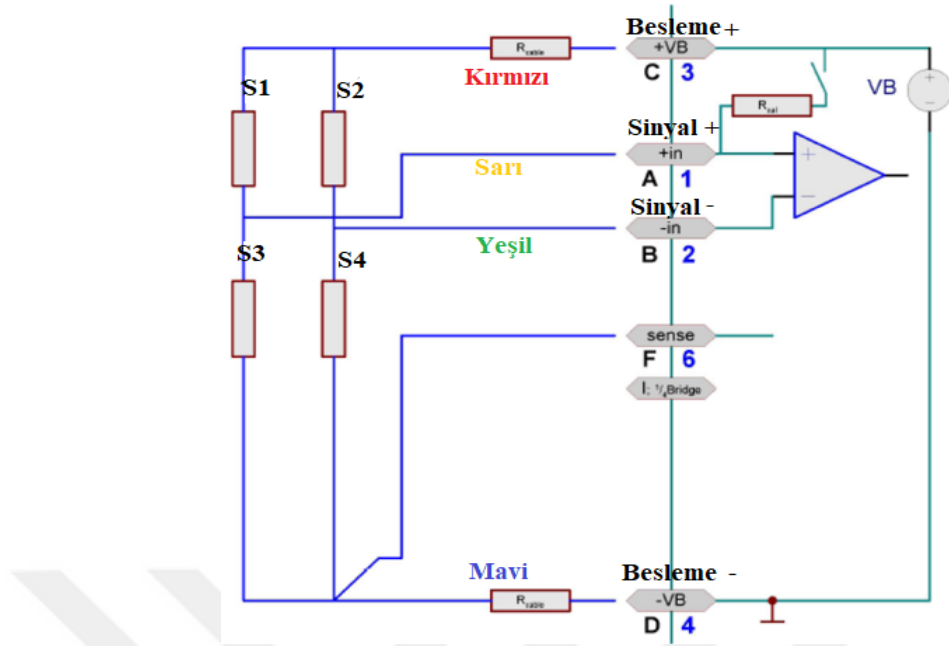
4.1.2 Sistemin Yüksek Hız İçin Geliştirilmesi

BAP projesi kapsamında yüksek hız SHPB test cihazının tasarımında belirlenen giriş- çıkış çubuklarının uzunlukları 1'er metre olacak şekilde çelik çubuk olarak ve çubuk çapı 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Bu belirlemeden yola çıkılarak Şekil 4.6'da görüldüğü üzere 20 mm çap uzunluğundaki çelik çubuğun üzerine deneysel tam köprü tipi sensörlerin resimde sağ tarafta bulunan giriş yani ileten çubuk üzerinde sol tarafta bulunan ise çıkış yani iletilen çubuk üzerine uygulanmıştır.

Bu tez için uygulamada kullanılan gerinim ölçer sensör tipi 2 adet birleşik şerit halindedir. Şekil 4.6'daki görselde 2 tane birleşik şerit halinde toplamda 4 adet gerinim ölçer sensör Wheatstone tam köprü devresi kurularak sonuç alınabilmesi adına kurulmuştur. Şekil 4.7'de verilen bağlantı şeması ise Şekil 4.6'nın devre şemasıdır. Bu uygulamada kullanılan sensörlerin 5 adet tel bağlantı kablo çıkışı mevcuttur. Genel olarak gerinim ölçerlerin 4 adet Çıkış teli bulunmaktadır bu sensörler kullanılırken ise sens girişi ile -VB girişi arasına köprü bağlantısının yapılması gerekmektedir. Burada önemli olan nokta her kablo üzerine düşecek olan gerinim değeri 0,5 V 'u aşmaması olmaktadır.



Şekil 4.6 Gerinim sensörü uygulama (EgeFren, 2018)

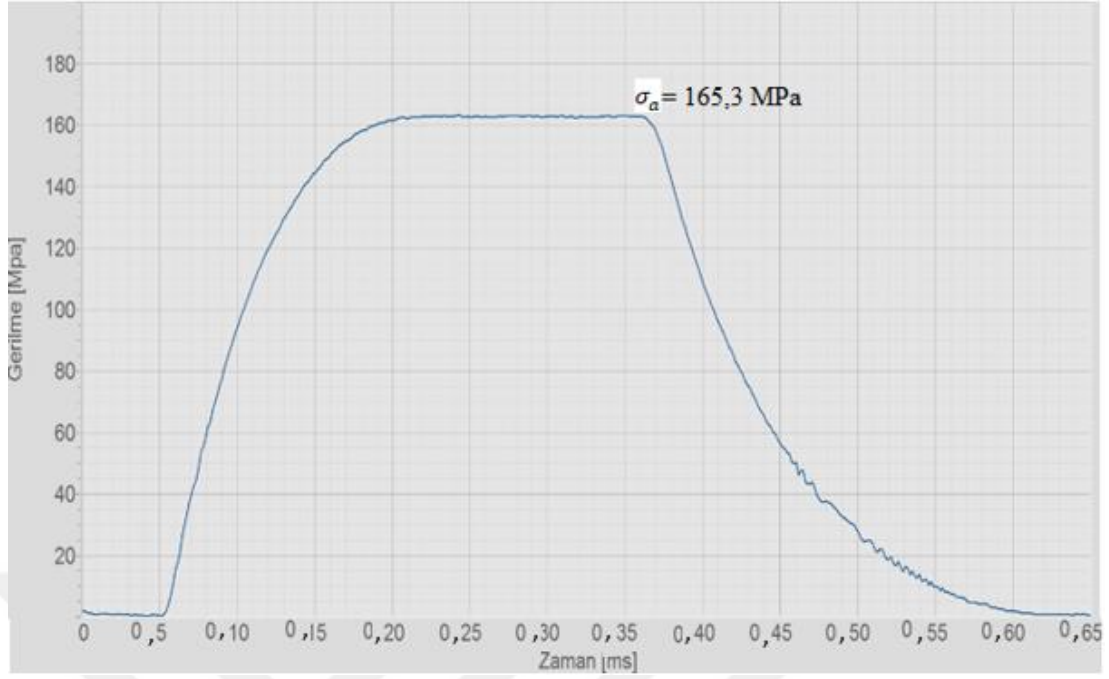


Şekil 4.7 Gerinim sensörleri W. köprü bağlantı şeması (EgeFren, 2018)

Şekil 4.7’de verilen S1, S2, S3 ve S4 olarak ifade edilen dört adet gerinim ölçerin Şekil 4.6’da kırmızı sarı yeşil ve mavi renklerdeki bağlantıları sırası ile pozitif besleme, pozitif sinyal, negatif sinyal, negatif beslemedir. Sense ucu ise negatif beslemenin olduğu yere yani mavi renkli kablo bağlantısından data loggerdaki bağlantı yerine gitmektedir.

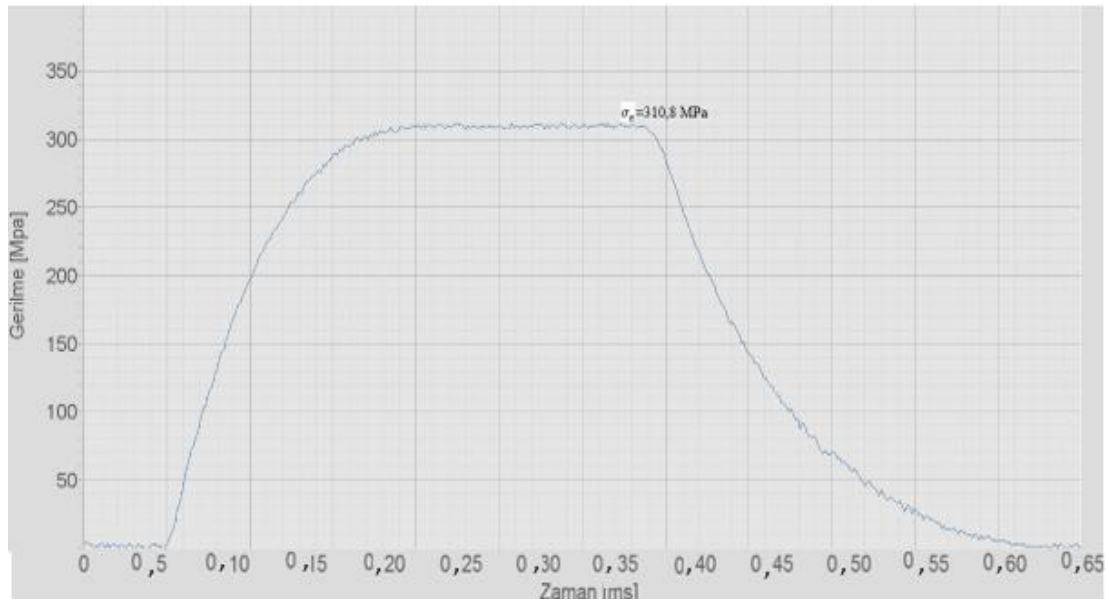
Bölüm 4.1.1’de aktarılan veri kayıt cihazı ile Şekil 4.6’da görseli verilen W. köprü bağlantılı gerinim ölçerlerin testi yapıldığında Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’daki gerilim (MPa)-Zaman (ms) grafikleri elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen grafiksel değerler için sistem çalışma basıncının 2 ile 6 bar basınç aralığında olduğu ve yapılan testlerin ise düşük hız için 2 bar daha yüksek hız için ise 4 bar olarak ve test edilen numune malzeme ilk testte 6063 Al ikinci ve üçüncü testte ise yüksek mukavemetli çelik olarak, numune uzunluğu ise 6mm kübik olarak sabit kullanıldığı kabul edilmiştir. Şekil 4.8’de şekil değiştirme yani Gerilim (MPa)-Zaman (ms) grafiğinde gerinim ölçerlerden veri kayıt cihazına gelen sonuç sonrasında ekrana yansıyan gerilme değeri 4 bar basınçta **165,3 Mpa** olarak ölçülmüştür. Test süresi 0,63 milisaniye sürmüştür. Bu test için deformasyon hızı ise yapılan hesaplamalar sonucunda **1.487,4 s⁻¹** olarak hesaplanmıştır.

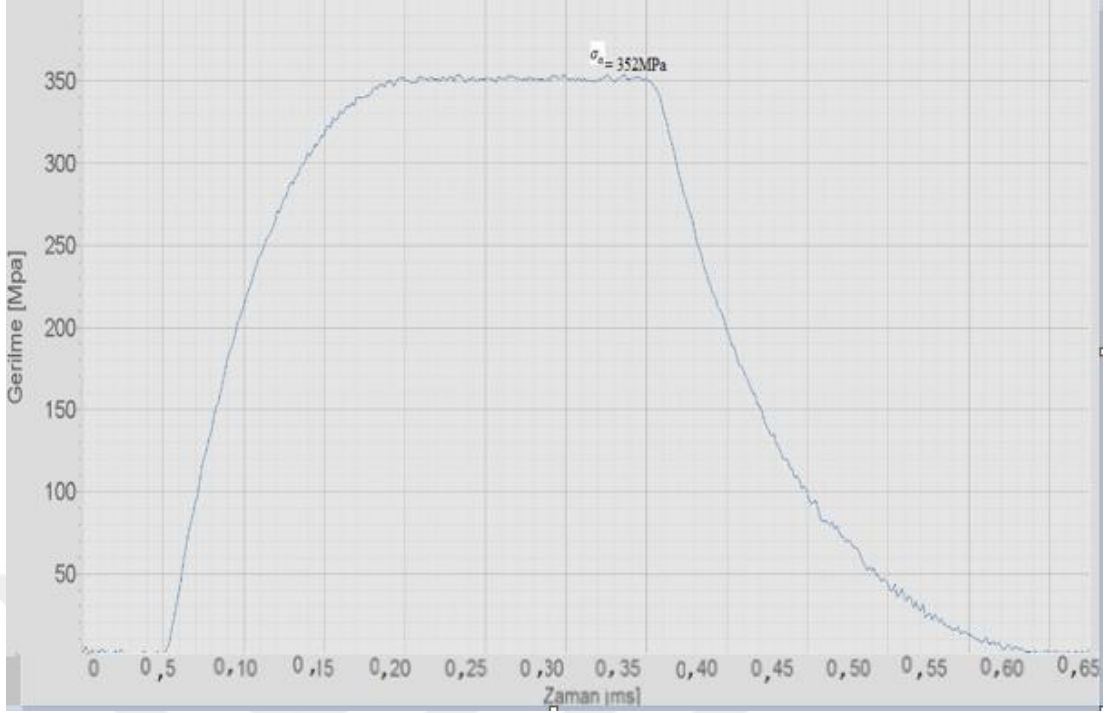


Şekil 4.8 Şekil değiştirme grafiği 1

Şekil 4.9’da şekil değiştirme yani Gerilim (MPa)-Zaman (ms) grafiğinde ise gerinim ölçerlerden veri kayıt cihazına gelen sonuç sonrasında ekrana yansıyan gerilme değeri 2 bar basınçta **310,8 Mpa** olarak ölçülmüştür. Test süresi 0,60 milisaniye sürmüştür. Bu test için deformasyon hızı ise yapılan hesaplamalar sonucunda **2.175,6 s⁻¹** olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 Şekil değiştirme grafiği 2



Şekil 4.10 Şekil değiştirme grafiği 3

Şekil 4.10’da şekil değiştirme yani Gerilim (MPa)-Zaman (ms) grafiğinde ise gerinim ölçerlerden veri kayıt cihazına gelen sonuç sonrasında ekrana yansıyan gerilme değeri 2 bar basınçta **352 Mpa** olarak ölçülmüştür. Test süresi 0,60 milisaniye sürmüştür. Bu test için deformasyon hızı ise yapılan hesaplamalar sonucunda **2.647,6 s^{-1}** olarak hesaplanmıştır.

Buradan elde edilen veriler sonucunda numunede deformasyon hızı ile malzemenin akma gerilmesi doğru orantılı olduğu görülmüştür.

4.2 Sistemin Hız ve Gerinim Değerlerinin Grafikselsel Olarak Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında elde edilen sistem vuruş hızı (m/sn) ile vuruş sonrası gerinim ölçerlerden elde edilen gerinim oranı (s^{-1}) değerleri için; sistemin fiziksel olarak belirlenen max vuruş hızı 70-80 m/sn elde edilen şekil değiştirme oranı ise 2.000-3.000 s^{-1} aralığında, test edilen numunenin kalınlığı 6 cm kübik olacak şekilde ve giriş çıkış çubukları toplam uzunluğu 2m olarak, iki gerinim ölçer sensör aralıkları numuneye

eşit mesafede olarak yerleştirilmiş şekilde ara mesafe 1m olarak, vuruş çubuk çapları ise 20 mm olarak ifade edilmektedir.

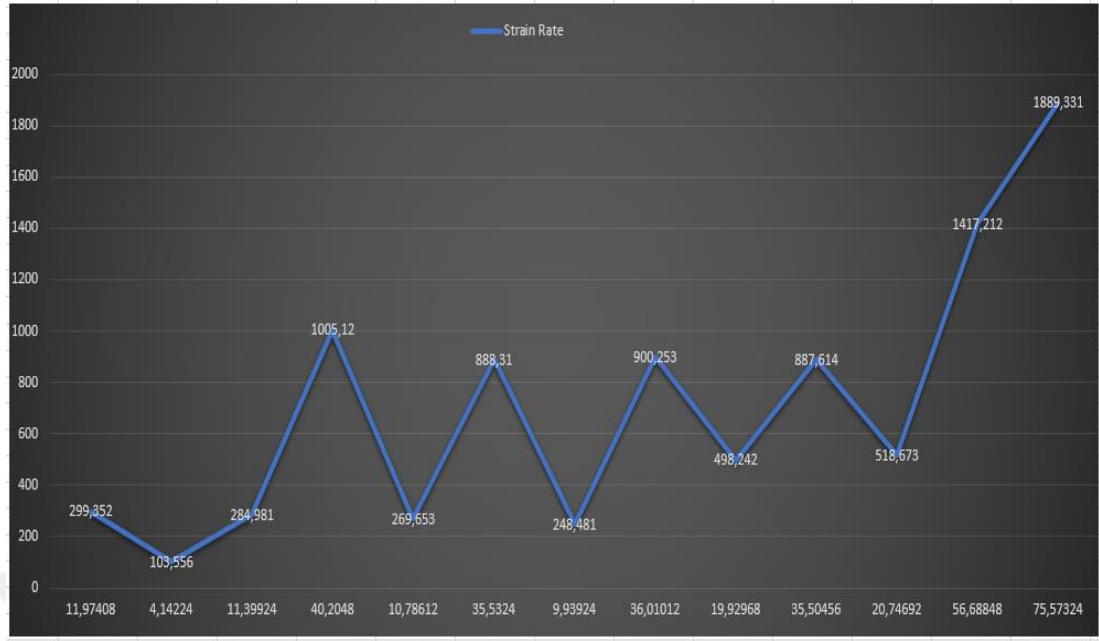
4.2.1 Sistemden Alınan Değerler ve Sonuçlar

Çalışmadan elde edilen vuruş başlangıç hız değeri ile vuruş anından sonra elde edilen gerinim değerleri karşılaştırması Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

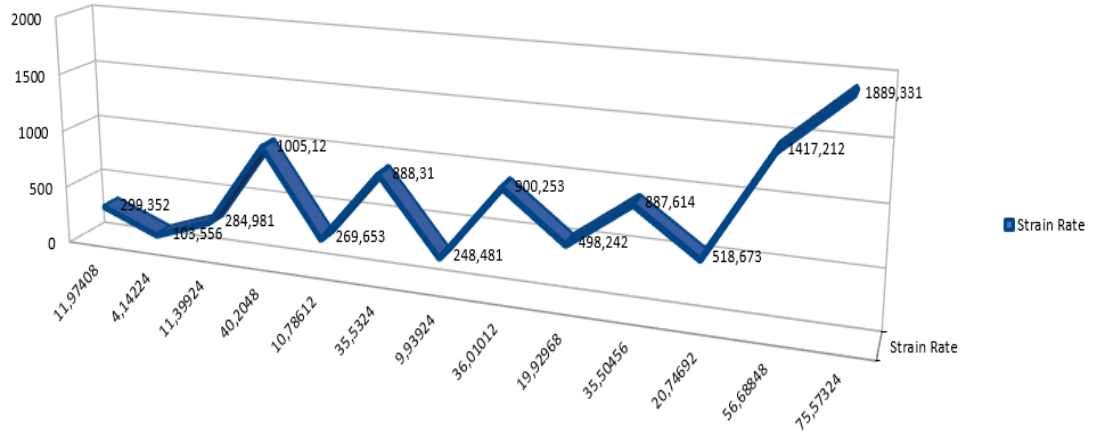
Tablo 4.2 Elde edilen hız ve gerinim değerleri

Gerinim oranı (1/s)	Hız (m/s)
299,352	11,97408
103,556	4,14224
284,981	11,39924
1.005,12	40,2048
269,653	10,78612
888,31	35,5324
248,481	9,93924
900,253	36,01012
498,242	19,92968
887,614	35,50456
518,673	20,74692
1.417,212	56,68848
1.889,331	75,57324
299,352	11,97408

Yüksek hız darbe test cihazının deneysel çalışmasından elde edilen veriler dahilinde vuruş hızı düşük tutulduğu zaman örneğin 4.2’deki tablodan elde edilen verilerde min hız değeri 4,15 m/sn civarında iken ölçülen gerinim oranı yaklaşık 104 s^{-1} , maximum vuruş hızı ise 75,6 m/sn civarında iken ölçülen gerinim oranı ise yaklaşık 1.890 s^{-1} olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Sistem hız-gerinim değerleri karşılaştırma grafiği 1



Şekil 4.12 Sistem hız-gerinim değerleri karşılaştırma grafiği 2

İki yarı grafik olarak elde edilen değerler tek bir grafikte birleştirilmiş ve test hız değeri ile gerinim oranı karşılaştırması yapılarak farklı bir çalışma sonucu elde edilmiştir.

Şekil 4.6'da yapılan test denemeleri ile Tablo 4.2'de verilen test değerleri oranı da kıyaslanmıştır. Şekil 4.6'da verilen deneysel sistemin grafiksel sonuçları data logger ile doğrulanmış olup Şekil 4.12'deki gösterilen değerler ise yazılımsal olarak alınan değerler sonucunda hız ve gerinim oranı olmak üzere yapılan hesaplamalarda oransal bir değer eldesi ile karşılaştırılarak doğrusal artış sonucu doğruluğu sağlanmıştır.

BÖLÜM BEŞ

YARGILAR VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, yüksek hız darbe test cihazları için ölçüm sistemleri olarak adlandırılan hız ve gerinim ölçümlerinin nasıl tesip edildiğine dair deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada temel hedef alınan yüksek hızlardaki testlerden önce daha düşük hızlarda numunede biriken dinamik kuvvet miktarının ölçümünde düşen ağırlık darbe test cihazlarında uygulanabilirliği test edilmiştir. Hem düşük hem de yüksek hızlı deneysel darbe davranışları incelenmiştir. Gerinim değeri için ise sensörler yardımı ile ölçüm için gerekli olan tüm test aşamaları kontrol amaçlı veri kayıt sistemleri ile doğrulanmış ve süreç aktarılmıştır.

Çalışmada kullanılan deneysel veriler karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve sonuç olarak elde edilen yargılar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Yüksek hız darbe test cihazında sistemin fiziksel tasarım parametrelerine göre elde edilen gerilim, gerinim, numune boyutu, numune malzemesi, max. aşılabilecek hız değeri ve miktarı gibi ölçüm sonucunda elde edilecek değerler ile değiştiği görülmüştür.
- Ölçüm sistemlerinden hız ölçümündeki değerler ile gerinim ölçümündeki değerlerin aynı malzeme seçiminde doğru orantılı olarak değiştiği elde edilmiştir. Kullanılan test malzemesinin akma dayanımının da deformasyon hızı ile doğru orantılı olduğu görülmüştür.
- Sistem fiziksel değerleri bu tez çalışmasında numune için 6 mm kübik çelik ve yüksek mukavemetli çelik, test cihazı toplam uzunluğu 2m, sistem çalışma basıncı 2-6 bar basınç aralığında, max vuruş hızı 80 m/sn, max. elde edilecek gerinim oranı $2.000-3.000 \text{ s}^{-1}$ aralığında belirlendiğinde elde edilen deney sonuçları; 75m/sn hızda 1.900 s^{-1} ve max. 2.648 s^{-1} olarak ölçülmüştür.
- Bu çalışma sonucunda yüksek hız testlerini gerektiren genellikle askeri amaçlı kullanılan yüksek mukavemetli çelik malzemelerinin karakterizasyonunun yapılmasında ve bu sayede projelerde kullanılacak malzemelerin dayanımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı ön görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Arman, Y., Gören, A., Çelik, A., Karpuz, M. ve Doğan, S., (2018). *Savunma sanayiinde kullanılan yüksek dayanıma sahip malzemelerin farklı ortam sıcaklıklarında karakterizasyonuna yönelik deneysel sistem geliştirilmesi ve prototip üretimi* 2018 / 205. Dokuz Eylül Üniversitesi: BAP birimi.
- Avinadav, C., Ashuach, Y. ve Kreif, R. (2011). Interferometry-based kolsky bar apparatus. *The Review of Scientific Instruments*, 82, 073908.
- Bancroft, D. (1941). The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars. *Physical Review*, 59, 588-593.
- Brizard, D. (2020). An impact test to determine the wave speed in SHPB: Measurement and uncertainty. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 6, 45-52.
- Casem D.T., Grunschel S.E., Schuster B.E. (2011). Interferometric measurement techniques for small diameter kolsky bars dynamic behavior of materials. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 1, 463-464.
- Chen, Rong, Huang, Sheng, Xia, Kaiwen ve Lu, F. (2009). A modified kolsky bar system for testing ultrasoft materials under intermediate strain rates. *The Review of Scientific Instruments*, 80 (7), 076108.
- Chen, W., Lu, Fujun ve Zhou, B. (2000). A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials. *Experimental Mechanics*, 40(1), 1-6.
- Chen W. ve Song B. (2011). *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*. New York: Springer.

Davies R. M. (1948). A critical study of the Hopkinson pressure bar. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical and Sciences*, 240(821), 375-457.

EgeFren, (2019). *Straingage Uygulamaları*, İzmir: Arge test laboratuvarı, Proses Tasarım ve Geliştirme Departmanı.

Elektrik Port. (2020). *Strain Gage*. 5 Aralık 2020, [https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/strain-gage-\(gerinimolcer\)/15163](https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/strain-gage-(gerinimolcer)/15163).

Fu, Haoda, Tang, X. R., Li, J. L. ve Tan, D. W. (2014). An experimental technique of split hopkinson pressure bar using fiber micro-displacement interferometer system for any reflector. *Review of Scientific Instruments*, 85, 045120-045120.

Gilat, A., Schmidt, T. ve Walker, A., (2008). Full field strain measurement in compression and tensile split hopkinson bar experiments. *Experimental Mechanics*, 49, 291-302.

Harding, J. ve Welsh, L.M. (1983). A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain. *Journal of Materials Science*, 18, 1810–1826.

Hauser, F. E. (1966). Techniques for measuring stress-strain relations at high strain rates. *Experimental Mechanics*, 6(8), 395-402.

Hopkinson B. (1914). A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 213, 437-456.

Huang, Sheng, Liu, H., Xia ve Kaiwen (2014). A dynamic ball compression test for understanding rock crushing. *The Review of Scientific Instruments*, 85(12), 123902.

Kaiser, M. A., (1998). *Advancements in the Split Hopkinson bar test*. Yüksek Lisans Tezi, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

Karpuz, M. ve Gören, A. (2019). Düşen ağırlık darbe test cihazı için optik hız ölçüm sistemi geliştirilmesi. 19. *Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, 19.

Kolsky, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society of London B*, 62(11), 676-700.

Korkmaz, M. E. (2019). Ferritik paslanmaz çeliğin malzeme yapısal denklem parametrelerinin belirlenmesi ve doğrulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 628-639.

Krafft, J. M., Sullivan, A.M. ve Tipper, F.F (1954). The effect of static and dynamic loading and temperatures on the yield stress of iron and mild steel in compression. *Proceedings of the Physical Society of London A*, 221, 114-127.

Kyowa Rmc Mühendislik. (2021). *Strain Gage*. 10 Ocak 2021, <https://www.rmc.com.tr/wp-content/uploads/2018/05/Strain-Gage.pdf>.

Lindholm, U. S. (1974). *Review of dynamic testing techniques and material behaviour*. United States: American Institute of Physics.

Landon J. W. ve Quinney H. (1923). Experiments with the Hopkinson pressure bar. *Proceedings Of The Physical Society Of London A*, 103, 622–643.

Malachowski, Jerzy, Baranowski, Pawel, Gieleta, Roman, Damaziak ve Krzysztof (2014). Split Hopkinson pressure bar impulse experimental measurement with numerical validation. *Metrology and Measurement Systems*, 21, 47-58.

- Nicholas, T. (1981). Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*, 21, 177-185.
- Nie, X., Song, B. ve Loeffler, C.M. (2015). A novel splitting-beam laser extensometer technique for kolsky tension bar experiment. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 1, 70–74.
- Peroni, M., Caverzan, Alessio, Solomos ve George (2016). A new apparatus for large scale dynamic tests on materials. *Experimental Mechanics*, 56(5), 785-796.
- Proton Fastcam. (2021). *Mini Hight Speed Cam*. 14 Haziran 2020, <https://photron.com/mini-range/>.
- Qiu, Y., Loeffler, C.M., Nie, X. ve Song, B. (2018). Improved experimental and diagnostic techniques for dynamic tensile stress-strain measurement with a kolsky tension bar. *Measurement Science and Technology*, 29(7), 075201.
- Ramesh, K.T. ve Narasimhan, S. (1996). Finite deformations and the dynamic measurement of radial strains in compression kolsky bar experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 33, 3723-3738.
- Gerlach, R., Kettenbeil, C. ve Petrinic, N. (2012). A new split hopkinson tensile bar design. *International Journal of Impact Engineering*, 50, 63-67.
- Sayman O. ve Arman Y. (2018). *Strain-Gage (Streng )  l  mleri Deney F y  *. Dokuz Eylül Üniversitesi: Makine M hendisli i Anabilim Dalı.
- Sharma S., Chavan V.M., Agrawal R.G., Patel R.J. ve Kapoor R., Chakravartty J.K. (2011), Split-Hopkinson pressure bar: An experimental technique for high strain rate tests. *Material Dynamics*, E/013.

- Song, Bo, Antoun, Bonnie, Connelly, Kevin, Korellis, John, Lu ve Wei-Yang (2011). Improved Kolsky tension bar for high-rate tensile characterization of materials. *Measurement Science and Technology*, 22 (4), 045704.
- Staab G. H. ve Gilat A. (1991). A direct-tension split hopkinson bar for high strain-rate testing. *Experimental Mechanics*, 31, 232–235.
- Swantek, S. D., Wicks, A. L. ve Wilson, L. T. (2001). An optical method of strain measurement in the split hopkinson pressure bar. *Proceedings of SPIE*, 4359, 1471-1477.
- Şimşek, Z. Ö. (2011). *Parçalı Hopkinson basma çubuğu deney düzeneği kurulumu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Thorlabs. (2021) *Pda dedektor*. 2 Ocak 2021, <https://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=PDA36A>.
- Togami, T. C., Baker, W. E. ve Forrestal, M. J. (1996). A Split Hopkinson bar technique to evaluate the performance of accelerometers. *Journal of Applied Mechanic*, 63, 353-356.
- Verleysen, P. ve Degrieck, J. (2004). A modified digital phase-shift moiré technique for impact deformation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 42(6), 653-671.
- Vishaypg. (2020). *Micro-measurements strain gage installations with m-b ond 200 adhesive, instruction bulletin*. 19 Aralık 2020, <http://www.vishaypg.com/docs/11127/11127B127.pdf>.

Yokoyama, Takashi, Kishida ve Keizo (1986). A microcomputer-based system for the high-speed compression test by the Split Hopkinson pressure bar technique. *Journal of Testing and Evaluation*, 14, 236-242.



EKLER

```
int sensor1 = 2;
int sensor2 = 3;
int t1=0,t2=0;
float dt=0; // milisaniye olarak geçen süre
float x=6.6; // milimetre cinsinden mesafe
float hiz;
void tik(void){
// t3=micros(); // mıllıs komutunun çalışma zamanını ölçmek için kullanılmıştır
t1=millis(); // başlangıçtan itibaren geçen süre t1'e yazilir.
// t4=micros(); // mıllıs komutunun çalışma zamanını ölçmek için kullanılmıştır
detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor1));// fazladan kesme tetiklemesini
engellemek için kullanılmıştır
}void tak(void) {
t2=millis(); // ikinci konumda başlangıçtan itibaren geçen süre t2'ye yazılması için
kullanılmıştır
dt=(t2-t1);
hiz=x/dt; // mm/ms = m/s cinsinden hiz değeri okumak için kullanılmıştır
serial.print(dt);
serial.print("ms ");
serial.print(hiz);
serial.println("m/s");
detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor2)); // fazladan kesme tetiklemesini
engellemek için kullanılmıştır
}
void setup()
{
serial.begin(9600);
pinmode(sensor1, input);
pinmode(sensor2, input);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor1),tik,falling); // sensör değeri ölçümüdür
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor2),tak,falling); }
```