

# Kauçuk Türü Malzemeler: Şekil Değişirme Hızı Etkileri

## Rubber-Like Materials: Strain Rate Effects

Vahap VAHAPOĞLU\*

P.K. 538, 07400, Alanya, Antalya

Geliş Tarihi/Received : 12.04.2010, Kabul Tarihi/Accepted : 07.07.2010

### ÖZET

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özellikleri malzemeye uygulanan şekil değişirme hızıyla değişmektedir. Uygulamadaki deformasyon proseslerinde kauçuk türü malzemeler konvansiyonel test cihazlarında test edilen şekil değişirme hızlarından daha yüksek hızlarda deforme edilmektedir. Bu sebeple konvansiyonel test cihazlarından elde edilen mekanik özellikler yüksek şekil değişirme hızları için kullanılamaz. Dolayısıyla malzemenin deformasyonundaki şekil değişirme hızı bilinmeli bu hızda malzemenin mekanik özellikleri belirlenmelidir. Özellikle bu durum malzemenin davranışını matematiksel olarak modelleyebilmek için önem arz etmektedir. Hazırlanan çalışmada, öncelikle, kauçuk türü malzemelerin çekme ve basma deformasyonu altındaki mekanik özelliklerini belirlemek için uygulanan deneysel teknik ve cihazlar sonrasında ise literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yarı-statik, düşük hızdaki dinamik, yüksek hızdaki dinamik ve yüksek hızdaki darbeleri deneysel çalışmalar olarak ayrılmıştır.

**AnahtarKelimeler:** *Kauçuk türü malzemeler, Şekil değişirme hızı, Hopkinson basınç çubuğu.*

### ABSTRACT

For rubber-like materials the mechanical behavior is strongly dependent on strain rate. Many of the deformation process for rubber-like materials are occurred at higher strain rate than applicable strain rate at conventional testing machine. For this reason, mechanical properties which are obtained from conventional testing machines can not be used for higher strain rate applications. So, operating strain rate for rubber-like materials must be known and mechanical properties of materials must be determined at this strain rate. This situation, especially, is important for mathematical modeling of rubber-like materials. In this study, firstly, experimental techniques and equipment employed for determining the mechanical behavior of rubber-like materials at different strain rates in tensile and compressive loading are presented. After then experimental studies of rubber-like materials for different strain rates in literature are reviewed. Experimental studies are separated as quasi-static, dynamic-low, dynamic-high and high velocity impact.

**Keywords:** *Rubber-like materials, Strain rate, Hopkinson pressure bar.*

### 1. GİRİŞ

Malzemelerin mekanik özellikleri malzemeye uygulanan şekil değişirme hızıyla değişmektedir. Bu nedenle tasarım ve imalatı yapılacak malzemelerin mekanik özellikleri günlük kullanımdaki deformasyon hızında veya bu hıza yakın hızlarda belirlenmelidir. Kauçuk türü malzemelerin kullanım yerindeki deformasyon hızı bilinmeli ve bu deformasyon hızında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deneysel veriler ile bünye denklemleri oluşturularak bilgisayarda simülasyonu yapılmalıdır (Cheng ve Chen, 2003).

Şekil değişirme hızı ( $\dot{\epsilon}$ ); birim zamandaki ( $t$ ) şekil değişiminin ( $\epsilon$ ) değişimi olarak tanımlanabilir ve birimi  $s^{-1}$  dir.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (1)$$

Buradaki şekil değişimi mühendislik veya gerçek şekil değişimi olarak tanımlanabilir. Sabit şekil değişim hızındaki deneylerde ise, şekil değişirme hızı; toplam şekil değişiminin toplam deney süresine oranı olarak da ifade edilebilir.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t} \quad (2)$$

Eğer,  $\epsilon$  mühendislik şekil değişirmesi ise, şekil değişirme hızı için,

\* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : vahap@ktu.edu.tr (V. Vahapoğlu)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3)$$

tanımlaması yapılabilir. Burada,  $L$  malzemenin deforme olmuş boyu,  $L_0$  malzemenin deforme olmamış boyu ve  $V$  ise malzemenin deforme edildiği hızdır. Denklem 3'de tanımlandığı üzere sabit deformasyon hızlı deney makinelerinde, sabit şekil değiştirme hızlarında deneyler gerçekleştirilir (Follansbee, 1992).

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için Mullins etkileri, gerilme gevşemesi, vizkoelastisite konuları üzerine araştırmalar, zaman zaman önem kazanmış ve araştırmacılar çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmışlardır. Şekil değiştirme hızının kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği deneysel çalışmalara olan ilgi ise sınırlı kalmıştır. Literatürde, var olan deneysel çalışmalar da, genellikle tek eksenli çekme veya tek eksenli basma deformasyonu ile gerçekleştirilmiştir (Vahapoğlu, 2006).

Malzemenin yüksek şekil değişim hızlarında deformasyonu sırasında, uzama ve kuvvet değerlerinin aynı anda ölçülmesindeki zorluklar sebebiyle, 1900'lü yılların başlarında, deneyler genellikle düşük şekil değişim hızında gerçekleştirilmiştir (Roth ve Holt, 1940). Fakat ölçme teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte yüksek şekil değiştirme hızlarında deneyler yapılmaya başlanmış ve hidrolik deneyi, kam plastometre, düşme deneyi, split Hopkinson basınç çubuğu, genişleyen halka, Taylor darbe ve darbeleri plaka testleri geliştirilmiştir.

Malzemelerin yüksek şekil değişim hızındaki mekanik özellikleri iki açıdan önem kazanmaktadır. Birincisi, uygulamadaki mühendisler, kullandıkları malzemenin darbeleri yüklemelerde mekanik özellik ve dayanımlarını bilmek istemektedirler. İkincisi ise, şekil değiştirme hızının değişmesiyle birlikte gerilme-şekil değiştirme diyagramındaki moleküler düzeydeki değişimin sebebi fizikçiler tarafından inceleme konusudur (Kolsky, 1949).

Hazırlanan bu çalışmada, literatürde, kauçuk türü malzemeler için farklı şekil değiştirme hızı aralıklarında yapılan deneysel yöntem ve cihazlar tanıtılmış ve daha sonra bu yöntem ve cihazlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Kauçuk türü malzemelerde, şekil değiştirme hızının malzeme modellerine ilave edildiği teorik çalışmalar ise bir sonraki çalışmada sunulacaktır. Literatürde kauçuk türü malzemeler için kayma deformasyonunda yapılan deneysel çalışmaya rastlamadığı için kayma deformasyonu kullanılarak yapılan yöntemler bu çalışmada sunulmamıştır.

## 2. DENEY YÖNTEMLERİ VE CİHAZLARI

Malzemelere uygulanan şekil değiştirme hızları; yarı-statik, düşük hızlardaki dinamik, yüksek hızlardaki dinamik ve yüksek hızdaki darbeleri deneysel çalışmalar olarak dört gruba ayrılabilir (Meyers, 1994). Tüm bu şekil değiştirme hız bölgelerindeki geçişler kesin çizgiler ile ayrılmamış olmakla beraber, genel bir aralık tanımları Tablo 1'de sunulmuştur. Birinci grup, yarı-statik deneyler olarak da adlandırılmakta olup deneyler  $10^{-4} - 10^{-1} s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında mekanik test cihazlarında yapılmaktadır. Birçok çekme, basma ve kayma deneyleri yarı-statik şartlar altında standart olarak gerçekleştirilmektedir. Bu hızlarda, ölçüm sensörlerinde ivmesel etkiler ortaya çıkmadığı için deney numunesinde gerilme dalga ilerlemesi dikkate alınmamaktadır (Anon., 2005).

Düşük hızlardaki dinamik deneysel çalışmalar  $10^{-1} - 10^3 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında yapılmaktadır. Bu aralıkta deneyler servo hidrolik, kam plastometre ve düşme testi deney cihazlarında yapılmaktadır. Servo hidrolik deney cihazları, mekanik deney cihazlarına benzer olmakla birlikte bu cihazlarda özel deney ölçüm sensörleri ve ekipmanları kullanılmaktadır. Kuvvet ölçümünde piezo elektrik kuvvet ölçme sensörü ve yer değiştirme ölçümünde ise temassız şekil değiştirme ölçüm sensörleri kullanılmaktadır (Anon., 2005). Bu şekil değiştirme hız aralığı için uygulamada olan bir diğer deney tekniği ise kam plastometre tekniğidir. Bu teknikte malzeme basma deformasyonuna maruz kalmaktadır. Daha nitelikli test sonuçları istenildiği zaman, özellikle daha yüksek yüklerde, düşme testi uygulanabilecek bir diğer tekniktir. Bu şekil değiştirme hız bölgesinde numunedeki elastik dalga ilerlemesi sebebiyle atalet kuvvetleri etkin rol oynamaya başlamakta bu sebeple de deney makinaları önem arz etmektedir (Meyers, 1994).

**Tablo 1. Şekil değiştirme hız aralıkları.**

Bölge	Şekil değiştirme hız aralığı ( $s^{-1}$ )
Yarı-statik	$10^{-4} - 10^{-1}$
Düşük hızlardaki dinamik	$10^{-1} - 10^3$
Yüksek hızlardaki dinamik	$10^3 - 10^5$
Yüksek hızdaki darbeleri	$10^5 - 10^8$

Yüksek hızlardaki dinamik deneysel çalışmalar  $10^3 - 10^5 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında yapılmaktadır. Bu aralıkta deneylerin gerçekleştirilebilmesi için uygulanan yöntemlerinden bir tanesi Hopkinson-Kolsky basınç çubuğu deneyidir. Bu teknikte malzemeye uygulanacak yüklem, yüksek hız tabancası ile sağlanmakta ve  $10^4 s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarına kadar deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Bu aralıktan daha yüksek şekil değiştirme hızlarındaki deneyler Taylor darbe

testi ile gerçekleştirilebilir. Bu teknikte de, karmaşık gerilme dalga ilerlemesi ölçüm sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Bu bölgede genişleyen halka deneyi de uygulanan bir diğer deney tekniğidir (Follansbee, 1992).

Yüksek hızdaki darbeli deneysel çalışmalar,  $10^5 - 10^8 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında yapılmaktadır. Bu aralıkta malzemenin yüklenmesi yüzeye dik veya paralel olarak uygulanan çok hızlı darbeli yükleme veya patlayıcı madde kullanımı ile sağlanmaktadır. Darbeli plaka çarpma tekniği bu bölgede uygulanan bir tekniktir (Follansbee, 1992; Meyers, 1994).

Yukarıda tanımlanan şekil değiştirme hız aralıklarında birçok deney teknikleri kauçuk türü malzemeler için uygulanmıştır. Basma, çekme ve kayma deformasyonları için literatürde uygulanan test teknik ve cihazları, tüm malzemeleri kapsayacak şekilde, Tablo 2'de sunulmuştur. Buradaki aralıklar genel olarak tanımlanmıştır (Follansbee, 1992). Ayrıca tüm deformasyonlar için, şekil değiştirme hızlarını atalet kuvvetlerinin etkin olup olmamasına göre de ikiye ayırabiliriz.  $5 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızından küçük hızlarda malzemede atalet kuvvetleri ihmal edilebilir ve malzemenin dengede olduğu kabul edilir. Bu hızlarda numunede ve deney makinasındaki elastik dalga yayılımı önemsizdir. Bu hızdan büyük hızlarda ise atalet kuvvetleri ihmal edilememekte ve dalga yayılımı etkisi dikkate alınmalıdır (Meyers, 1994). Aşağıda farklı şekil değiştirme hızlarında deney yapabilmek için uygulanan deney teknik ve cihazları incelenmiştir

## 2. 1. Mekanik Deney Cihazları

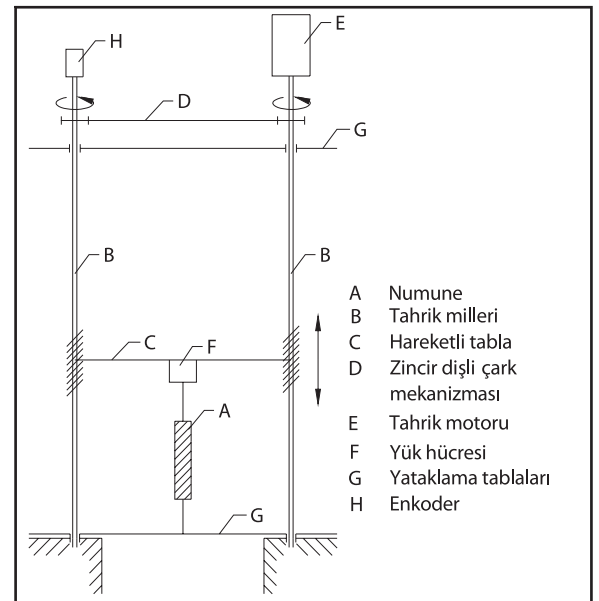
Mekanik deney cihazları genellikle vidalı millerin tahrikiyle hareket eden cihazlardır. Bu cihazlar numunenin bir ucunun sabit zemine bağlanması ve diğer ucunun deforme edilmesi ilkesine göre çalışır (Vahapoglu v.d., 2009). Özellikle düşük şekil değiştirme hızlarında mükemmel bir stabilite gösterirler. Bu cihazlarda uygulanabilen maksimum şekil değiştirme hızı  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'dir (Follansbee, 1992). Bu tür bir deney cihazının genel çalışma prensibi Şekil 1'de verilmiştir (Vahapoglu v.d., 2009). Şekil 1'den de görüleceği üzere E motoru ile tahrik edilen B milleri, C hareketli tablasını yukarı aşağı hareket ettirmekte ve dolayısıyla da numune deforme edilmektedir. Bu sırada H artımsal enkoderden yer değiştirme ve F yük hücresinden ise malzemeye uygulanan kuvvet okunmaktadır.

Deneylerde, genellikle, malzemeye uygulanan kuvveti ölçmek için strain gage tipi yük hücreleri kullanılmaktadır (Anon., 2005). Malzemede meydana gelen yer değiştirme ise mekanik uzama ölçerler vasıtasıyla ölçülmektedir. Burada ya artımsal enkoder ya da numune üzerine iki noktadan temas ettirilen

uzama ölçerler ile yer değiştirme ölçülmektedir (Anon., 2005). Genellikle bu cihazlarla sabit çene hızında deneyler gerçekleştirilebilmektedir.

**Tablo 2. Şekil değiştirme hız aralıkları ve deney cihazları (Follansbee, 1992).**

Deformasyon	Şekil değiştirme hız aralığı ( $\text{s}^{-1}$ )	Deney tekniği ve cihazları
Basma	$< 10^{-1}$	Mekanik test cihazı
	$10^{-1} - 10^2$	Özel hidrolik test cihazı
	$10^{-1} - 5.10^2$	Kam plastometre ve düşme test cihazı
	$2.10^2 - 10^4$	Hopkinson basınç çubuğu (basma) cihazı
	$10^4 - 10^5$	Taylor darbe test cihazı
Çekme	$< 10^{-1}$	Mekanik test cihazı
	$10^{-1} - 10^2$	Özel hidrolik test cihazı
	$10^2 - 10^4$	Hopkinson basınç çubuğu (çekme) cihazı
	$10^4$	Genişleyen halka test cihazı
	$> 10^5$	Darbeli plaka test cihazı
Kayma	$< 10^{-1}$	Mekanik kayma test cihazı
	$10^{-1} - 10^2$	Özel hidrolik kayma test cihazı
	$10 - 10^3$	Burulmalı darbe test cihazı
	$10^2 - 10^4$	Hopkinson basınç çubuğu (burulma) cihazı
	$10^3 - 10^4$	Çift çentikli kayma ve punç test cihazı
	$10^4 - 10^7$	Basınç-kayma darbeli plaka test cihazı

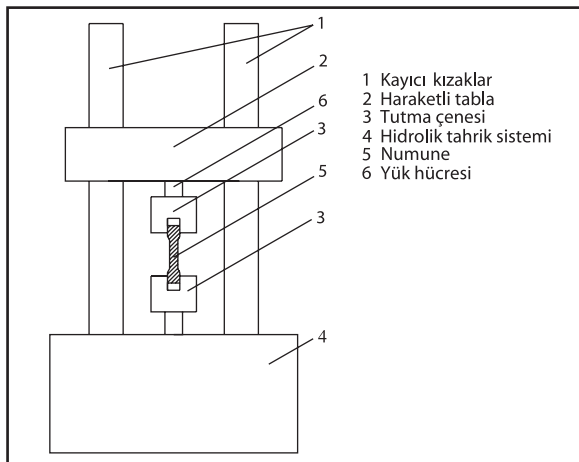


**Şekil 1. Mekanik test cihazının genel çalışma prensibi (Vahapoglu, 2006; Vahapoglu v.d., 2009).**

## 2. 2. Hidrolik Deney Cihazları

Mekanik deney cihazlarından daha yüksek şekil değiştirme hızlarında deneyler yapabilmek amacıyla servo hidrolik deney cihazları geliştirilmiştir (Şekil 2). Bu cihazların çalışma prensibi mekanik cihazlarla aynı olmakla birlikte özel ölçüm cihaz ve ekipmanları gerektirmektedir. Deneyler sabit çene hızında gerçekleştirilmektedir. Bu tür makinalarda  $10^3 s^{-1}$  şekil değiştirme hızına kadar deney yapılabilmesine rağmen ölçüm sensörlerin bu şekil değiştirme hızında kuvvet ve yer değiştirmeyi ölçme hassasiyetlerinin düşmesinden (Nakajima ve Harrell, 1983) deneyler  $200 s^{-1}$  hızına kadar yapılmaktadır (Follansbee, 1992). Fakat bu hızda bile deneysel verilerin hassasiyeti sorgulanabilir.

Şekil değiştirme hızının artmasıyla kuvvet ve yer değiştirme ölçümleri zorlaşmaktadır. Kuvvet ölçümünde  $1 s^{-1}$  şekil değişimden büyük hızlarda strain gage tipi yük hücresi yerine piezoelektrik tipi yük hücresi kullanılmamalıdır. Fakat bu tip yük hücreleri ise özel sinyal şartlandırma ekipmanları ve düşük kapasiteli kablo kullanımı gerektirmektedir (Follansbee, 1992). Benzer şekilde yüksek şekil değiştirme hızlarında, mekanik deney cihazlarında olduğu gibi mekanik uzama ölçerler de kullanılamamaktadır. Numunenin ilk deformasyonu sırasındaki ivmelenme sebebiyle uzama ölçerde kayma meydana gelmekte bu ise hatalı ölçümlere sebebiyet vermektedir (Anon., 2005). Birçok hidrolik deney cihazlarında şekil değiştirme ölçümü için lineer değişken fark sensörü (LVDT) kullanılmaktadır. Bunun yanında temassız şekil değiştirme ölçümleri için optik, lazer ve video temassız uzama ölçerlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır (Follansbee, 1992).



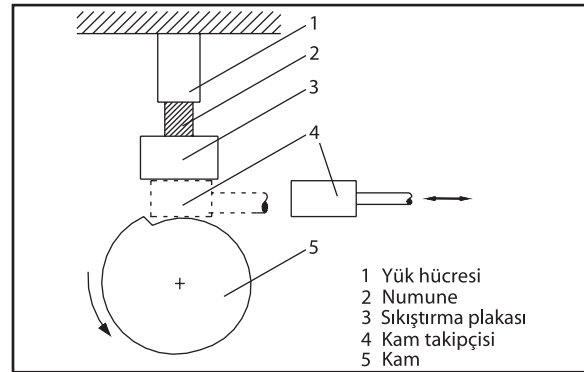
Şekil 2. Hidrolik deney cihazının genel çalışma prensibi (O'Toole, 2003).

## 2. 3. Kam Plastometre Deney Cihazı

Kam plastometre cihazları orta şekil değiştirme hızlarında ve basma deformasyonlarında kullanılmak üzere dizayn edilmiş deney düzenekleridir. İlk

kam plastometre cihazı Los tarafından Sheffield üniversitesinde yapılmıştır (Follansbee, 1992). Deney düzeneği daha sonraki yıllarda Loizou ve Sims (Loizou ve Sims, 1953) tarafından basma deformasyonu deneyleri için 1951-1953 yılları arasında saf kurşun malzemesi için kullanılmış ve geliştirilmiştir (Follansbee, 1992). Kam plastometre deney düzeneği, genellikle, silindirik numuneyi boyda % 50 kısalma oluncaya kadar homojen olarak deforme edebilmektedirler. Ayrıca kam plastometre cihazları ile, özellikle metal malzemeler için gerekli olan, sabit gerçek şekil değiştirme hızlarında deneyler gerçekleştirilebilir. Deneyleri sabit gerçek şekil değiştirme hızlarında yapabilmek için kam, logaritmik formda dizayn edilmeli ve kam mili sabit hızda dönmelidir. Kam milinin sabit hızda dönmesini sağlamak için, özellikle de numunenin sıkıştırılması sırasında, volan kullanılmalıdır (Follansbee, 1992).

Kam plastometre deney cihazında kam mili hidrolik motor tarafından tahrik edilerek döndürülmektedir. İlk konumda hidrolik motor önceden belirlenmiş hızda serbest olarak dönmektedir. Daha sonra kam takipçisi yatay hareket ederek kam mili ile temas eder (Şekil 3'de kesikli çizgi ile gösterilmektedir). Kam milinin  $360^\circ$  dönmesi ile kam takipçisi numuneyi sıkıştırmakta ve böylelikle numunenin basma deformasyonu altında şekil değiştirmesi sağlamaktadır (Şekil 3). Bu metotla  $0,1$  ve  $100 s^{-1}$  şekil değiştirme hız aralığında deneyler gerçekleştirilebilmektedir (Meyers, 1994).

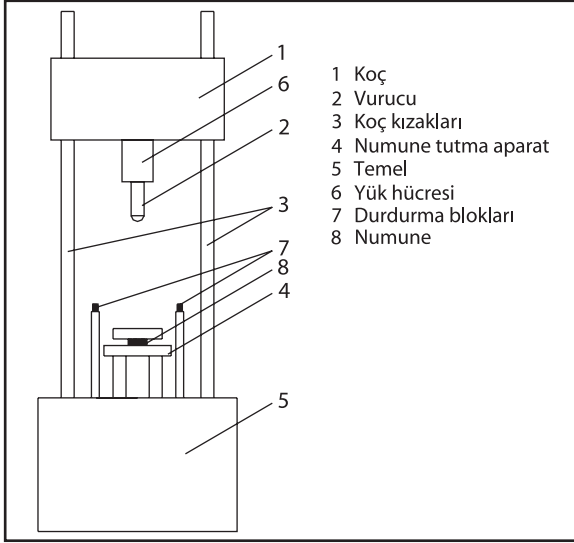


Şekil 3. Kam plastometre cihazının genel çalışma prensibi (Meyers, 1994).

## 2. 4. Düşme Deney Cihazı

Düşme deney cihazında, belirli bir kütleli numune üzerine düşmesiyle gerçekleştirilmekte ve numunede meydana gelen bası deformasyonu belirlenmektedir. Servo hidrolik ve kam plastometre deney cihazları ile elde edilemeyen şekil değiştirme hızlarındaki deneyler bu cihazla yapılabilmektedir. (Follansbee, 1992). Bu cihazla, genellikle, basma deformasyonu uygulanmasına karşılık uygun bağlama aparatları ile, nadiren de olsa, çekme deformasyonlarında da deneyler yapılabilmektedir (Zabotkin v.d., 2003).

Düşme test cihazının genel çalışma prensibi Şekil 4'de verilmiştir. Burada, koç (1) kütlesi, malzemeye uygulanması istenen darbeye göre ayarlanabilmektedir. Koç ve buna bağlı bulunan vurucu (2), koç kızaklarında (3) istenen yüksekliğe kadar çıkarılıp bırakılarak numune üzerine darbe uygulanır. Malzemeye uygulanan kuvvet, yük hücresi (6) ile belirlenir. Yük hücresi ya sabit olacak şekilde temele (5) ya da koça (1) monte edilir. Bu deney düzenekleri ile maksimum kırılma kuvveti, absorbe edilen enerji, kırılma bölgesindeki yer değiştirme ve vurucunun hızı gibi birçok özellikler ölçülebilmektedir (Zabotkin v.d., 2003).



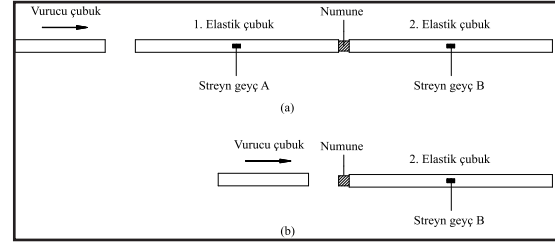
Şekil 4. Düşme test cihazının genel çalışma prensibi (Zabotkin v.d., 2003).

## 2. 5. Split Hopkinson Basınç Çubuğu Deney Cihazı

Split Hopkinson basınç çubuğu deneyi  $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hız bölgesinde oldukça yaygın olarak kullanılan bir deney düzeneğidir (Meyers, 1994). Hopkinson yüksek şekil değiştirme hızlarında deney yapabilmek için uzun elastik bir çubuk kullanmanın uygun olduğunu belirtmiş ve uzun elastik çubuğa mermi veya patlayıcı ile darbe uygulayarak malzemenin yüksek hızlardaki davranışını incelemiştir (Hopkinson, 1914). Hopkinson deneyinde; farklı deney düzenekleri tasarlanarak çekme, basma ve kayma deformasyonlarında deney yapılabilmektedir. Elastik çubuk boyunca dalga ilerlemesi matematiksel olarak belirlenebildiğinden herhangi bir noktadaki yer değiştirme ve gerilmeler dalga ilerlemesinden hesaplanabilmektedir (Follansbee, 1992).

Basma deformasyonu için temel iki Hopkinson basınç çubuğu konfigürasyonu vardır (Şekil 5). Şekil 5a'daki konfigürasyon en çok kullanılan olmakla birlikte ilk yıllarda Şekil 5b'deki konfigürasyon kullanılmaktaydı. Her iki teknikte prensip olarak aynı olmakla birlikte numune üzerine bası kuvveti birincisinde uzun iki çubuk vasıtasıyla, ikincisinde ise direkt

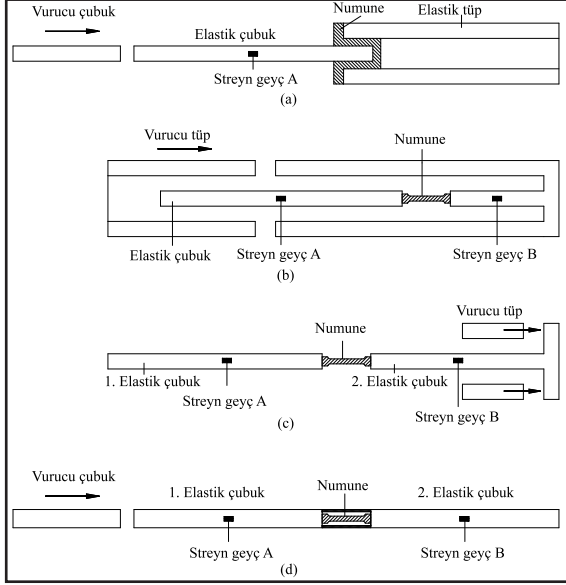
uygulanmaktadır. Şekil 5a'daki birinci elastik çubuğa, vurucu çubuk darbe uygulamakta ve çubuk içerisinde bası dalgası üretilmiş olmaktadır. Literatürde bu yöntemi ilk defa Kolsky (Kolsky, 1949) uyguladığı için bu yöntem bazen Kolsky basınç çubuğu veya split Hopkinson basınç çubuğu tekniği olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5b ise Hopkinson basınç çubuğu tekniği olarak adlandırılır. Vurucu çubuk, basınçlı gaz, sarkaç veya patlayıcı gibi yöntemlerle ivmelendirilmekte ve darbe üretilmektedir. Birinci çubuktaki zaman bağımlı şekil değişimi çubuğun ortasına yerleştirilen A strain gage'i ile ölçülmektedir. Birinci çubuğun numune ile temas eden kısmında dalganın bir kısmı numuneye iletilirken bir kısmı ise elastik çubuğa geri yansımaktadır. Yansıyan dalga ise birinci çubukta çeki dalgası meydana getirmektedir. Yansıyan dalganın meydana getirdiği yeni zaman bağımlı şekil değişimi ise yine A strain gage'i ile ölçülmektedir. Birinci çubuk tarafından numuneye uygulanan bası dalgası numune tarafından da ikinci elastik çubuğa iletilmektedir. İkinci çubuktaki zaman bağımlı şekil değişimi ise yine çubuğun ortasına yerleştirilen B strain gage'i ile ölçülür. Her iki elastik çubuktaki ölçümlerden ise numunenin gerilme şekil değiştirme davranışı belirlenir (Follansbee, 1992).



Şekil 5. Bası deformasyonu için hopkinson basınç çubuğu genel çalışma prensipleri. a) İki elastik çubuk kullanımı, b) Tek elastik çubuk kullanımı (Follansbee, 1992).

Çekme ve basma deformasyonu için uygulanan Hopkinson basınç çubuğu yöntemi genel olarak aynıdır. Farklılık; çekme kuvvetinin uygulanması, numune boyutu ve numunenin elastik çubuklara bağlantındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Genel olarak üç farklı Hopkinson basınç çubuğu tekniği, çekme deformasyonu için geliştirilmiştir (Şekil 6). Bu tekniklerden ilkinde (Şekil 6a) özel bir numune kullanılmaktadır. Birinci elastik çubuk içi dolu mil şeklinde, ikinci elastik çubuk ise içi boş tüp şeklindedir. Numune ikinci tüpün içerisine, birinci tüp de numune içerisine yerleştirilerek deney gerçekleştirilmektedir. Numunenin çekme deformasyonu vurucu çubuğun birinci çubuğa darbe uygulaması ile gerçekleşir. İkinci tip deneyde (Şekil 6b ve 6c) numune birinci ve ikinci elastik çubuklara vidalı bağlantı ile bağlanmaktadır. Burada vurucu çubuk birinci çubuk yerine ikinci çubuğa darbe uygulayarak malzemenin çekme deformasyonuna tabi tutulmaktadır. Üçüncü tip deneyde (Şekil 6d) ise

numune birinci ve ikinci çubuklara yine vidalı bağlantı ile bağlanmakta ve birinci ve ikinci çubuk arasında, elastik çubukla aynı çapta ve aynı malzemeden yapılmış, ara parça konur. Bu ara parça vurucu çubuk tarafından birinci elastik çubuğa uygulanan basma kuvvetini numuneye vermez. İkinci çubuğun ucu açık olduğu için malzeme çeki deformasyonuna maruz kalır (Follansbee, 1992).



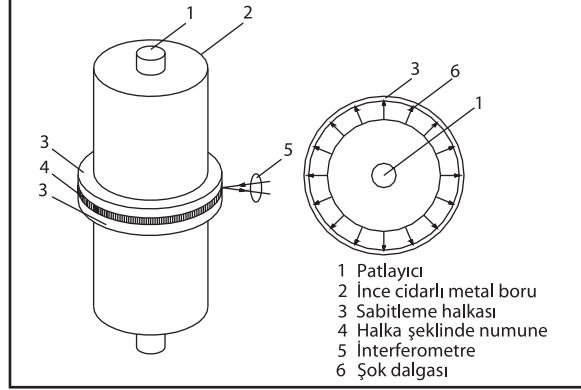
Şekil 6. Çekme deformasyonu için hopkinson basınç çubuğu genel çalışma prensipleri (Follansbee, 1992).

## 2. 6. Genişleyen Halka Deney Cihazı

Malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelemeye en az kullanılan metot, genişleyen halka deneyidir. Bu deney karmaşık olmakla birlikte malzemeye  $10^4 \text{ s}^{-1}$  şekil değişim hızına kadar çekme deformasyonu uygulayabilmektedir (Follansbee, 1992). Deneyde şekil değiştirme hızı sabit olmamakta ve deney boyunca şekil değiştirme hızı azalmakta ve eğer numune kopmazsa şekil değiştirme hızı sıfır değerine düşmektedir (Roland, 2006). Malzeme, deney sırasında dinamik tek eksenli gerilmeye maruz kalmakta fakat malzemede, deformasyon sırasında diğer deneylerde oluşan, dalga ilerlemesi meydana gelmemektedir (Follansbee, 1992).

İnce halka formdaki deney numunesi, ince cidarlı metal boru üzerinden kaydırılarak geçirilir. Metal borunun cidarı, elektromanyetik yüklemeye (Gourdin v.d., 1989) veya patlayıcı maddenin gaz basıncı veya aniden yüksek voltaja maruz telin hızlı buharlaşmasıyla (Al-Maliky ve Parry, 1994; Al-Maliky ve Parry, 1996) genişleyerek halka şeklindeki numunenin yüksek hızlarda çekme deformasyonu gerçekleştirilir (Şekil 7). Deney numunesi halka kalınlığı, halka çapının % 5'inden küçük olduğu sürece deneyler tek eksenli çekme deformasyonu olarak gerçekleşir (Roland, 2006).

Deney prensibi çok basit olmakla birlikte deneyi gerçekleştirmek için özel cihazlara ihtiyaç vardır. Deneyde ya numune yarıçapının zamanla değişimi ya da numunenin deformasyon sırasındaki hızı ölçülmekte ve buradan basit bir denklem takımıyla malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirlenmektedir (Follansbee, 1992; Roland, 2006). Ölçümdeki zorluklar ve pahalı bir deney olması sebebiyle de genişleyen halka deneyi pratikteki kullanımı oldukça sınırlıdır (Follansbee, 1992).



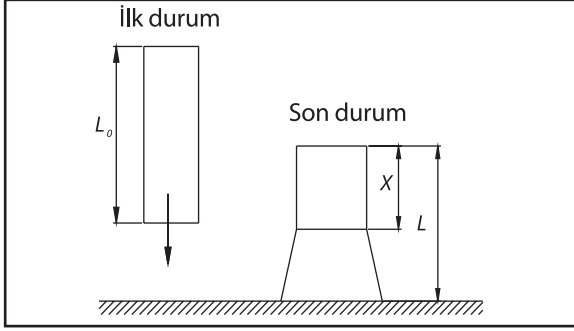
Şekil 7. Genişleyen halka deneyi genel çalışma prensibi (Meyers, 1994).

## 2. 7. Çubuk Darbe (Taylor) Deney Cihazı

II. Dünya savaşından önce malzemelerin dinamik davranışının belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Taylor 1930'ların sonlarına doğru malzemelerin bası deformasyonu altında dinamik davranışını inceleyebilmek için bir deney düzeneği tasarlamıştır (Taylor, 1946). Çalışmalarını II. Dünya savaşı sebebiyle ancak 1940'ın ortalarına doğru yayınlamıştır (Taylor, 1946; Taylor, 1948; Carrington ve Gayler, 1948; Whiffin, 1948). Deney yöntemi, silindir numunenin rijit bir duvara çarpıtılması ilkesine dayanmaktadır (Şekil 8). Deneyde, deney numunesi deformasyon sırasında ve sonrasında üniform kalmamaktadır (Greensmith, 1960). Taylor, silindir malzemede dinamik akış gerilmesini, malzemenin ilk boyu ( $L_0$ ), son boyu ( $L$ ) ve üniform deforme olan boyundan ( $X$ ) belirlemiş ve silindir numunedeki deformasyonu ise elastik ve plastik dalga ilerlemesi olarak ikiye ayırmıştır. Çalışmasında, rijit duvara çarpma sırasında malzemenin arka kısmının sabit bir hızda yavaşladığı kabulünü yapmıştır (Meyers, 1994).

Taylor çalışmalarını, iki Hopkinson çubuğunun kullanıldığı Kolsky'nin çalışmasından (Kolsky, 1949) az önce yayınlamıştır. Kolsky'nin çalışması, split Hopkinson basınç çubuğu tekniği olarak adlandırılmış ve standart bir teknik olarak uygulamada kullanılmaya başlanılmıştır. Ayrıca Kolsky'nin çalışmasında üniforma yakın gerilme ve şekil değiştirme hızında deneyler yapılabildiğinden Taylor'un çalışmasına göre üstünlük arz etmiştir. Bu sebeple de Taylor testi, literatürde, malzemenin

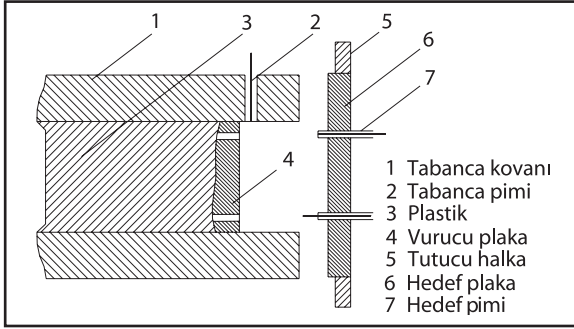
dinamik akma gerilmesinin belirlenmesi yerine bünye denkleminin doğruluklarının test edilmesinde kullanılan bir deney olmuştur (Meyers, 1994).



Şekil 8. Taylor darbe testinde numunenin ilk ve son hali (Taylor, 1948).

### 2. 8. Darbeli Plaka Deney Cihazı

Darbeli plaka testi, malzemenin tek eksenli şekil değiştirme deformasyonu altında, yüksek şekil değiştirme hızlarındaki akma verilerini ve şok dalga davranışını elde etmede kullanılmaktadır. Bu deney, vurucu düz bir plakanın ikinci bir hedef plakaya fırlatılmasıyla gerçekleştirilir. Plakayı fırlatmak için basınçlı gaz tabancaları, roket yakıtı tabancaları, manyetik ivmelendiriciler veya patlayıcılar kullanılmaktadır (Follansbee, 1992). Şekil 9'da tipik bir darbeli plaka deneyi cihaz sistematigi görülmektedir. Vurucu plaka, tabanca kovanı içerisinde konumlandırılmıştır. Vurucu plakanın hızı tabanca kovanıdaki pimden, hedef plakadaki pime varmak için geçen süreden hesaplanmaktadır. Hedef plaka bir tutucu halka ile desteklenerek radyal çeki dalgalarına engellenmektedir.



Şekil 9. Darbeli plaka deneyi genel çalışma prensibi (Follansbee, 1992).

## 3. KAUÇUK TÜRÜ MALZEMELER İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kauçuk türü malzemelerin farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneysel çalışmaları yarı-statik, düşük hızdaki dinamik, yüksek hızdaki dinamik ve yüksek hızdaki darbeli deneysel çalışmalar olmak üzere dört gruba ayrılmıştır. Aşağıda, literatürde, kauçuk türü malzemeler için her bir grupta yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Literatürde kauçuk türü malzemelerin şekil değiştirme hızının malzeme

modellerine ilave edildiği teorik çalışmalar ise bir sonraki çalışmada (Vahapoğlu) sunulacaktır.

### 3. 1. Yarı-Statik Deneysel Çalışmalar

Kauçuk türü malzemelerin deformasyonuna şekil değiştirme hızının etkisi, ilk defa Bouasse ve Carrière tarafından  $0,005-0,07 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında ve  $\lambda_{max} = 7$  uzama oranı için deneysel olarak incelenmiştir (Bouasse ve Carrière, 1903). Somerville, Ball ve Edland ise aynı deneyleri  $0,0033-0,033 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında ve uzama oranında gerçekleştirmişlerdir (Holt, 1932). Yapılan her iki çalışmada da artan şekil değiştirme hızında, mühendislik gerilmesinin azaldığı ifade edilmiştir. Bu ise, şu anki bilinen sonuçların aksine bir bulgudur (Lion, 1996; Miehe ve Keck, 2000; Haupt ve Sedlan, 2001).

Smith ve arkadaşları, 1956-1969 yılları arasında, SBR (Stiren-Bütadien Kauçuğu) kauçuğunun kopma gerilmesinin (çekme dayanımı) ve maksimum uzamanın sıcaklık ve çekme hızıyla değişimini incelemiştir (Smith, 1956; Smith, 1958; Smith, 1961; Smith, 1962; Smith ve Dickie, 1969). Çalışmalarında Instron test cihazında  $(-67.8) - (+93.3) ^\circ C$  sıcaklık ve  $0,158.10^{-3} s^{-1} - 0,158 s^{-1}$  çekme hızı aralıklarında, halka tipi numune kullanarak, gerilme-şekil değiştirme eğrisinden kopma noktasını deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda, malzemenin çekme dayanımının artan çekme hızı ve azalan sıcaklık ile arttığını gözlemlemişlerdir. Farklı sıcaklık ve çekme hızlarında, numunedey meydana gelen kopmaların nedenini araştırmışlar ve kopmaların denge hali için gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmemesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Literatürde ilk defa şekil değiştirme hızının, gerilme yumuşaması (Mullins Etkileri) üzerine etkisi Kraus, Childers ve Rollmann, tarafından araştırılmıştır (Kraus v.d., 1966). Araştırmacılar, karbon siyahı katkı maddesi katılmış stiren-bütadien kauçuklarında şekil değiştirme hızı ile gerilme arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemiştir. Deneylerden önce stiren-bütadien kauçuk numunesini uzama oranı 3,5'a kadar bir defa deforme ederek ön deformasyon prosedürü uygulamışlar ve sonra numuneyi  $25 ^\circ C$  sıcaklık ve  $0,0414 s^{-1}$  şekil değiştirme hızında deneyleri yapmışlardır. Buradan gerilme yumuşamasının, şekil değiştirme hızı ile bir sıcaklık fonksiyonunun çarpımına eşit olduğu kabulünü yapmışlar ve bu kabulü en iyi Williams-Landel-Ferry bağıntısının (Williams v.d., 1955) modelleyebileceğini belirtmişlerdir.

Lion, karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin, oda sıcaklığında, histerezis, şekil değiştirme hızı ve Mullins etkileri gibi inelastik özelliklerini modelleyebilmek için üç boyutlu vizkoplastik bir model önermiştir (Lion, 1996). Lion,

tüm deneylerden önce malzemeye tek eksenli çekme için  $\lambda = 2.0$  ve tek eksenli basma için  $\lambda = 0.7$  değerine kadar 12 defa, yükleme-boşaltma çevrimi uygulayarak Mullins etkilerinden bağımsız deneysel veriler elde etmiştir. Bu düşünce ilk olarak James ve Green (James v.d., 1975a; James ve Green, 1975b) tarafından uygulanmış ve literatürde bir çok araştırmacı (Chow ve Cundiff, 1987; Van den Bogert ve Borst, 1994; Lambert-Diani ve Rey, 1999) Mullins etkilerinden bağımsız deneysel veri elde etmek için malzemeyi ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Araştırmacılar, uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün nasıl yapılacağı konusunda bir araştırma yapmamışlardır. Bu noktada var olan deneyimlerden yararlanmışlardır. Lion, ayrıca, ön deformasyon prosedürü uygulanmış kauçukmalzemelerde farklı şekil değiştirme hızlarında deneyleri gerçekleştirmiş fakat ön deformasyon prosedürü uygulamanın şekil değişimine etkisinin olup olmadığını irdelememişlerdir. Çalışmasında, ön deformasyon prosedürü uygulanmış, numuneleri  $2.10^{-4} s^{-1}$ ,  $2.10^{-3} s^{-1}$ ,  $2.10^{-2} s^{-1}$ , ve  $2.10^{-1} s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında deforme etmiştir. Farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneylerden, çekme hızının artmasıyla malzemeye uygulanan gerilmenin arttığını belirtmişlerdir (Lion, 1996).

Bergström ve Boyce, büyük şekil değişimine maruz elastomerlerin zaman bağımlı davranışını ifade edebilmek için yeni bir bünye denklemi önermişlerdir (Bergström ve Boyce, 1997; Bergström ve Boyce, 1998). Bunun için kloropren ve nitril sentetik kauçuk numunelerini,  $0,1-0,0001 s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında tek eksenli basma deformasyonuna tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, deneylerden önce deney numunelerine 5-6 kez yükleme-boşaltma çevrimi uygulayarak deneylerdeki Mullins etkilerini gidermeyi ve tekrarlanabilir deneysel veriler elde etmeyi amaçlamışlardır. Bergström ve Boyce deneysel çalışmalarında, sabit şekil değişiminde gerilme ile şekil değiştirme hızının logaritmasının lineer değiştiğini, şekil değiştirme hızının artmasıyla malzemenin mukavemetinin arttığını, hem katkılı hem de katkısız elastomerlerde; yükleme eğrilerinde şekil değiştirme hızına olan bağımlılığın boşaltma eğrilerine nazaran daha fazla olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir. Malzemenin davranışını, denge hali ve zaman bağımlı olarak ikiye ayırarak üç boyutlu bir model önermişlerdir. Deneysel çalışmaları sonucunda önerdikleri malzeme modelinin, deneysel verileriyle farklı şekil değiştirme hızları ve farklı gerilme gevşemesi davranışı için uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Bergström ve Boyce, 1997; Bergström ve Boyce, 1998).

Miehe ve Keck, büyük şekil değiştirmelere maruz ve katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin monotonik ve çevrimsel davranışını modellemek için phenomenological bir malzeme modeli

önermişlerdir (Miehe ve Keck, 2000). Modelde gerilmeyi, elastik, vizkoelastik ve plastoelastik olarak üç kısma ayırmışlardır. Deneysel çalışmalarında Lion'un çalışmalarından (Lion, 1996) etkilenerek benzer deneyler yapmışlar ve malzemeye ön deformasyon uygulamışlardır. Fakat araştırmacılar ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerilme-şekil değiştirme verilerine etkisinin olup olmadığını irdelememişlerdir. Araştırmacılar vizkoelastik kısımdaki şekil değiştirme hızının malzemenin davranışına etkisini incelemek için malzemeyi  $5,4.10^{-4} s^{-1}$ ,  $5,4.10^{-3} s^{-1}$ ,  $5,4.10^{-2} s^{-1}$  ve  $5,4.10^{-1} s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma deformasyonları için ayrı ayrı deforme ederek şekil değiştirme hızının gerilme-şekil değiştirme verilerine etkisini araştırmışlardır. Farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneylerden, çekme hızının artmasıyla malzemeye uygulanan gerilmenin arttığı sonucuna varmışlardır. Şekil değiştirme hızına bağlı bu viskoz etkilerin, deformasyon sırasında polimer zincirleri arasındaki ikincil zayıf bağlardan kaynaklandığını belirterek kauçuğun bünye denkleminde viskoz ve şekil değiştirme hızının etkisinin katılması gerektiğini belirtmişlerdir (Miehe ve Keck, 2000).

Haupt ve Sedlan, katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin viskoplastik davranışını modelleyebilmek için tek eksenli çekme, burulma ve çekmeli burulma deneyleri yaparak yeni bir malzeme modeli önermiştir (Haupt ve Sedlan, 2001). Mullins etkilerinden bağımsız bir model önerebilmek için malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Fakat çalışmalarında ön deformasyon prosedürünü nasıl uyguladıklarını açıklamamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışının şekil değiştirme hızı ile değişip değişmediğini test etmek için ise malzemeyi  $3.10^{-5} s^{-1}$ ,  $3.10^{-4} s^{-1}$ ,  $3.10^{-3} s^{-1}$  ve  $3.10^{-2} s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında deforme etmişlerdir. Buradan malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışının non-lineer elastik ve şekil değiştirme hızına bağımlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Cheng ve Chen, EPDM sentetik kauçuğunun gerilme-şekil değiştirme davranışını yarı-statik şekil değiştirme hızı bölgesinde ( $\dot{\epsilon} = 0,004 - 0,4 s^{-1}$ ) incelemişlerdir (Cheng ve Chen, 2003). Yarı-statik şekil değiştirme hızı deneylerini, oda sıcaklığında, MTS servo-hidrolik tek eksenli çekme test makinesinde gerçekleştirmişlerdir. EPDM kauçuklarını  $\lambda_{max} = 3,0$  uzama oranında ve  $\dot{\epsilon} = 0,004 s^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon} = 0,04 s^{-1}$  ve  $\dot{\epsilon} = 0,4 s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında yapmış oldukları deneylerde artan şekil değişim hızlarında, sabit uzama oranı altında, malzemeye uygulanan gerilmenin hem yükleme hem de boşaltma yüklemelerinde arttığını belirtmişlerdir.



Fakat ön deformasyon prosedürü uygulamanın şekil değişimine etkisini araştırmamışlardır. Çalışmalarında, şekil değiştirme hızının malzemenin sadece özelliklerini değiştirdiğini, malzemede tekrarlı yükleme sebebiyle meydana gelen hasarın ise sadece maksimum uzama oranından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, literatürde ilk defa, gerilme-şekil değiştirme davranışına hem Mullins etkilerinin hem şekil değiştirme hızının hem de maksimum uzama oranının etkilerini birlikte incelemişlerdir. Bunun için deneysel çalışmalarında, sabit tekrarlı yükleme sayıları için, şekil değiştirme hızı ve maksimum uzama oranını karşılıklı olarak değiştirmişlerdir. Deney sonuçlarından şekil değiştirme hızı ve maksimum uzama oranının birbirinden bağımsız olduğunu gözlemlemişlerdir (Cheng ve Chen, 2003).

Vahapoğlu, doktora tez çalışmasında, SBR, NBR (Nitril-Bütadien Kauçuğu) ve NR (Doğal Kauçuk) kauçuk malzemelerinin, yarı-statik şekil değiştirme bölgesinde ve farklı şekil değiştirme hızlarında, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerilme-şekil değiştirme verilerine etkisinin olup olmadığını araştırmıştır. Ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinde gerilme-uzama oranı verileri hem yükleme hem de boşaltma deformasyonunda şekil değiştirme hızına bağımlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ön deformasyon prosedürü deneyleri uygulanması durumunda ise, SBR ve NR kauçuk malzemelerinin hem yükleme hem de boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsız olduğunu belirtmiştir. NBR kauçuk malzemesinde ise yüklemdeki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızına bağımlı iken boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsız olduğunu belirtmiştir.

### **3. 2. Düşük Hızlardaki Dinamik Deneysel Çalışmalar**

Beadle ve Stevens, yarı-statik şekil değiştirme hızlarından daha yüksek şekil değiştirme hızlarında deney yapabilmek için, darbe sarkacı deney düzeneğini kullanmışlardır (Vahapoğlu, 2006). Özellikle otomobil lastiklerinin yollardaki ani gerilme değişimlerini tanımlayabilmek için yüksek şekil değiştirme hızlarında deneylerin yapılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Daha sonraki yıllarda van Rossem ve Beverdam (Van Rossem ve Beverdam, 1931) ve Albertoni (Albertoni, 1937), darbe sarkacı deney düzeneğini kullanarak, kauçuk türü malzemelerin kopma anındaki absorbe edilen enerjiyi ölçmüşler ve en iyi malzeme karışımının belirlenmesi için deneylerin yüksek şekil değişimi hızlarında yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Albertoni, deney sarkacı deneyinde,  $\lambda = 4,5$  uzama oranı ve  $80 s^{-1}$  şekil değiştirme hızında malzemede kopma anındaki enerjinin belirlenmesi yanında

yüksek hızlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisini belirlemiştir (Albertoni, 1937). Çalışmasında, yüksek ( $80 s^{-1}$ ) ve düşük ( $0,16 s^{-1}$ ) şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme eğrilerini karşılaştırmıştır.

Holt;  $0,1-15 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığı ile  $\lambda_{max} = 5,5$  uzama oranında (Holt, 1931) ve Dart ve Guth ise;  $0,02-3 s^{-1}$  şekil değiştirme hızında deneyleri yapmışlardır (Dart ve Guth, 1939). Her iki grupta çalışmalarında, şekil değişimi hızının artmasıyla mühendislik gerilmesinin arttığını ifade etmişlerdir. Tüm bu çalışmalarda, numunelerdeki Mullins etkileri veya gerilme gevşemesi davranışını önleyecek deney prosedürleri uygulanmamıştır.

Hauk ve Neumann,  $0,5-7 s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında ve  $\lambda_{max} = 5,5$  uzama oranında yaptıkları deneyleri hem izotermal hem de adyabatik durum için gerçekleştirmişlerdir (Hauk ve Neumann, 1937). Deneylerinden, şekil değişime hızının artmasıyla mühendislik gerilmesinin arttığını ve şekil değişim hızının azalmasıyla adyabatik durum için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin izotermal durum için elde edilen eğriye yaklaştığını belirtmişlerdir.

Roth ve Holt, kauçuk türü malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki aşınma direncinin, düşük şekil değiştirme hızlarındaki aşınma direncilerinden daha iyi olup olmadığını araştırmak için düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarında tek eksenli çekme deneyleri yapmışlardır (Roth ve Holt, 1940). Deneylerinde dört farklı malzemenin düşük hızlardaki ( $0,08-0,1 s^{-1}$ ) deneylerini standart tek eksenli çekme makinalarında, yüksek hızlardaki ( $10 s^{-1}$ ) deneylerini ise numuneye asılan ağırlıkların (20-40 kg) serbest bırakılmasıyla yani düşme deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, yüksek hızlardaki deneylerin adyabatik ve ortalama  $10 s^{-1}$  sabit olmayan şekil değişim hızında gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, deneylerin yüksek şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmesinin malzemenin aşınma direncine etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında yüksek ve düşük şekil değiştirme hızlarında yapılan tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrilerinin yüksek deformasyonlarda ( $\lambda \geq 6$ ) çakıştığını gözlemlemişlerdir. Bu durumu ise deneyin adyabatik test koşullarında gerçekleşerek numunenin ısınmasına bağlamışlardır (Roth ve Holt, 1940).

Villars, kauçuk türü malzemelerin,  $\dot{\epsilon} = 2700 s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarına kadar, gerilme-şekil değiştirme eğrilerini belirleyebilmek için yeni bir deney düzeneği geliştirmiştir (Villars, 1950). Çalışmasında vulkanize edilmemiş ve katkı maddeli vulkanize edilmiş kauçukların çekme dayanımı ve kopma uzamalarını yüksek şekil değiştirme hızlarında belirlemiştir.

Kainradl ve Handler (Kainradl ve Handler, 1960), çalışmalarında, kauçuk malzemelerin  $\varepsilon = 2700 s^{-1}$  şekil değişimi hızına kadar çekme dayanımı ve yırtılma dirençlerini düşme testi ve mancınık cihazı ile belirlemişlerdir.

Greensmith (Field v.d., 1998) 0,001–20  $s^{-1}$  şekil değiştirme hız aralığında katkı maddesi katılmış ve katılmamış halka şeklindeki kauçuk numunelerin, tek eksenli çekme test cihazında gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Çalışmasında şekil değişim hızının çekme dayanımı ve kopma uzaması ile gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisini araştırmışlardır.

Dannis, otomobil lastiklerinin aşınma davranışının incelenmesi için, kauçuk türü malzemelerin yüksek şekil değişim hızında deneylerinin gerçekleştirilerek gerilme-şekil değiştirme verilerinin elde edilmesi gerektiğini belirtmiştir (Dannis, 1963). Bunun için, ağırlığın düşme prensibine göre çalışan tek eksenli çekme deney düzeneğini geliştirerek deneylerini  $\varepsilon = 500 s^{-1}$  şekil değişim hızında gerçekleştirmiş ve çalışmasında deney düzeneğini tanıtmıştır.

Hoge ve Rinde metal şekil verme makinasını modifiye ederek sıkıştırılmış gazın aniden bir pistonu itmesi ile çalışan deney düzeneklerinde polistiren köpüğünün yüksek hızlarda (100 – 1000  $s^{-1}$ ) gerilme-şekil değiştirme ölçümlerini yapmışlardır (Hoge ve Wasley, 1969; Rinde ve Hoge, 1971). Gale ve Mills, düşen ağırlık prensibine göre çalışan deney düzeneklerinde, motosiklet kasklarında kullanılan polistiren köpüğünün 200  $s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarına kadar basma deformasyonu deneylerini gerçekleştirmişler ve ağırlık üzerine yerleştirilen ivmeölçer ile köpük malzemesine uygulanan kuvvet ve yer değiştirmeyi ölçmüşlerdir (Gale ve Mills, 1985).

Zhurkov ve arkadaşları, birçok doğal ve sentetik kauçuk malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarına, şekil değiştirme hızının etkisini araştırmışlardır (Zhurkov v.d., 1962). Deneylerini 0,07–1300  $s^{-1}$  (2 mm/s – 31000 mm/s) hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin (kopma mukavemeti, kopma uzaması), malzemenin yapısına ve malzemeye katılan katkı maddesine bağlı olarak, şekil değiştirme hızıyla değişimini incelemişlerdir. Şekil değiştirme hızının artmasıyla birlikte, malzemenin elastisite modülü ve kopma mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerde şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma uzamasının azalmasına karşılık, katkı maddesi katılmamış kauçuk türü malzemelerde, şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma uzamasının çok daha karmaşık bir davranış gösterdiğini belirtmişlerdir (Zhurkov v.d., 1962).

Ayrıca, katkı maddesi katılmamış ve kristalize olmayan kauçuk malzemelerde şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma mukavemetinin arttığı buna karşılık katkı maddesi katılmamış ve kristalize olabilen kauçuk malzemelerde ise şekil değiştirme hızını artmasıyla kopma mukavemetinin önce azaldığı ve minimum bir değerden geçtikten sonra tekrar arttığını gözlemlemişlerdir. Bazı kauçuk türü malzemelerde ise şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma mukavemetindeki azalmanın deformasyon sebebiyle malzemede meydana gelen yapısal değişiklikten kaynaklandığını ve malzemedeki yapısal değişikliğe ise kristalizasyonun sebep olduğunu belirtmişlerdir. Kauçuk malzemede deformasyon sebebiyle kristalizasyonun meydana gelebilmesi için 1-2 saniyeye ihtiyaç vardır (Zhurkov v.d., 1962). Yüksek şekil değiştirme hızlarında deforme edilen kauçuk malzemelerde, malzemenin kristalize olabilmesi için gereken süre dolmadan malzeme deforme edildiğinden malzemenin kristalize olamadığını ve düşük kopma mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir.

Jerrams ve arkadaşları, sonlu elemanlar analizini kullanarak kauçuk türü malzemelerin metallerle temas problemlerini modellemeye çalışmışlardır (Jerrams v.d., 1998). Bunun için şekil değiştirme enerji fonksiyonu içerisinde yer alan malzeme sabitlerini, özellikle de Yeoh ve Ogden şekil değiştirme enerji fonksiyonu içerisinde yer alan malzeme sabitlerini, tek eksenli çekme deformasyonu için 0.2, 2, 4, 10, 20  $s^{-1}$  şekil değiştirme hızlarında belirlemişler ve bu malzeme sabitlerinin şekil değiştirme hızıyla değişimini incelemişlerdir.

Hoo Fatt ve yardımcıları Charpy darbe test cihazından esinlenerek yüksek hızlarda deneylerin yapılabilirdiği yeni bir çekme cihazı geliştirmişlerdir (Bekar v.d., 2002; Hoo Fatt ve Bekar, 2004). Deneyde, düşme yüksekliğine bağlı olarak, SBR kauçukları için 480  $s^{-1}$  şekil değiştirme hızına kadar deneylerini yapmışlardır. Deney düzeneğinde düşen sarkaç kayabilen bir çubuğa çarpmakta bu çubuk ise makaralar vasıtasıyla numunenin her iki ucuna bağlanan kayıcı çubukları çekerek numune deforme edilmektedir. Deneyde malzemeye uygulanan kuvvet yük hücresi, numunedeki yer değiştirme ise LVDT sensörü ile ölçülmüştür. SBR kauçuk numunesi için dinamik gerilme-uzama oranı verileri malzemede hasar meydana gelinceye kadar 13–530  $s^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında ve oda sıcaklığında (25 °C) elde edilmiştir. Araştırmacılar, çalışmalarında şekil değiştirme hızı ile malzemenin tokluğunun değişimini incelemişler ve deneysel verilerini üç farklı bölgeye ayırmışlardır. Ayrıca malzemenin darbeli çekme yüklemesi altındaki deformasyon ve hasar davranışını modelleyebilmek için hiperelastik malzeme modeli önermişlerdir (Hoo Fatt ve Bekar, 2004).

Mott ve arkadaşları, Hoo Fatt'ın deney düzeneğine (Hoo Fatt ve Bekar, 2004) bir çok özellikler daha ilave ederek 10-1600 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hız aralığında ölçüm yapabilen yeni bir deney düzeneği geliştirmişlerdir (Mott v.d., 2007). Deney düzeneğinde sarkaç yerine düşen bir ağırlık kullanmış ve 4:1 oranında L kolun kısa kenarına ağırlığı düşürerek numunenin çekme hızını arttırmışlardır. Deneylerde dinamik dengeyi sağlayabilmek için numune her iki ucundan da eşit ve ters yönde yüklemeye maruz bırakılmıştır. Şekil değişimini saniyede 100000 kare ölçüm alabilen kamera ile, kuvveti ise piezo elektrik uzama ölçerlerin kullanıldığı yük hücreleri ile ölçülmüştür.

### **3. 3. Yüksek Hızlardaki Dinamik Deneysel Çalışmalar**

Malzeme özelliklerinin yüksek hızlardaki yüklemelerde, statik olarak yüklemelerden, çok farklılık göstermesi 19. yüzyılda araştırmacıların artan bir şekilde ilgisini çekmiştir (Hopkinson, 1872a; Hopkinson 1872b; Hopkinson 1905; Dunn, 1897). Uygun deney düzenek ve cihazlarının olmaması bu alandaki deneysel çalışmaları engellemiştir (Hatt ve Marburg, 1899). Fakat, yine de, dairesel çubuklar gibi sınırlandırılmış ortamlardaki gerilme dalgalarının ilerlemesi teorik olarak incelenmiştir (Pochhammer, 1876; Chree, 1886; Chree, 1889; Chree, 1890; Love, 1927; Love, 1944). Literatürde, 1872 yılında, John Hopkinson'un yaptığı çalışma, ilk deneysel çalışma olarak düşünülür (Hopkinson, 1872a; Hopkinson 1872b). Hopkinson çalışmasında metallerin, statik yüklemeye göre, daha büyük ani çekme yüklemesine karşı koyabileceğini belirtmiştir. Fakat J.F. Bell kitabında (Bell, 1973), gerçek manada ilk yüksek şekil değiştirme hızı deneyi makinasının Dunn (Dunn, 1897) tarafından yapıldığını ispatlamıştır. Bell, ayrıca, kitabında H. Tresca'nın da (Tresca, 1878) konuya katkılarını vurgulamıştır.

John Hopkinson'un oğlu Bertram Hopkinson, uzun bir çubuğun ucuna, patlayıcı maddelerin patlaması veya merminin darbesi ile, oluşturulan impulsların şeklinin belirlenmesi için yeni bir balistik sarkaç metodu icat etmiştir (Hopkinson, 1914; Hopkinson, 1905). Deney düzeneği, kuvvet pulslarını taşıyarak, kuvvet ölçme sensörüne ileten uzun bir çubuktan oluştuğu için bu metot, literatürde, "Hopkinson Basınç Çubuğu Yöntemi" olarak adlandırılmıştır. Hopkinson metallere üzerine yapmış olduğu dinamik deneylerden malzemenin dinamik dayanımının, düşük şekil değiştirme hızındaki değerlerinden, en az iki katı daha büyük olduğu sonucuna varmıştır (Hopkinson, 1914). Deneylerde sofistike ölçüm metotları kullanmamasına rağmen deney sonuçları oldukça doğrudur (Meyers, 1994).

Hopkinson metodu daha sonraki yıllarda Landon ve Quinney (Landon ve Quinney, 1923) tarafından

geliştirilmiştir. Davies (Davies, 1948) ise, Hopkinson deney düzeneğinde modifikasyon yaparak ölçümleri elektriksel olarak gerçekleştirmiştir. Bu uygulama ise daha önce deneylerde karşılaşılan birçok olumsuzlukları gidermiştir.

Kolsky, Davies düzeneğini esas alarak gerilme-şekil değiştirme ölçümlerini yapmıştır (Kolsky, 1949). Kolsky çalışmasında split Hopkinson basınç çubuğu tekniğini tanıtmıştır. Bu teknikte, numuneyi iki basınç çubuğu arasına yerleştirmiş ve deforme olan numunedeki gerilme ve şekil değişiminin basınç çubuklarındaki yer değiştirme ile ilişkisini göstermiştir. Bu uygulamasından dolayı split Hopkinson basınç çubuğu deneyi, literatürde, *Kolsky Çubuğu* olarak da adlandırılmaktadır (Follansbee, 1992). Kolsky, 20 mikro saniye gibi çok kısa sürede gerçekleştirdiği deneylerde birçok malzemenin gerilme-şekil değiştirme verilerini elde etmiştir. Çalışmasında Hopkinson basınç çubuğundaki kuvveti, patlayıcı ile sağlanmıştır (Kolsky, 1949).

Literatürde polimer, köpük ve kauçuk türü malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışını metaller için kullanılan Split Hopkinson basınç çubuğu deney düzeneğinde incelendiğinde bu malzemelerin düşük mekanik empedans ve düşük malzeme dayanımına sahip olmaları sebebiyle deneylerden okunan sinyaller sağlıklı olmamakta ve elektronik gürültü ile karışmaktadır. Bu problemi çözmek için araştırmacılar Hopkinson basınç çubuğu deneyinde kullanılan uzun metal çubukların yerine vizkoelastik malzemeden yapılmış çubuklar kullanmışlardır (Wang v.d., 1994; Wang v.d., 1995; Gary v.d., 1995; Zhao ve Gary, 1995; Rao v.d., 1997; Zhao, 1997; Zhao v.d., 1997; Bacon, 1998). Vizkoelastik çubuklardaki dalga ilerlemesinin matematiksel analizi metallere göre çok komplekstir (Field v.d., 1998). Vizkoelastik malzemelerin dinamik yükleme altında mekanik özelliklerinin tam olarak karakterize edilememiş olması ve mekanik özelliklerinin sıcaklık, nem ve yaşlanma gibi etkenlerle değişmesi sebebiyle deneylerde vizkoelastik çubuk kullanmak beraberinde bir çok belirsizliği de getirmektedir (Chen v.d., 1999). Bu olumsuzlukları gidermek için, Chen ve arkadaşları düşük mekanik empedans ve düşük malzeme dayanımına sahip silikon kauçuk malzemesinin Hopkinson basınç deneyini yapabilmek için ikinci elastik çubuğu çelik malzeme yerine yüksek mukavemetli ve içi boş alüminyum alaşımı malzemeden yapmışlardır (Chen v.d., 1999). Alüminyum alaşımının düşük elastisite modülü ve içi boş çubuğun kesit alanının azalması sebebiyle elastomerik malzemelerin yüksek hızlardaki basma deneylerini istenen hassasiyette elde edebildiklerini belirtmişlerdir. Chen ve arkadaşları, önceki çalışmalarında (Chen v.d., 1999) önerdikleri içi boş alüminyum çubuk kullanmanın sinyal genliğini belli bir miktar arttırdığını fakat

deneye tabi tutulan malzemenin çok daha düşük empedans ve dayanıma sahip olması durumunda bu tedbirin yeterli olmayacağını belirtmişler ve alüminyum çubukta kullanılan yüzey tipi strain gage yerine piezo elektrik tipi kuvvet ölçer kullanmışlardır (Chen v.d., 2000). Deneylerinde, ikinci çubuğun çelik malzemeden yapıldığı deney düzeneklerinden üç kat hassas sonuçlar elde etmişlerdir. Homojen deformasyon ve denge halindeki gerilmeler elde edebilmek ve birinci elastik çubuktaki darbe uygulama süresini uzatmak için darbe şekillendirme tekniği uygulamışlardır. Bu tekniğin ayrıntılarını ise bir sonraki çalışmalarında vermişlerdir (Chen v.d., 2002). Esasen darbe şekillendirme tekniği ilk olarak bu çalışmada uygulanmamış, literatürde bununla ilgili çalışmalar yapılmıştır (Frew v.d., 2002).

Chen ve arkadaşları çalışmalarında, kauçuk türü malzemelerde, malzeme kalınlığının etkisini incelemişlerdir (Chen v.d., 2000; Chen v.d., 2002). Çalışmalarında dinamik gerilme-şekil değiştirme verilerinin kalınlıkla değişimini incelemişler ve yüksek şekil değiştirme hızlarında malzeme davranışının numune kalınlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuç ise, literatürde, daha önce yapılan sonuçlar ile uyumludur (Dioh v.d., 1993; Gray v.d., 1997). Chen ve arkadaşları sadece numune kalınlığını azaltmanın malzemede homojen deformasyon ve denge halindeki gerilme verileri elde etmeye yetmediğini belirtmişlerdir. Bunun için ayrıca darbe şekillendirme tekniğinin uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir.

Yang ve arkadaşları çalışmalarında,  $10^{-3}$ - $10^3$  s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı aralığında malzemenin davranışını modelleyebilmek için visko-hiperelastik malzeme modeli önermişlerdir (Yang v.d., 2000). Modelde, öncelikle, malzemenin hiperelastik malzeme davranışı daha sonra, ayrı olarak, vizkoelastik davranışını modellemişlerdir. Bu iki ayrı davranışı birleştirerek vizko-hiperelastik malzeme modelini önermişlerdir. Önerdikleri malzeme modelini ise üç boyutlu darbe durumlarının simülasyonlarında kullanarak modelin uygulanabilirliğini test etmişlerdir (Yang v.d., 2000). Yüksek şekil değiştirme hızlarındaki deneylerini Split Hopkinson deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyi yapılacak malzeme kauçuk olduğu içinde deney düzeneğinde metal malzemeden yapılmış basınç çubuğu yerine polikarbonat malzemeden yapılmış çubuk kullanmışlardır (Rao v.d., 1997). Önerdikleri malzeme modeli bası deformasyonu ve büyük şekil değişimlerde (>0,2) oldukça iyi modelleme yapabilmesine karşılık küçük şekil değiştirme bölgesinde doğru modelleme yapamamaktadır (Song v.d., 2004).

Shim ve arkadaşları çalışmalarında, silikon kauçuk malzemesinin davranışını modelleyebilmek için yeni bir vizko-hiperelastik malzeme modeli önermişlerdir

(Shim v.d., 2004). Silikon kauçuk malzemesini  $10^{-2}$  -  $10^3$  s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hız aralığında hem basma hem de çekme deformasyon için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Düşük şekil değiştirme hızlarındaki deneylerini Instron deney cihazında, yüksek hızlardaki deneylerini ise split Hopkinson deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri malzeme modellerinin yüksek şekil değiştirme hızlarında hem çekme hem de basma deformasyonu için oldukça iyi modelleme yaptığını belirtmişlerdir.

Cheng ve Chen, EPDM sentetik kauçuğunun gerilme-şekil değiştirme davranışını dinamik şekil değiştirme hızı bölgesinde ( $2800 - 3200$  s<sup>-1</sup>) incelemişlerdir (Cheng ve Chen, 2003). Dinamik şekil değiştirme hızı deneylerini çekme deformasyonu için split Hopkinson basınç çubuğu deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Song ve Chen diğer bir çalışmalarında ise, EPDM kauçuk malzemesinin basma deformasyonu altındaki davranışını split Hopkinson basınç çubuğu deney düzeneğinde deneylerini gerçekleştirerek malzemenin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışını modelleyebilmek için oldukça basit bir dinamik malzeme modeli önermişlerdir (Song ve Chen, 2003). Deneylerini  $6,5.10^2 - 4,7.10^3$  s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hız aralığında gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri malzeme modelinde Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunu (Mooney v.d., 1944; Rivlin, 1992) esas alarak, bu fonksiyon içerisine şekil değiştirme hızının etkisini ilave etmişlerdir. Deney düzeneklerinde daha önceki çalışmalarında (Chen v.d., 2000; Chen v.d., 2002) kullandıkları piezo elektrik kuvvet ölçme sensörü ve darbe şekillendirme tekniğini bu çalışmada da kullanmışlardır. Deneylerini gerçekleştirdikleri hızlar için önerdikleri model olumlu sonuç verse de malzeme modelini kısa bir şekil değiştirme aralığı için test etmişlerdir (Song v.d., 2004).

Song ve arkadaşları, EPDM sentetik kauçuğunun farklı şekil değiştirme hızlarındaki davranışını hem tek eksenli çekme, hem de tek eksenli basma deformasyonunu modelleyebilmek için 2003 yılında elde ettikleri deneysel verilerini (Cheng ve Chen, 2003; Song ve Chen, 2003) kullanarak yeni bir model önermişlerdir (Song v.d., 2004). Bu amaçla, kauçuğun büyük şekil değiştirme bölgesindeki davranışını modelleyebilmek için Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunu (Mooney v.d., 1944; Rivlin, 1992), küçük şekil değiştirme bölgesindeki davranışını modelleyebilmek için ise Maxwell modelini kullanmışlar ve her iki modelin birleştirilmesinden ve şekil değiştirme hızının etkisinin de dahil edildiği yeni bir model önermişlerdir. Araştırmacılar bu modelin EPDM kauçuk malzemelerinin tek eksenli çekme ve tek eksenli basma bölgesindeki

davranışını,  $10^{-3} - 10^3 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme bölgesinde modelleyebildiğini ifade etmişlerdir.

Lee ve arkadaşları çalışmalarında,  $10^{-3} - 10^4 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında Hopkinson basınç deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Lee v.d., 1998; Lee v.d., 2003; Lee ve Kim, 2003; Lee v.d., 2005; Lee v.d., 2006a; Lee v.d., 2006b). Lee, çalışmasında literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı üzerinde geçiş noktası ve tepe noktası tanımlamalarını yapmış ve kauçuk malzeme için geçiş noktası, tepe noktası, şekil değişimi ve şekil değiştirme hızı arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Quintavalla ve Johnson çalışmalarında, yüksek ( $\dot{\epsilon} > 5000 \text{ s}^{-1}$ ) ve düşük ( $\dot{\epsilon} < 0,5 \text{ s}^{-1}$ ) şekil değiştirme hızlarında golf toplarının yapımında kullanılan katkı maddeli polibütadien kauçuğunu deneye tabi tutmuşlardır (Quintavalla, 2004; Quintavalla ve Johnson, 2004). Düşük şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarını  $0,0003 - 0,35 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hız aralığında vidalı tip basma deney cihazlarında gerçekleştirmişlerdir. Yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışı ise split Hopkinson basınç çubuğu deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Bergström ve Boyce'un sonlu elastisite teorisini kullanarak önerdiği zaman bağımlı malzeme modelini (Bergström ve Boyce, 1998) deneylerini gerçekleştirdikleri tüm şekil değiştirme hız bölgelerini modelleyebilmek için kullanmışlardır. Malzeme modelindeki malzeme sabitlerini Marquardt-Levenberg non-lineer en küçük kareler yöntemi (Marquardt, 1963) ile belirlemişlerdir. Araştırmacılar Bergström-Boyce malzeme modelinin malzemenin davranışını başarıyla modellediğini belirtmişlerdir.

Shergold ve arkadaşları çalışmalarında, benzer mekanik davranış gösteren insan ve domuz derisine model malzeme olarak silikon kauçuk malzemesinin kullanılıp kullanılmıyacağını test etmek için domuz derisi ile silikon kauçuk malzemesini  $0,004 - 4000 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı aralığında gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemişlerdir (Shergold v.d., 2006). Hem domuz derisi hem de silikon kauçuğun, bası deformasyonu için, yarı-statik hızlardaki ( $0,004 - 0,4 \text{ s}^{-1}$ ) deneylerini Instron deney makinasında, düşük hızlardaki dinamik davranışını ( $40 \text{ s}^{-1}$ ) hidrolik deney makinasında ve yüksek hızlardaki dinamik davranışı ( $1500 - 4000 \text{ s}^{-1}$ ) ise Split Hopkinson basınç deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Split Hopkinson deney düzeneğinde çubuklar magnezyum alaşımından yapılmış ve kuvvet ölçümü yarı iletken strain gage ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinde darbe şekillendirici kullanılmıştır. Çekme deformasyonu sadece silikon kauçuk için  $0,3 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında her iki malzemenin de şekil değiştirme hızının değişmesiyle

mekanik özelliklerinin değiştiğini fakat domuz derisinin silikon kauçuğa göre daha hassas olduğunu belirtmişlerdir. Tek terimli Ogden malzeme modelinin (Ogden, 1972a; Ogden, 1972b) her iki malzemeyi de modelleyebildiğini belirtmişlerdir.

### **3. 4. Yüksek Hızdaki Darbeli Deneysel Çalışmalar**

Literatürde kauçuk türü malzemelerin yüksek hızlardaki darbeli deneysel çalışmalarına rastlanmamıştır. Bununla birlikte polimer malzemeler için Al-Maliky ve Parry (Al-Maliky ve Parry, 1994; Al-Maliky ve Parry, 1996) yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışını incelemek için genişleyen halka deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar polimer malzemelerin, split Hopkinson basınç deneyinden daha yüksek hızlardaki çekme davranışlarını inceleyebilmek için patlayan tel tekniği ve genişleyen halka tekniğini birleştirerek deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Halka şeklindeki polimerik malzeme ince cidarlı polimer tüpten kayarak geçirilmiştir. Polimer tüp içerisinde telin patlatılması ile elde edilen patlama dalgasıyla da malzemenin deformasyonu gerçekleştirilmiştir.  $1,6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızlarına kadar malzemenin çekme deformasyonu için gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemişlerdir. Çalışmada birçok polimer malzemenin deneyi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar split Hopkinson basınç deneyinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## **4. SONUÇ**

Kauçuk ürünler, özellikle, son yıllarda titreşim izolatörleri, enerji depolama araçları, darbeyi önleyici tampon malzeme olarak kullanımı gittikçe artmaktadır. Statik, dinamik ve darbeli yüklemelere maruz kalan kauçuk ürünlerin uygun malzeme seçimi ve tasarımının yapılabilmesi için geniş bir şekil değiştirme hız aralığında deneylerinin yapılarak statik ve dinamik gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmeli ve karşılaştırılmalıdır. Bu verilerden ise malzemenin farklı şekil değiştirme hızlarındaki davranışını modelleyebilecek ve içerisinde şekil değiştirme hızının etkisinin ilave edildiği malzeme modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Fakat, literatürde kauçuk türü malzemelerin inelastik, mekanik ve termal davranışları genel olarak düşük şekil değiştirme hızlarında incelenmiş büyük şekil değiştirme hızlarındaki davranışları ise sınırlı kalmıştır. Yüksek şekil değiştirme hızlarında da bu çalışmalar yapılmalıdır.

Hazırlanan bu literatür çalışmasında, öncelikle, şekil değiştirme hızının incelendiği deneysel yöntemler ve cihazları tanıtılmış ve her bir deneyin uygulama aralıkları verilmiştir. Daha sonra kauçuk türü malzemelerin farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneysel çalışmaları yarı-statik, düşük hızdaki dinamik, yüksek hızdaki dinamik ve yüksek hızdaki

darbeli deneysel çalışmalar olmak üzere dört gruba ayrılmış ve literatürde, kauçuk türü malzemeler için her bir grupta yapılan deneysel çalışmalar

sunulmuştur. Çalışmada teorik çalışmalara mümkün olduğu kadar yer verilmemiş daha çok konuyla ilgili deneysel çalışmalar incelenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Al-Maliky, N. and Parry, D.J. 1994. Measurement of High-Strain Rate Properties of Polymers Using an Expanding Ring Method. *Journal de Physique IV*. 4 (C8), 71-76.
- Al-Maliky, N. and Parry, D.J. 1996. A Freely Expanding Ring Technique for Measuring the Tensile Properties of Polymers. *Measurement Science and Technology*. (7), 746-752.
- Albertoni, G.J. 1937. Impact Machine for Rubber Testing. Determining the Stress-Strain Diagram at High Speed. *Industrial and Engineering Chemistry. Analytical Edition*. 9 (1), 30-34.
- Anonim, 2005. Testing at High Strain Rates. Axle Product Testing Brief. Ann Arbor, MI, Axle Products Inc.
- Bacon, C. 1998. An Experimental Method for Considering Dispersion and Attenuation in a Viscoelastic Hopkinson Bar. *Experimental Mechanics*. 38 (4), 242-249.
- Bekar, I., Hoo Fatt M.S. and Padovan J. 2002. Deformation and Fracture of Rubber Under Tensile Impact Loading. *Tire Science and Technology Journal*. 30 (1), 45-58.
- Bell, J.F. 1973. *The Experimental Foundations of Solid Mechanics*. Springer Verlag, Berlin.
- Bergström, J.S. and Boyce, M.C. 1997. "Time-Dependence of Elastomeric Materials: Experiments and Modeling" *Proceedings of the 10th International Conference on Deformation, Yield and Fracture of Polymers*. London, İngiltere.
- Bergström, J.S. and Boyce, M.C. 1998. Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers. *Journal of the Mechanical Physics of Solids*. 46 (5), 931-954.
- Bouasse, H. and Carrière, Z. 1903. Courbes de Traction du Caoutchouc Vulcanize. *Annales de la Faculté des Sciences*. (5), 257-283.
- Carrington, W.E. and Gayler, M.L.V. 1948. The Use of Flat Ended Projectiles for Determining Yield Stress. III: Changes in Microstructure Caused by Deformation at High Striking Velocities. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences*. (194), 323-331.
- Chen, W., Zhang, B. and Forrestal, M.J. 1999. A Split Hopkinson Bar Technique for Low-Impedance Materials. *Experimental Mechanics*. 39 (2), 81-85.
- Chen, W., Lu, F. and Zhou, B. 2000. A Quartz-Crystal-Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials. *Experimental Mechanics*. 40 (1), 1-6.
- Chen, W., Lu, F., Frew, D.J. and Forrestal, M.J. 2002. Dynamic Compression Testing of Soft Materials. *Journal of Applied Mechanics*. (69), 214-223.
- Cheng, M. and Chen, W. 2003. Experimental Investigation of the Stress-Stretch Behavior of EPDM Rubber with Loading Rate Effects. *International Journal of Solids and Structures*. (40), 4749-4768.
- Chow, C.L. and Cundiff, C.H. 1987. On the Characterization of Mechanical Properties of Rubber Vulcanizates. *Tire Science and Technology*. 15 (2), 73-96.
- Chree, C. 1886. Longitudinal Vibrations of a Circular Bar. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*. (21), 287-298.
- Chree, C. 1889. The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates: Their Solution and Application. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. (14), 250-369.
- Chree, C. 1890. On the Longitudinal Vibrations of Aelotropic Bars with One Axis of Symmetry. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*. (24), 340-359.
- Dannis, M.L. 1963. Stress-Strain Testing of Rubber at High Rates of Elongation. *Rubber Chemistry and Technology*. 36 (1), 28-49.
- Dart, F.E. and Guth, E. 1939. The Dependency of the Stress-Strain Relationship for Rubber Upon the Rates of Stretching. *Physical Review*. (55), 1141-1141.
- 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 Sciences*. 240 (821), 375-457.
- Dioh, N.N., Leever, P.S. and Williams, J.G. 1993. Thickness Effects in Split Hopkinson Pressure Bar Tests. *Polymer*. (34), 4230-4234.
- Dunn, B.W. 1897. A Photographic Impact Testing Machine for Measuring the Varying Intensity of an Impulsive Force. *Journal of Franklin Institute*. (144), 321-348.
- Field, J.E., Walley, S.M., Bourne, N.K. and Huntley, J.M. 1998. "Review of Experimental Techniques for High Rate Deformation Studies" *Proceedings of the Acoustics and Vibrations ASIA 98, Singapore*. pp. 9-38.

- Follansbee, P.S. 1992. High Strain Rate Testing. High Strain Rate Compression Testing. ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing, pp. 190-207, ASM International, Ohio.
- Frew, D.J., Forrestal, M.J. and Chen, W. 2002. Pulse-Shaping Techniques for Testing Brittle Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar. *Experimental Mechanics*. (42), 93-106.
- Gale, A. and Mills, N.J. 1985. Effect of Polystyrene Foam Liner Density on Motorcycle Helmet Shock Absorption. *Plastics and Rubber Processing and Applications*. 5 (2), 101-108.
- Gary, G., Klepaczko, J.R. and Zhao, H. 1995. Generalization of Split Hopkinson Bar Technique to Use Viscoelastic Materials. *International Journal of Impact Engineering*. (16), 529-530.
- Gray, G.T., Blumenthal, W.R., Trujillo, C.P. and Carpenter, R.W. 1997. Influence of Temperature and Strain Rate on the Mechanical Behavior of Adiprene L-100. *Journal of Physics IV*. (7), 523-528.
- Gourdin, W.H., Weinland, S.L. and Boling, R.M. 1989. Development of the Electromagnetically Launched Expanding Ring as a High-Strain-Rate Test Technique. *Review of Scientific Instruments*. 60 (3), 427-432.
- Greensmith, H.W. 1960. Rupture of Rubber. VII. Effect of Rate of Extension in Tensile Tests. *Journal of Applied Polymer Science*. 3 (8), 175-182.
- Hatt, W.K. and Marburg, E. 1899. Preliminary Report on the Present State of Knowledge Concerning Impact Tests. *Proceedings American Society for Testing and Materials*. (1), 27-50.
- Hauk, V. and Neumann, W. 1937. A Time Effect in the Rapid Elongation of Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*. 12 (3), 518-519.
- Haupt, P. and Sedlan, K. 2001. Viscoplasticity of Elastomeric Materials: Experimental Facts and Constitutive Modeling. *Archieve of Applied Mechanics*. (71), 89-109.
- Hoge, K.G. and Wasley, R.J. 1969. Dynamic Compressive Behavior of Various Foam Materials. *Journal of Applied Polymer Science*. *Applied Polymer Symposium*. (12), 97-109.
- Holt, W.L. 1931. Behavior of Rubber Under Repeated Stresses. *Industrial and Engineering Chemistry*. 23 (12), 1471-1475.
- Holt, W.L. 1932. Behavior of Rubber Under Repeated Stresses. *Rubber Chemistry and Technology*. 5 (1), 79-89.
- Hoo Fatt, M.S. and Bekar, I. 2004. High-Speed Testing and Material Modeling of Unfilled Styrene Butadiene Vulcanizates at Impact Rates. *Journal of Materials Science*. (39), 6885-6899.
- Hopkinson, J. 1872a. On the Rupture of an Iron Wire by a Blow. *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*. (11), 40-45.
- Hopkinson, J. 1872b. Further Experiments on the Rupture of Iron Wire. *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*. (11), 119-121.
- Hopkinson, B. 1905. The Effects of Momentary Stresses in Metals. *The Proceedings of the Royal Society of London*. A74, 498-506.
- 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*. Series A. Mathematical and Physical Sciences. (213), 437-456.
- James, A.G., Green, A. and Simpson, G.M. 1975a. Strain Energy Functions of Rubber I: Characterization of Gum Vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*. (19), 2033-2058.
- James, A.G., Green, A. and Simpson, G.M. 1975b. Strain Energy Functions of Rubber II: Characterizations of Filled Vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*. (19), 2319-2330.
- Jerrams, S.J., Kaya, M., ve Soon, K.F. 1998. The Effects of Strain Rate and Hardness on the Material Constants of Nitrile Rubbers. *Materials and Design*. (19), 157-167.
- Kainradl, P. and Handler, F. 1960. The Tear Strength of Vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*. 33 (5), 1438-1481.
- Kolsky, H. 1949. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Proceedings of the Physical Society of London Section B*. 62 (11), 676-700.
- Kraus, G., Childers, C.W. and Rollmann, K.W. 1966. Stress Softening in Carbon Black-Reinforced Vulcanizates. Strain Rate and Temperature Effects. *Journal of Applied Polymer Science*. (10), 29-244.
- Lambert-Diani, J. and Rey, C. 1999. New Phenomenological Behavior Laws for Rubbers and Thermoplastic Elastomers. *European Journal of Mechanics A-Solids*. (18), 1027-1043.
- Landon, J.W. and Quinney, H. 1923. Experiments with the Hopkinson Pressure Bar. *Proceedings of the Royal Society of London*. A103 (723), 622-643.
- Lee, O.S., You, S.S., Chung, J.H. and Kang, H.S. 1998. Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment. *KSME International Journal*. 12 (6), 1143-1149.
- Lee, O.S., Kim, M.S., Kim, K.J., Hwang, S.W. and Cho, K.S. 2003. Dynamic Deformation Behavior of Rubber Under High Strain Rate Compressive Loading. *International Journal of Modern Physics B*. 17 (8-9), 1415-1420.
- Lee, O.S. and Kim, K.J. 2003. Dynamic Compressive Deformation Behavior of Rubber Materials. *Journal of Materials Science Letters*. 22 (16), 1157-1160.
- Lee, O.S., Lee, J.W. and Kim, S.H. 2005. Dynamic Deformation Behavior of Rubber (NR/NBR) Under High Strain Rate Compressive Loading. *Advances in Fracture and Strength: Key Engineering Materials*. 297 (300), 172-177.

- Lee, O.S., Kim, S.H. and Lee, J.W. 2006a. Thickness Effect of Pulse Shaper on Dynamic Stress Equilibrium in the NBR Rubber Specimen. *Fracture and Strength of Solids VI: Key Engineering Materials*. 306-308, 1007-1012.
- Lee, O.S., Cho, K.S., Kim, S.H. and Han, Y. H. 2006b. Dynamic Deformation Behavior of Soft Material Using SHPB Technique and Pulse Shaper. *International Journal of Modern Physics B*. 20 (25-27), 3751-3756.
- Lion, A. 1996. A Constitutive Model for Carbon Black Filled Rubber: Experimental Investigations and Mathematical Representation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. (8), 153-169.
- Loizou, N. and Sims R.B. 1953. The Yield Stress of Pure Lead in Compression. *Journal of the Mechanical Physics of Solids*. 1 (4), 234-243.
- Love, A.E.H. 1927. *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* 643s. Cambridge University Press, London.
- Love, A.E.H. 1944. *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* 643s Dover, New York.
- Marquardt, D.W. 1963. An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-Linear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. (11), 431-441.
- Meyers, M.A. 1994. *Dynamic Behavior of Materials* 688s John Wiley and Sons, New York.
- Miehe, C. and Keck, J. 2000. Superimposed Finite Elastic-Viscoelastic-Plastoelastic Stress Response with Damage in Filled Rubbery Polymers. Experiments, Modeling and Algorithmic Implementation. *Journal of the Mechanical Physics of Solids*. 48 (2), 323-365.
- Mooney, M., Wolstenholme, W.E. and Villars, D.S. 1944. Drift and Relaxation of Rubber. *Journal of Applied Physics*. (15), 324-337.
- Mott, P.H., Twing, J.N., Roland, D.F., Schrader, H.S., Pathak, J.A. and Roland, C.M. 2007. High-Speed Tensile Test Instrument. *Review of Scientific Instruments*. 78 (4), 045105.
- Nakajima, N. and Harrell, E. 1983. Strain-Time Correspondence: Critical Examination of the Principle and Its Application to Classification of Gum Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*. 56 (5), 1019-1030.
- Ogden, R.W. 1972a. Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber-Like Solids. *Proceeding of Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 326 (1567), 565-584.
- Ogden, R.W. 1972b. Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Compressible Rubber-Like Solids. *Proceeding of Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 328 (1575), 567-583.
- O'Toole, B. 2003. Identification of Dynamic Properties of Materials for the Nuclear Waste Package. University of Nevada, Technical Report, Document ID: TR-02-007, Las Vegas.
- Pochhammer, L. 1876. Der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten Kleiner Schwingungen in Einem Unbegrenzten Isotropen Kreiszyylinder. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*. (81), 324-336.
- Quintavalla, S.J. 2004. Characterization of the High and Low Strain Rate Behavior of a Filled, Crosslinked Elastomer. Lehigh University, PhD Thesis.
- Quintavalla, S.J. and Johnson, S.H. 2004. Extension of the Bergström-Boyce Model to High Strain Rates. *Rubber Chemistry and Technology*. 77 (1), 972-981.
- Rao, S., Shim, V.P.W. and Quah, S.E. 1997. Dynamic Mechanical Properties of Polyurethane Elastomers Using a Nonmetallic Hopkinson Bar. *Journal of Applied Polymer Science*. 66 (4), 619-631.
- Rinde, J.A. and Hoge, K.G. 1971. Time and Temperature Dependence of Mechanical Properties of Polystyrene Bead Foam. *Journal of Applied Polymer Science*. 15 (6), 1377-1395.
- Rivlin, R.S. 1992. The Elasticity of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*. 65, G51-G66.
- Roland, C.M. 2006. Mechanical Behavior of Rubber at High Strain Rates. *Rubber Chemistry and Technology*. 79 (3), 428-459.
- Roth, F.L. and Holt, W.L. 1940. Tensile Properties of Rubber Compounds at High Rates of Stretch. *Rubber Chemistry and Technology*. 13 (2), 348-360.
- Shergold, O.A., Fleck, N.A. and Radford, D. 2006. The Uniaxial Stress Versus Strain Response of Pig Skin and Silicone Rubber at Low and High Strain Rates. *International Journal of Impact Engineering*. (32), 1384-1402.
- Shim, V.P.W., Yang, L.M., Lim, C.T. and Law, P.H. 2004. A Visco-Hyperelastic Constitutive Model to Characterize Both Tensile and Compressive Behavior of Rubber. *Journal of Applied Polymer Science*. (92), 523-531.
- Smith, T.L. 1956. Viscoelastic Behavior of Polyisobutylene Under Constant Rates of Elongation. *Journal of Polymer Science*. (20), 89-100.
- Smith, T.L. 1958. Dependence of Ultimate Properties of a GR-S Rubber on Strain Rates and Temperature. *Journal of Polymer Science*. (32), 99-113.
- Smith, T.L. 1961. Time and Temperature Dependence of the Ultimate Properties of an SBR Rubber at Constant Elongations. *Rubber Chemistry and Technology*. 34 (3), 897-909.
- Smith, T.L. 1962. Nonlinear Viscoelastic Response of Amorphous Elastomers to Constant Strain Rates. *Transactions of the Society of Rheology*. (6), 61-80.
- Smith, T.L. and Dickie, R.A. 1969. Effect of Finite Extensibility on the Viscoelastic Properties of a Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizate in Simple Tensile Deformations up to Rupture. *Journal of Polymer Science: Part A-2*. (7), 635-658.
- Song, B. and Chen, W. 2003. One-Dimensional Dynamic Compressive Behavior of EPDM Rubber. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 125 (3), 294-301.



- Song, B., Chen, W. and Cheng, M. 2004. Novel Model for Uniaxial Strain-Rate-Dependent Stress-Strain Behavior of Ethylene-Propylene-Diene Monomer Rubber in Compression or Tension, *Journal of Applied Polymer Science*. (92), 1553-1558.
- Taylor, G.I. 1946. The Testing of Materials at High Rates of Loading. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. (26), 486-519.
- Taylor, G.I. 1948. The Use of Flat Ended Projectiles for Determining Yield Stress. I: Theoretical Considerations. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences*. (194), 289-299.
- Tresca, H. 1878. On Further Applications of the Flow of Solids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. (30), 301-345.
- Vahapoğlu, V. 2006. Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Vahapoglu V., Karadeniz, S. and Yazici, I. 2009. Uniaxial Tensile Testing of Rubber-Like Materials. *Experimental Techniques*. (Baskıda).
- Van den Bogert, P.A.J. and Borst, R. de. 1994. On the Behavior of Rubber-Like Materials in Compression and Shear. *Archieve of Applied Mechanics*. (64), 136-146.
- Van Rossem, A. and H. Beverdam, H. 1931. Tensile Tests of Vulcanized Rubber at High Speed. *Rubber Chemistry and Technology*. 4 (2), 147-155.
- Villars, D.S. 1950. Ultra Speed Tensile of Rubber and Synthetic Elastomers. *Journal of Applied Physics*. 21 (6), 565-573.
- Wang, L., Labibes, K., Azari, Z. and Pluinage, G. 1994. Generalization of Split Hopkinson Bar Technique to Use Viscoelastic Bars. *International Journal of Impact Engineering*. 15 (5), 669-686.
- Wang, L., Labibes, K., Azari, Z. and Pluinage, G. 1995. Generalization of Split Hopkinson Bar Technique to Use Viscoelastic Bars, *International Journal of Impact Engineering*. (16), 530-531.
- Whiffin, A.C. 1948. The Use of Flat Ended Projectiles for Determining Yield Stress. II: Tests on Various Metallic Materials. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences*. (194), 300-322.
- Williams, M.L., Landel, R.F. and Ferry, J.D. 1955. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*. 77 (14), 3701-3707.
- Yang, L.M., Shim, V.P.W. and Lim, C.T. 2000. A Visco-Hyperelastic Approach to Modeling the Constitutive Behavior of Rubber. *International Journal of Impact Engineering*. (24), 545-560.
- Zabotkin, K., O'Toole, B. and Trabia, M. 2003. "Identification of the Dynamic Tensile Properties of Metals Under Moderate Strain Rates" 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, ABD.
- Zhao, H. and Gary, G. 1995. A Three Dimensional Analytical Solution of the Longitudinal Wave Propagation in an Infinite Linear Viscoelastic Cylindrical Bar: Application to Experimental Techniques. *Journal of the Mechanical Physics of Solids*. 43 (8), 1335-1348.
- Zhao, H. 1997. Testing of Polymeric Foams at High and Medium Strain Rates. *Polymer Testing*. (16), 507-516.
- Zhao, H., Gary, G. and Klepaczko, J.R. 1997. On the Use of a Viscoelastic Split Hopkinson Pressure Bar. *International Journal of Impact Engineering*. (19), 319-330.
- Zhurkov, C.N., Sanfirova, T.P. and Tamashevskii, E.E. 1962. Mechanical Properties of Rubber at High Rates of Elongation, *Rubber Chemistry and Technology*. 35 (3), 813-817.