



KAUÇUK MEKANİĞİNDE YAPILAN DENEYLER EXPERIMENT WHICH IS DONE IN RUBBER MECHANICS

Vahap VAHAPOĞLU^{1*}

¹P.K. 538, 07400, Alanya, Antalya
vahapvahapoglu@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 18.10.2011, Kabul Tarihi/Accepted: 25.04.2012
*Yazışılan yazar/Corresponding author: Vahap VAHAPOĞLU

doi: 10.5505/pajes.2013.10820

Özet

Literatürde, kauçuk türü malzemelerin elastik davranışını modelleyebilmek için bir çok farklı formda şekil değiştirme enerji fonksiyonları önerilmiştir. Teorik olarak önerilen bu şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının doğruluğu ise çekme, basma ve kayma deneyleri ile kontrol edilmektedir. Hazırlanan bu çalışmada kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Ayrıca, çalışmada literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kauçuk, Mekanik deneyler, Çekme deneyi, Basma deneyi, Kayma deneyi.

Abstract

To describe the elastic behavior of rubber-like materials numerous specific forms of strain energy functions have been proposed in the literature. Theoretically proposed these strain energy functions are checked by the tension, compression, shear and torsion experiments data. This paper describe and classify of experiments which is done in rubber mechanics. Meanwhile, experiments of rubber-like materials in literature are reviewed.

Keywords: Rubber, Mechanical experiment, Tension experiment, Compression experiment, Shear experiment.

1 Giriş

Teknolojinin hızlı ilerlemesi günlük hayatta karşılaştığımız problemlerin çözümünü daha zor ve karmaşık hale getirmektedir. Bilgisayarlar ise günümüzde karşılaşılan bu zorlukları ve problemlerin çözümünü kolaylaştıran birer analiz aracı haline gelmişlerdir. Problemin karmaşıklığına dokunmadan veya problemin fiziğinde çok küçük kabuller ile yaklaşık sayısal çözümler üretmek mümkün olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise problemin geometrisini, malzeme özelliklerini ve yüklem durumunu sonlu elemanlar paket programına veri olarak girilerek problemin simülasyonunun gerçekleştirildiği bir analiz yöntemidir. Bu analizlerin doğruluğu, büyük ölçüde, sonlu elemanlar paket programına girilen geometrik ve malzeme özellikleri ve yüklem durumunun gerçekliğine bağlı olmaktadır.

Metalik malzemelerin dizayn uygulamaları sonlu elemanlar paket programlarında rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. Metallerin, elastik bölgede, hem çekme hem de basma bölgelerinde aynı davranışı göstermeleri, yani her iki bölgede de kullanılan malzeme sabitlerinin aynı olması metallerin elastik bölgede bünye denklemlerinin ifade edilmesini kolaylaştırmış ve Hooke kanunları ile ifade edilmiştir. Metallerin bünye denklemlerinde yer alan elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) tek eksenli çekme deneyi gibi basit ve standart bir deneyle belirlenerek sonlu elemanlar paket programına tanıtılabilmekte ve böylece metalik malzemelerin sonlu elemanlar analizi yapılabilmektedir. Fakat kauçuk türü malzemeler için yukarıda metaller için söylenen ifadeleri kullanmak kolay değildir.

Kauçuk türü malzemelerin kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinin metallerden tamamen farklı olması kauçuğun bünye denklemlerinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu malzemelerin bünye denklemlerini direkt olarak gerilme-şekil değiştirme bağıntılarıyla istenen doğrulukta tanımlanamamaları nedeniyle araştırmacılar şekil değiştirme enerji fonksiyonu yardımıyla bünye denklemlerini elde

etmeye çalışmışlardır. Bunun için birçok araştırmacı, ya istatistiksel teoriyi ya da fenomenological teoriyi kullanarak kauçuk türü malzemeler için şekil değiştirme enerji fonksiyonları tanımlamışlardır [1].

Kauçuk mekaniği üzerine çalışma yapan araştırmacılar matematiksel formda şekil değiştirme enerji fonksiyonunu elde ettikten sonra bu fonksiyon içerisinde yer alan malzeme sabitlerini deneysel olarak belirlemeye çalışmışlardır. Literatürde bunun için birçok deneyler standart olmayan çekme hızında ve numune boyutlarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler içerisinde en basit ve kolay olanı ise tek eksenli çekme deneyidir. Fakat bu deney tek başına şekil değiştirme enerji fonksiyonu hakkında sınırlı ve yetersiz bilgi vermektedir. Ayrıca tek eksenli basma deneyi de yapılmalıdır. Fakat tek eksenli basma deneyinde basma yüzeyleri arasındaki sürtünme nedeniyle homojen şekil değişimi sağlanamaz. Bu nedenle deformasyon olarak tek eksenli basma deneyinin eşdeğeri olan iki eksenli eş-çekme deneyleri yapılmalıdır. Bu deneyler vasıtasıyla şekil değiştirme enerji fonksiyonu belirli deformasyon sınırlarında belirlenebilmektedir. Özellikle çok büyük deformasyonlarda, numunenin yırtılması sebebiyle, ve I_1 ve I_2 'nin, 4'ten küçük olduğu, çok küçük deformasyonlarda, deneysel hataların fazla olması nedeniyle, malzeme sabitleri ince kauçuk plakanın iki eksenli çekme deneyi ile sağlıklı bir şekilde belirlenememektedir. I_1 ve I_2 'nin küçük olduğu ($I_1, I_2 < 4$) durumlarda malzeme sabitleri, safi kayma deneyi ile (pure shear) belirlenebilir. Burada, I_1 ve I_2 asal doğrultulardaki şekil değiştirme invariantlarıdır. Safi kayma deneyi, basit kayma (simple shear) deneyine göre deneysel olarak daha kolay gerçekleştirilebilmesi ve basit kayma deneyinin uzama oranları cinsinden ifade edilmesinin zor olması nedeniyle pratikte basit kayma deneyi yerine gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bunun dışında burulma ve çekmeli burulma deneyleri de kauçuk türü malzemeler için yapılmaktadır.

Hazırlanan bu çalışmada kauçuk mekaniğinde uygulanan çekme, basma deneyleri ile kayma ve burulma deneyleri

incelenmiş ve literatürde yapılan çalışmalar sunulmuştur. Şekil 1'de, bu çalışmanın özetini veren, literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan deneyler diyagram halinde verilmiştir.

2 Kauçuk Mekanikğinde Yapılan Homojen Şekil Değişimine Sahip Deneyler

Bir cisim üzerindeki noktalar, uygulanan dış yükler altında konumlarını değiştirirler yani deforme olurlar. Bir noktanın yer değiştirmesi x, y, z koordinatlarında, sırasıyla, u, v ve w ile ifade edilsin. Bu durumda u, v ve w yer değiştirmeleri x, y, z koordinatlarının lineer fonksiyonu olması durumunda yani;

$$\begin{aligned} u &= a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y + a_{13} \cdot z \\ v &= a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y + a_{23} \cdot z \\ w &= a_{31} \cdot x + a_{32} \cdot y + a_{33} \cdot z \end{aligned} \quad (1)$$

ise bu u, v, w yer değiştirmelerine affin yer değiştirme denir. Yer değiştirme fonksiyonunun affin yer değiştirme olduğu şekil değişimlerine de homojen şekil değiştirme denir. Bu taktirde deforme olmuş cismin bütün şekil değiştirme bileşenleri, sabit kalır. Düzlemler ve doğru çizgiler şekil değiştirmeden sonra paralel kalır. Buna göre bir cismin geometrik olarak benzer olan ve benzer olarak yönelmiş bulunan iki elemanı şekil değiştirdikten sonra benzer kalır.

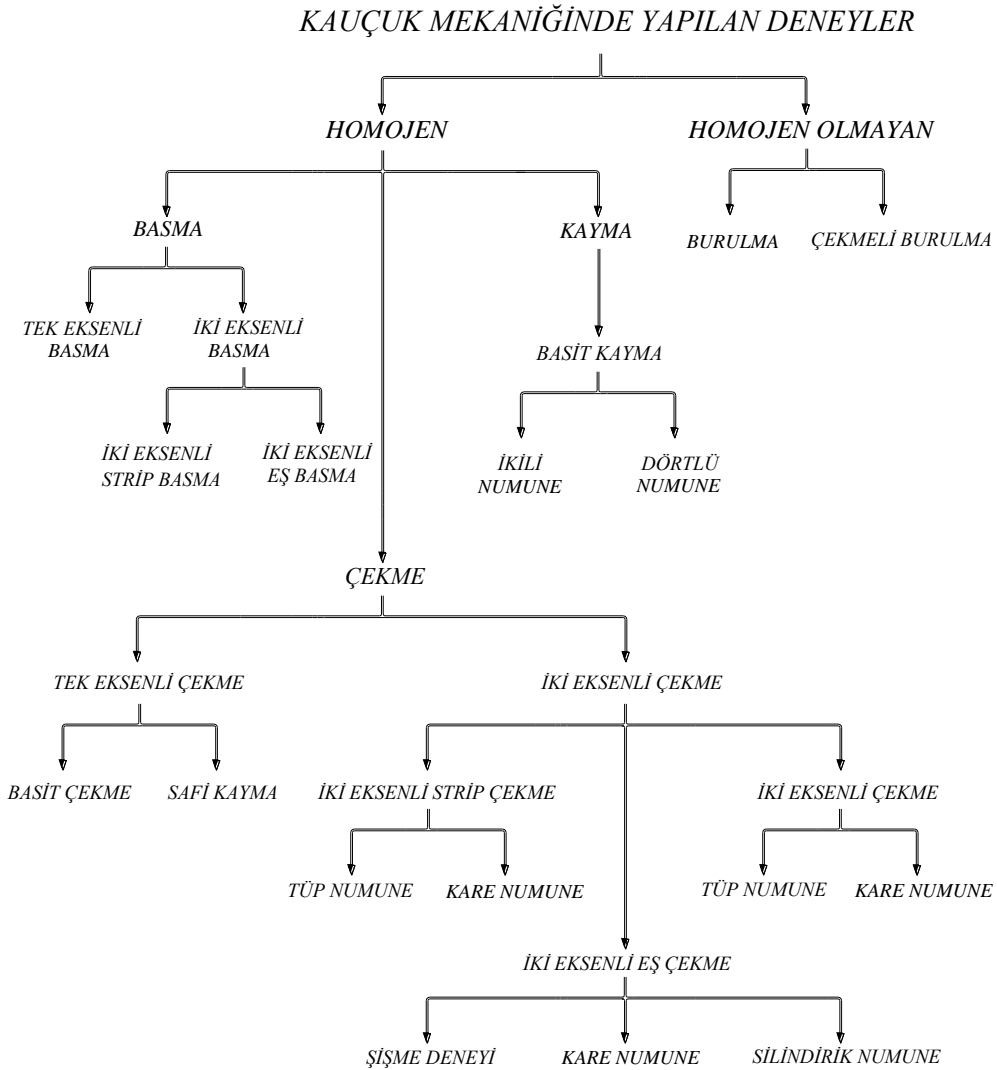
Eğer cismin deformasyonu sırasında asal eksen hep sabit kalırsa bu deformasyona dönmesiz veya safi denir.

Kauçuk mekanikğinde numunelerin safi homojen deformasyona (pure homogeneous deformation) maruz kalması sağlanarak deneylerin dolayısıyla da ölçümlerin daha kolay yapılması amaçlanmıştır. Böylece numuneye uygulanan kuvvetler numunenin tüm noktalarında aynı deformasyona dolayısıyla da aynı miktarda uzamaya sebep olacağından numunenin uygulanan yük altında şekil değiştirme ölçümleri daha basit olmaktadır. Literatürde kauçuk türü malzemeler için çekme, basma ve kayma deneyleri safi homojen deformasyonu oluşturacak şekilde yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde literatürde yapılan bu deneyler ayrıntılarıyla incelenmiştir.

2.1 Çekme Deneyleri

Literatürde kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede en çok kullanılan deformasyon türü basitlik ve kolaylığı sebebiyle çekme deneyleridir. Özellikle tek eksenli çekme deneyi, tüm laboratuvarlarda yapılabilmektedir. Çekme deneyleri numuneye uygulanan kuvvete göre

- Tek Eksenli Çekme
- İki Eksenli Çekme



Şekil 1: Kauçuk mekanikğinde yapılan deneyler [2].

olarak ikiye ayrılmaktadır. Kauçuk türü malzemelerin çekme ve basma bölgelerindeki mekanik davranışının birbirinden farklı olması nedeniyle tek eksenli çekme deneyleri malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle kauçuk türü malzemelerin basma bölgesindeki davranışı tek eksenli basma deneyleri ile belirlenmelidir. Tek eksenli basma deneylerinde basma yüzeylerindeki sürtünmenin oldukça fazla olması nedeniyle, literatürde, iki eksenli çekme deneylerine ihtiyaç olmuştur. Bu çalışmada literatürde kauçuk mekaniğinde uygulanan tek eksenli çekme ve iki eksenli çekme deneyleri ayrıntısıyla incelenecektir.

2.1.1 Tek Eksenli Çekme Deneyler

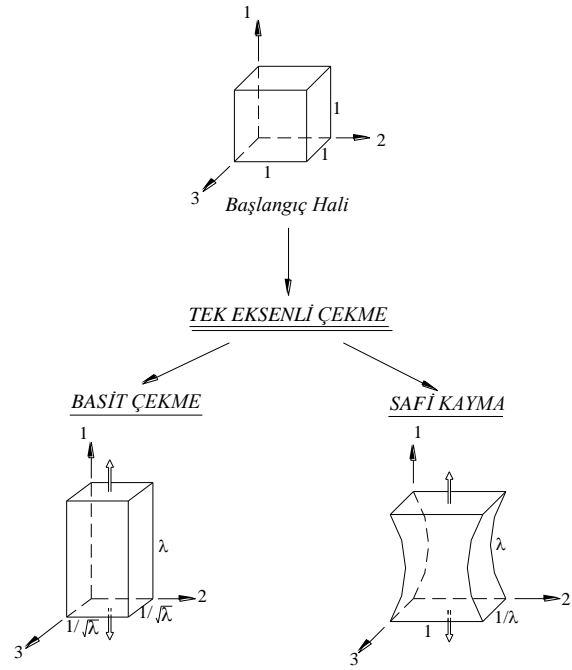
Basitliği ve deneysel olarak uygulama kolaylığı sebebiyle günümüzde her laboratuvarında tek eksenli çekme deney makineleri mevcuttur. Özellikle metallerin mekanik özelliklerini belirlemede sadece tek eksenli çekme deneyinin yeterli olması tek eksenli çekme makinelerini laboratuvarların sabit bir deney düzeneği haline getirmiştir. Fakat kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede tek bir deneyin yeterli olmadığı daha önce de vurgulanmıştır. Bu amaçla literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan tek eksenli çekme deneyleri

- Basit Çekme,
- Safi Kayma,

olarak ikiye ayrılabilir. Şekil 2 ve Şekil 3'de sırasıyla literatürde tek eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar ve tek eksenli çekme deformasyonları görülmektedir.



Şekil 2: Literatürde tek eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar.



Şekil 3: Tek eksenli çekme deformasyonları.

2.1.1.1 Basit Çekme

Literatürde basit çekme deneyi, çok eskilere dayanmaktadır. 17. yüzyılın sonlarında Robert Hooke bu deformasyon ile metaller için gerilme ile şekil değiştirme arasında lineer bir ilişkinin olduğunu ifade etmiştir. Kauçuk türü malzemelerde ise bilinen ilk basit çekme deneyi Gough [3] tarafından, 1805 yılında, yapılmıştır. Daha sonra bu çalışmayı, önemli olması bakımından, Joule [4] 1859 yılında yapmıştır. Böylece 1805 ve 1859 yıllarında kauçuk türü malzemelerin ilk bilimsel çalışmaları basit çekme deformasyonları ile yapılmıştır. Bu deformasyon türünün kolaylığı ve çok eskilere dayanması nedeniyle artık günümüzde numune boyutları ve deney prosedürü açısından standartlaştırılmıştır. Kauçuk türü malzemelerin basit çekme deneyi için, ASTM D 412, DIN 53 504 ve ISO 37 no'lu standartlara müracaat edilebilir [5]-[7]. Fakat kauçuk türü malzemeler için yapılan diğer birçok deney için bu durumdan bahsetmek mümkün değildir. Basit çekme deformasyonu, genel olarak, Şekil 4'de gösterilen tahrik mekanizması ile sağlanmaktadır. B hareket milleri G tablalarında yataklanmış ve milin ucuna takılan motor ile bir milin dönmesi, miller arasındaki D kayış kasnak mekanizmasıyla da her iki milin eşit miktarda dönmesi sağlanmıştır. Millerin dönmesi sonucu C tablası aşağı yukarı hareket etmekte ve böylece C tablasına bağlı bulunan A numunesi çekilmektedir. Numuneye uygulanan kuvvet ise yük hücresi ile okunmaktadır. Genel olarak bu tahrik sisteminde çalışan tek eksenli çekme deformasyonunda kauçuk türü malzemeler için üç farklı formda numune

- Dumbbell Numune,
- Halka Numune,
- Dikdörtgen Numune,

kullanılmaktadır [5]-[6]. Literatürdeki çalışmalarda, özellikle, C kesme kalıbıyla kesilmiş Dumbbell numunenin sıkça kullanıldığı görülmektedir. Bazı araştırmacıların ise halka formda numune kullandıkları da görülmektedir. Kauçuk türü malzemelerin mekanik ve kimyasal testlerinin ve

araştırmaların yapıldığı Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarlarının dikdörtgen formda numune kullanımını tavsiye etmektedir [8]. Laboratuvar; numune boyunun, genişliği yanında çok daha büyük olması gerektiğini ve bu oranın en az 10 olması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca numune boyutlarından amacın, numunenin deformasyonu sırasında hasar meydana gelmemesi olduğunu belirtmekte ve bu nedenle numune boyutları için de dumbbell numune kullanılmasının şart olmadığını vurgulanmaktadır. Bu durumda kullanılacak numune boyunun tutma çeneleri arasında kalan uzunluk olarak alınabileceğini belirtmişlerdir. Zaten literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde de dumbbell numune yerine dikdörtgen formunda ince uzun numunelerin de kullanıldığını görmekteyiz [9].

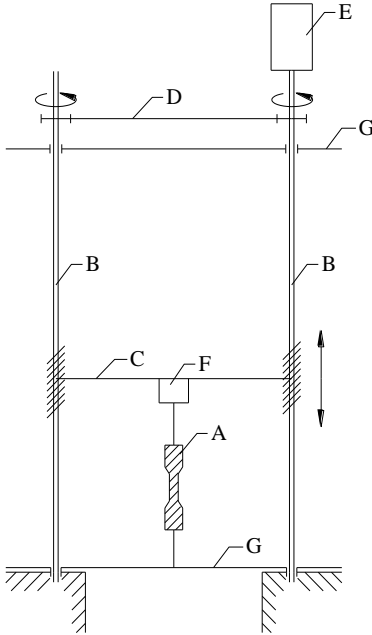
Basit çekme deformasyon türünde sadece bir doğrultuda çekme uygulanmakta

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2)$$

dolayısıyla da kuvvet uygulanan doğrultuda uzama olurken diğer iki doğrultuda eşit miktarda daralma olmaktadır.

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3)$$

Burada s ; mühendislik gerilmesi ve l ; ise uzama oranıdır. Basit çekme deneyi için literatürde yapılan çalışmalar genellikle standartlara göre ve genellikle de aynı prosedüre göre yapıldığından literatürde yapılan çalışmalar burada incelenmemiştir. Deneyler hakkında daha ayrıntılı bilgi için ASTM, DIN ve ISO standartlarına müracaat edilebilir.



Şekil 4: Basit çekme deneyi [2]-[10].

2.1.1.2 Safi Çekme

Literatürde yapılan ikinci tek eksenli çekme deneyi safi kayma deneyidir. Safi kayma (pure shear) deformasyonu tanımlamasına Love'un kitabında rastlanmaktadır [11]. Safi kayma deformasyonu, basit çekme deformasyonu ile benzer olup (Şekil 5), her iki deformasyon da tek bir doğrultuda kuvvet uygulanması sonucunda meydana gelmektedir.

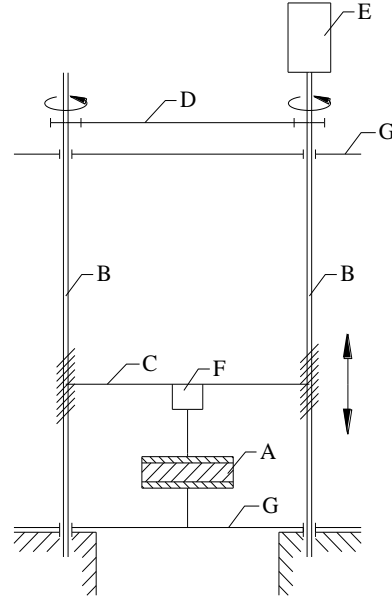
$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (4)$$

Fakat uygulanan tek eksenli kuvvet sonucunda basit çekme deformasyonunda bir yönde uzama ve diğer iki yönde eşit

miktarda kısılma meydana gelmesine karşılık safi kayma deformasyonunda bir yönde hiçbir deformasyon olmazken kuvvet uygulanan yönde uzama diğer üçüncü yönde ise kısılma meydana gelmektedir.

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = 1 \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Bu deformasyon, malzemenin sıkıştırılmaz kabulü altında geçerli olmaktadır. Ayrıca bu deformasyon türünde kullanılan numune boyu basit çekme deformasyonuna göre çok kısa ve genişliği çok uzun alınarak yanal daralma etkileri ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.



Şekil 5: Safi kayma deneyi.

Basit kayma deneyinde, uygulanan kuvvet altında numunede oluşan kayma deformasyonunu asal uzama oranları cinsinden ifade etmek çok zordur. Love'un kitabında da belirttiği üzere, basit kayma deformasyonu; safi kayma deformasyonundan sonra dönme yer değiştirmesi uygulanmasıyla oluşmaktadır [11]. Öteleme ve dönme yer değiştirmeleri malzemenin şekil değiştirmesi üzerine etkisi olmadığından ve de safi kayma deformasyonunu asal uzama oranları cinsinden ifade etmek çok daha kolay olduğundan, literatürde genellikle safi kayma deformasyonu gerçekleştirilmiş, buradan aşağıdaki dönüşüm bağıntıları vasıtasıyla basit kayma gerilme şekil değiştirme verileri hesaplanmıştır.

$$\gamma = \lambda - \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}} \quad (7)$$

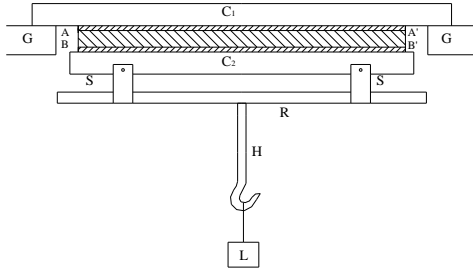
$$\tau = \frac{dW}{d\gamma} = \frac{dW}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\gamma} = \frac{dW}{d\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \right) \quad (8)$$

Burada γ ; kayma şekil değişimi, τ ; kayma gerilmesi ve W ise şekil değiştirme enerji fonksiyonudur. 1940-1950'li yıllardan itibaren safi kayma terimi kullanılmasına karşın 1990 yılından sonra safi kayma yerine iki eksenli strip çekme terimi, literatürde, kullanılmaya başlamıştır. Safi kayma terimi tek eksenli çekme deformasyonlarında, strip çekme terimi ise iki eksenli çekme deformasyonunda kullanılmalıdır. Literatürdeki

bu anlam kargaşasına makaleleri okurken dikkat etmek gerekmektedir.

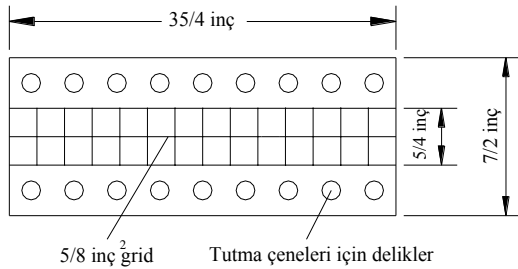
Literatürde kauçuk türü malzemeler için safi kayma deneyi ilk defa Treloar tarafından, 1944 yılında, yapılmıştır [9]. Treloar çalışmasında genişliği 75 mm ve deforme olmamış halde tutma çeneleri arasındaki mesafesi 5 mm olan numune kullanmıştır. Çalışmasını oda sıcaklığında yapmış olup maksimum $\lambda=6$ 'ya kadar numuneyi deforme etmiştir. Ölçümleri ise 4 mm'lik mesafeden almıştır. Treloar, basit çekme de uygulamış olduğu aynı deneysel prosedürü bu deneyde de uygulamıştır.

Literatürde safi kayma deformasyonu üzerine ikinci çalışma Rivlin ve Saunders tarafından [12] yapılmıştır (Şekil 6). Çalışmalarında $95*20*0.87$ [mm] boyutlarında numune kullanmışlardır. Numune, metal tutucular arasında sıkıştırılmış ve tutucusu rijid G desteğe bağlanmıştır. Numunenin üzerine birbirine paralel ve çizgileri çizilmiş deformasyon ölçümü buradan yapılmıştır. Tutuculara bağlı H kancasına yükler asılmasıyla da numune deforme edilmiştir. Deneylerde maksimum $\lambda=2.2$ 'ye kadar deformasyon gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 6: Rivlin ve Saunders tarafından safi kayma deneyinde kullanılan deney düzeneği.

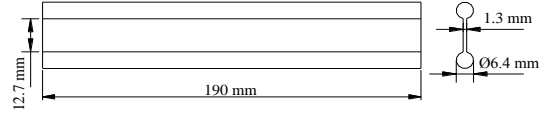
Chen ve Durelli, kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının doğal gerilme-doğal şekil değiştirme tanımlanmasından elde etmek için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de safi kayma deneyidir [13]. Deneylerinde kullandıkları numune boyutları Şekil 7'de görülmekte olup numunenin deformasyonu, ağırlık asılmak sureti ile sağlanmıştır. Deformasyon miktarları numune üzerine çizilen ızgaraların analizi vasıtasıyla yapılmıştır. Ölçümler ise 0.00004 inç hassasiyetine sahip hareket edebilen mikroskop vasıtasıyla yapılmıştır.



Şekil 7: Chen ve Durelli tarafından safi kayma deneyinde kullanılan numune boyutu.

Wilson ve Haines, Rivlin ve Saunders'ın kullandıkları deney düzeneğinin aynısını imal ederek deneylerini bu düzenekte yapmışlardır [14]. Numunenin uzun kenarı 152.4 mm ve ölçüm boyu 25.4 mm olarak alınmıştır. Numuneye kuvvet, ağırlık asılmak suretiyle deformasyonu sağlanmış ve deformasyon ölçümü ise 1 inç'in 60 parçaya ayrıldığı cetvel ile yapılmıştır.

Sullivan ve Demery, karbon siyah katkı malzemesi katılmış elastomerlerin vizkoelastik davranışlarını incelemek için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de safi kayma deneyidir [15]. Araştırmacılar şekilde boyutları verilen numuneyi tek eksenli çekme cihazına bağlayarak deforme etmişlerdir (Şekil 8). Numunenin genişlik-boy oranını 15:1 olarak almışlardır. Ayrıca numunenin baş ve son taraflarında, büyük deformasyonlarda çalışabilmek için, daha kalın yapılarak çekme sırasında numunenin tutma çenelerinden sıyrılıp çıkması önlenmiştir. Numuneye uygulanan kuvvet 250N kapasiteli bir yük hücresi vasıtasıyla, şekil değişimi ise cathetometer vasıtasıyla ölçülmüştür.



Şekil 8: Sullivan ve Demery tarafından safi kayma deneyinde kullanılan numune boyutu.

Raos, kauçuk türü malzemelerin sonlu elemanlar analizini yapmak için gerçekleştirmiş olduğu deneylerden bir tanesi safi kayma deneyidir [16]. Çalışmasında $100*8*2$ [mm] boyutlarında numune kullanmış olup deformasyonu Zwick 1485 tek eksenli çekme deney makinasında gerçekleştirmiştir. Araştırmacı çalışmasında tutma çenelerinin hızını 5 mm/dk gibi çok küçük bir değerde tutarak kuasi-statik deneylerin gerçekleştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmasında malzemeyi maksimum $\lambda=2.8$ 'e kadar deforme etmiştir.

Davies, De Dilip ve Thomas, Gregory'nin önermiş olduğu hipotezi [17], yani şekil değiştirme enerji fonksiyonunun sadece I'e bağlı olduğu ve I2'den bağımsız olduğunu, test etmek amacıyla yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de safi kayma deneyidir [18]. Deneylerini, 23 °C sıcaklıkta Instron test cihazında dakikada %10 deformasyon hızında gerçekleştirmişlerdir. Deney numunesinin boyutları hakkında bilgi vermemekle birlikte numune kalınlığının 2 mm olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında numunenin vizkoelastik özelliklerini ihmal edecek bir deney prosedürü uygulamamışlardır.

Baranwall, Pannikottu ve Seiler, Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarları'nda yapmış oldukları çalışmada $3*0.5*0.06$ [inç] boyutlarında numune kullanmışlardır [19]. Çalışmalarında, Sullivan ve Demery'nin [15] kullandığı formda numune kullanarak tutma çenelerinden malzemenin sıyrılmasını önlemeyi amaçlamışlardır. Deneyleri 0.2 inç/dak. sabit çekme hızında gerçekleştirmişlerdir. 1996 yılındaki bu çalışmada numunenin genişlik-boy oranı 6 alınmasına rağmen, 2000 yılında Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarının katkılarıyla MSC Software Corporation tarafından hazırlanan, kitapçıkta [8] bu oranın en az 10 olması gerektiğini vurgulamışlardır.

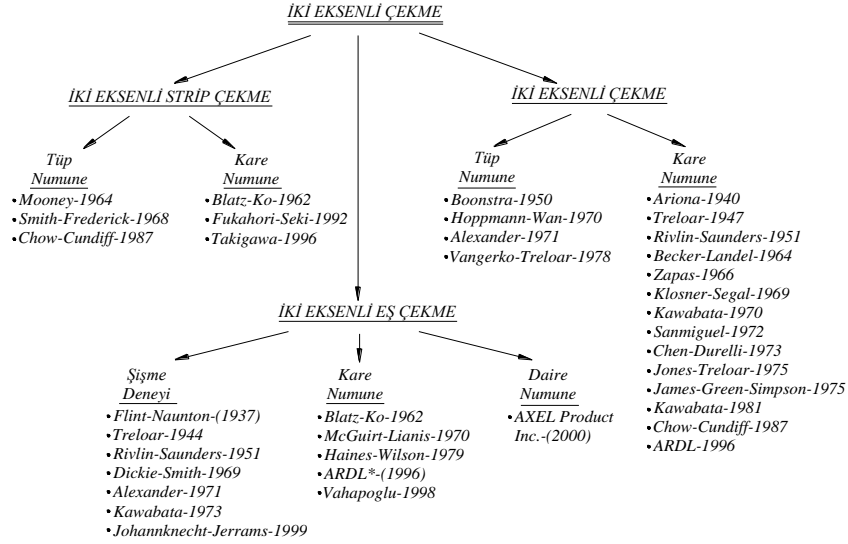
2.1.2 İki Eksenli Çekme Deneyleri

İki eksenli çekme deneyleri birçok araştırmacı tarafından ya şekil değiştirme invaryantları ya da uzama oranlarının birbirleri ile olan değişimini incelemek ya da kauçuk türü malzemelerin malzeme sabitlerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Literatürde yapılan iki eksenli çekme deneyleri genel olarak

- İki eksenli çekme deneyi,
- İki eksenli eş-çekme deneyi,
- İki eksenli strip çekme deneyi,

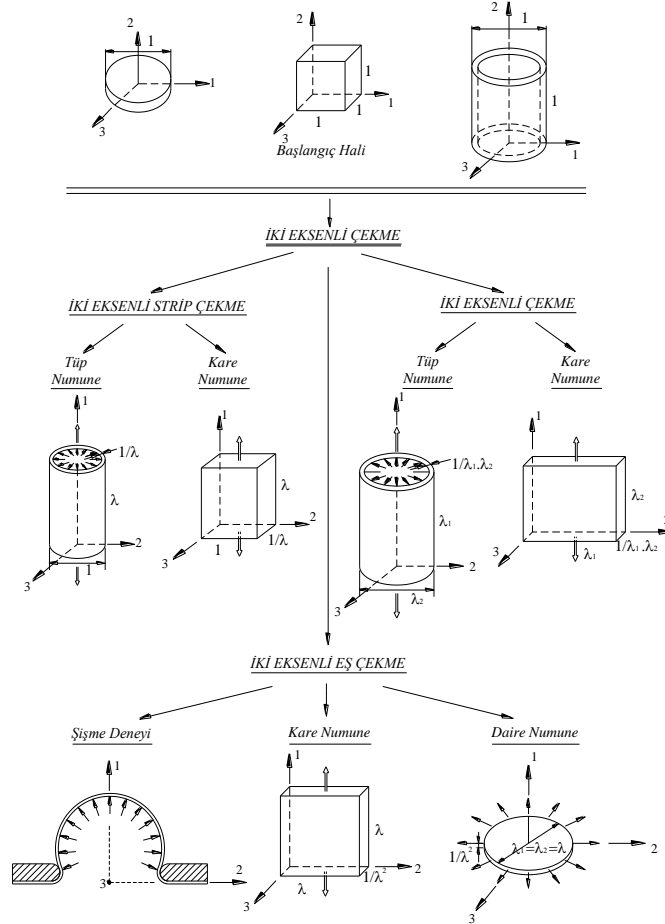
olarak üç grupta toplanabilir. İki eksenli çekme deneyleri incelenirken şöyle bir mantık yürütülmüştür. İki eksenli çekme hem iki eksenli eş-çekme hem de iki eksenli strip çekme deneyini kapsayan en genel haldeki bir deneydir. Bu nedenle iki eksenli çekme deneyini yapan araştırmacılar aynı zamanda iki eksenli eş-çekme ve strip iki eksenli çekme

deneylerini de yapmışlardır. Bu nedenle iki eksenli çekme deneyi altında verilen çalışmalar bir daha iki eksenli eş-çekme ve iki eksenli strip çekme deneyleri altında incelenmemiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla literatürde iki eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar ve iki eksenli çekme deformasyonları görülmektedir.



* : Akron Rubber Development Laboratory

Şekil 9: Literatürde iki eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar.



Şekil 10: İki eksenli çekme deformasyonları.

2.1.2.1 İki Eksenli Çekme Deneyi

Kauçuk mekaniğinde fenomenological teori kullanılarak birçok araştırmacı tarafından şekil değiştirme enerji fonksiyonları tanımlanmış ve bu fonksiyonların, Castilliano teoremine göre, uzama oranına göre türevinden gerilme-şekil değiştirme bağıntıları elde edilmiştir. Literatürde, fenomenological teoriden elde edilen şekil değiştirme enerjisi fonksiyonları ise ya şekil değiştirme invariantlarının

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (9)$$

ya da asal doğrultulardaki uzama oranlarının

$$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (10)$$

fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Malzemenin sıkıştırılmaması olduğu durumlarda ise

$$I_3 = 1 \quad (11)$$

olmakta ve şekil değiştirme enerji fonksiyonu sadece ilk iki şekil değiştirme invariantının fonksiyonu olmakta

$$W = (I_1, I_2, I_3) = W(I_1, I_2, I_3 = 1) \\ = W(I_1, I_2) \quad (12)$$

veya (10) denkleminde

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 = 1 \quad (13)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \quad (14)$$

elde edilir ki bu durumda şekil değiştirme enerji fonksiyonu, sadece, 1 ve 2 doğrultularındaki uzama oranlarının fonksiyonu olmaktadır.

$$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = W\left(\lambda_1, \lambda_2, \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}\right) \\ = W(\lambda_1, \lambda_2) \quad (15)$$

Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonlarındaki iki bağımsız değişken arasındaki, I_1 ve I_2 veya λ_1 ve λ_2 , ilişkilerin incelenmesi tek eksenli çekme deneyleri ile mümkün olmamaktadır. Bu nedenle de kauçuk türü malzemeler için iki eksenli çekme deneyi yapılmasını zorunlu kılmıştır. Bağımsız değişkenin sırasıyla bir tanesi sabit tutularak diğerinin değişimi incelenmiş ve böylece bağımsız değişkenler arasındaki ilişki araştırılarak, birçok araştırmacı tarafından, şekil değiştirme enerjisi fonksiyonları önerilmiştir. İki eksenli çekme deney verileri ile şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunun bağımsız değişkenlerinin birbirleri ile olan ilişkilerinin incelenmesi yanında araştırmacılar tarafından önerilen şekil değiştirme enerjisi fonksiyonlarının deneysel verilerle uyumunun incelenmesi için de kullanılmıştır. Literatürde belirtilen bu çalışmaları yapmak için

- Kare formda numune,
- İnce cidarlı tüp numune,

kullanılarak iki eksenli çekme deneyleri yapılmıştır.

2.1.2.1.1 Kare Formdaki Numunenin İki Eksenli Çekme Deneyi

Kauçuk mekaniğinde, iki eksenli çekme deformasyonu denilince akla ilk önce gelen kare formdaki numunenin her iki yönde de farklı kuvvetler altında gerçekleştirilen çekme deformasyonudur (Şekil 11).

Başlangıçta kenarı 1 birim olan numune 1 ve 2 asal doğrultularında etkiyen F_1 ve F_2 kuvvetleri altında λ_1 ve λ_2 son boya ulaşır.

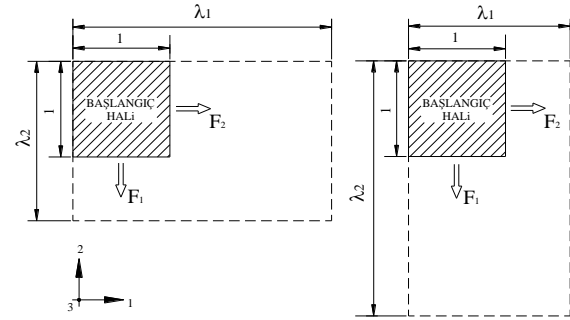
$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad \lambda_1 = \lambda_1 \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_0} \quad \lambda_2 = \lambda_2 \quad (17)$$

Burada, A_0 kuvvetin uygulandığı ilk kesit alanıdır. Kalınlık yönündeki numunenin değişimi ise sıkıştırılmazlık kanunundan

$$\sigma_3 = 0 \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \quad (18)$$

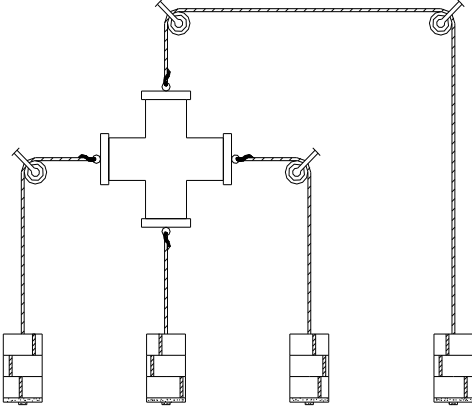
olarak bulunur. Araştırmacılar aynı zamanda $\lambda_1 = \lambda_2$ olacak şekilde kuvvetlerin uygulanmasıyla iki eksenli eş-çekme veya $\lambda_1 = \lambda$ ve $\lambda_2 = 1$ olacak şekilde kuvvetlerin uygulanmasıyla da iki eksenli strip çekme deneylerini de incelemiştir.



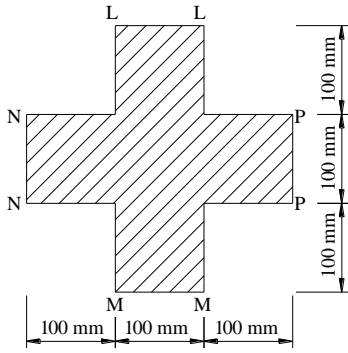
Şekil 11: Kare formdaki numunenin iki farklı hal için iki eksenli çekme deformasyonu.

Literatürde iki eksenli çekme konusundaki ilk çalışma Ariano [20] tarafından yapılmıştır. Ariano, daha önceki çalışmalarında kauçuk türü malzemelerin tek eksenli çekme ve basma deformasyonları altında mekanik davranışını ifade eden basit bir ifade önermiş, fakat daha sonra "Sonlu Deformasyonlar" adlı kitabında yüksek deformasyon olabilen malzemelerin yani kauçuğun mekanik özelliklerinin tek eksenli çekme deformasyonundan belirlenemeyeceğini, iki eksenli çekme deformasyonunun gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ariano, büyük şekil değişimine maruz kalabilen kauçuk türü malzemelerin gerilme ile şekil değiştirme arasında lineer bir ilişkinin olup olmadığını, eğer aralarında lineer bir ilişki yoksa malzemenin uygulanan yük altında nasıl davrandığını bulabilmek için iki eksenli çekme deneyi yapmıştır. Kurmuş olduğu deney düzeninde (Şekil 12) ya NP yönündeki kuvveti sabit tutup LM yönünde kuvveti artırmış ya da her iki yöndeki kuvveti artırmıştır. Numune üzerinden ölçümler ise numune üzerine çizilen dairenin yarıçapından veya karenin bir kenarının değişiminden belirlenmiştir. Ölçümler milimetrenin onda biri hassasiyetinde elde edilmiş olup numunenin kalınlığı ise numune üzerindeki dairenin çapının yüzde bir hassasiyetle ölçümünden elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda % 8 sülfür içeren kauçuk numune kullanılmıştır. Deneylerinde kullanmış olduğu numune boyutu ise Şekil 13'de verilmiştir.

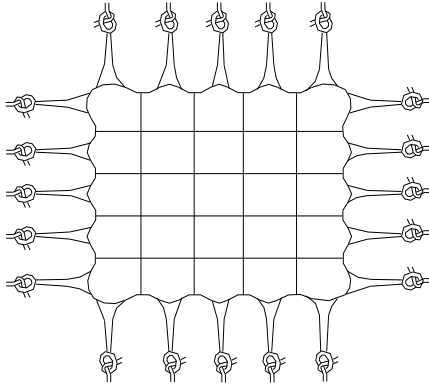
Kauçuk mekaniğinde ikinci iki eksenli çekme deneyi Treloar [21] tarafından 1947 yılında yapılmıştır. Esasen Treloar'ın kurmuş olduğu bu deney düzeni (Şekil 14) bundan sonraki çalışmalarda kurulan birçok deney düzeneklerinin temelini teşkil etmekteydi.



Şekil 12: Ariano tarafından gerçekleştirilen iki eksenli çekme deformasyonu.



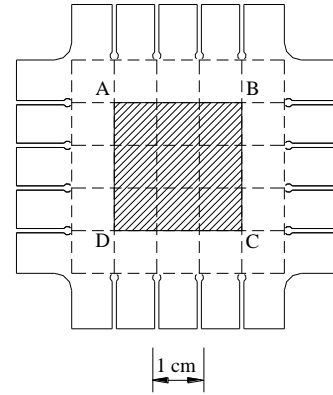
Şekil 13: Ariano tarafından kullanılan iki eksenli çekme deney numunesi boyutu.



Şekil 14: Treloar tarafından yapılan iki eksenli çekme deneyinde numunenin iki eksenli deformasyon hali.

Treloar, çalışmasında genel homojen şekil değişimine maruz numunedeki gerilmelerin değişimini incelemek için iki eksenli çekme deney düzenliğini kurmuştur (Şekil 14). Çalışmasında swollen durumdaki kauçuğun mekanik özelliklerini tanımlamada moleküler teoriden elde edilen Neo-Hookean malzeme modelinin yeterli olmasına rağmen, kuru (dry) kauçuk durumundaki kauçuğun mekanik özelliklerini tanımlamada Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunun Neo-Hookean şekil değiştirme enerji fonksiyonundan daha iyi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Mooney-Rivlin denkleminin de dry kauçuk numunesinin mekanik özelliklerini ifade etmede yetersiz olduğunu bu nedenle de Mooney-Rivlin denkleminin üçüncü bir teriminin ilave edilmesi gerektiğini de belirtmiştir.

Treloar, deneysel çalışmalarında Şekil 15'de görülen kauçuk numuneyi (Lateks Kauçuk: 100, Sülfür: 1.5, Çinko Oksit: 1, Sodyum Diethylthiocarbamate: 0.5 (100 °C'de 30 dakika vulkanize edilmiştir.) kullanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler kare formda olup her iki kenarında beş adet tutma yeri vardır. Ayrıca numune üzerine 10 mm aralıklı kare ızgaralar çizilerek deformasyon sırasında numunenin davranışı izlenmiştir. Numunenin ortadaki üç tutma yerlerine bağlanan iplere eşit ağırlıkların asılmasıyla numune deforme edilmiştir. Dıştaki iki tutma yerleri ise uygun germe mekanizmasıyla denge konumlarında, yani numune üzerine çizilen çizgilerin birbirine paralel ve dik kalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir deformasyon durumunda ABCD ile gösterilen iç bölge üniform şekil değişimine maruz kalmış ve ölçümler bu bölge üzerinden elde edilmiştir. Ortadaki üç ipe asılan kuvvetlerin toplamı ABCD alanına uygulanan kuvvet olarak alınmış ve deneyler 17 ile 22 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 15: Treloar tarafından kullanılan iki eksenli çekme deney numunesi.

Rivlin özellikle 1948-1952 yılları arasındaki çalışmalarında [12], [22]-[29] non-lineer katı mekaniği ve kauçuk elastisitesinin temellerini atmıştır. Rivlin [25] Phenomenological teoriyi kullanarak şekil değiştirme enerji fonksiyonunu şekil değiştirme invariantlarının fonksiyonu olduğunu belirtmiş

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (8)$$

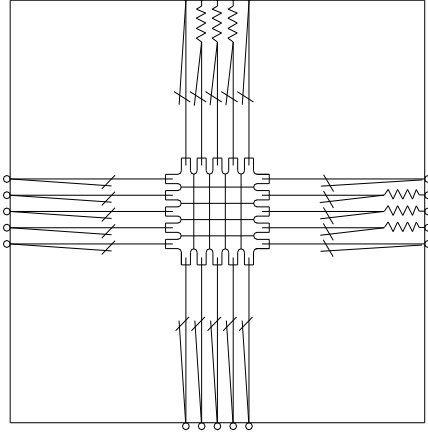
ve sıkıştırılmaz malzemeler için şekil değiştirme enerji fonksiyonunu

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (19)$$

olarak önermiştir [12]. Çalışmasında, $\partial W / \partial I_1$ ve $\partial W / \partial I_2$ türevlerinin I_1 ve I_2 ile değişimi incelenmek üzere birçok deneyler yapmıştır [12]. Yapmış olduğu deneylerden biri de iki eksenli çekme deneyidir.

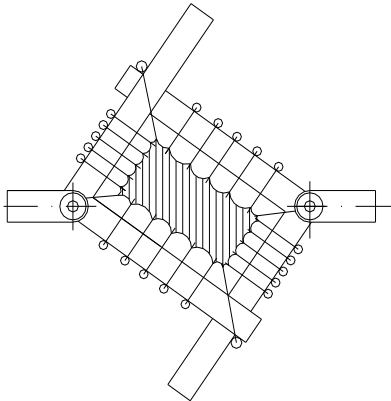
Deneysel çalışmasında kare formda vulkanize edilmiş doğal kauçuk numune kullanılmıştır. Numune 80*80 mm² boyutlarında kesilmiş olup 0.7 mm kalınlığındadır. Numune üzerine 10 mm aralıklı ızgaralar çizilmiş ve ölçümler 30*30 mm²'lik alan üzerinden yapılmıştır. Rivlin ve Saunders kurmuş oldukları deney düzenliğini (Şekil 16) esasen Treloar'ın [21] yapmış olduğu deney düzenine benzerdir. Treloar'ın deney düzeninde ufak değişiklikler yaparak kendi deney düzeneklerini yapmışlardır. Deney düzeninde numunenin uçlarına bağlanan iplerin çekilmesi ve rulmanların çerçeve üzerinden kayarak numunenin deforme olması prensibine

dayanmaktadır. Fakat burada kuvvet kalibre edilmiş helisel yaylar vasıtasıyla elde edilmiştir. Numunenin iki tarafındaki iplerin ortadaki üç tanesine helisel yay konulmuş ve bunların yer değiştirmesinden kuvvet elde edilmiştir. Ortadaki üç helisel yaylı iplerin deforme ettiği 9 adet karenin ($30 \times 30 \text{ mm}^2$) deformasyonundan da şekil değişimi ölçülmüştür. Ayrıca tüm deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 16: Rivlin ve Saunders tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Becker, kauçuk türü malzemelerin vizkoelastik davranışlarını incelemek için iki eksenli çekme deney düzeneği kurmuşlardır [30]. Daha önceki çalışmalarda numunenin bir kenarını tahrik etmek için uygulanan kuvvetin ya asılan ağırlıktan ya da yaylardan belirlendiği fakat bu şekilde bir kuvvet okumanın zaman bağımlı gerilme gevşemesi analizleri için yetersiz olduğu vurgulanmıştır. Bu amaçla Blatz-Ko tarafından 1962 yılında kurulan eş iki eksenli çekme deney düzeneği esas alınarak Şekil 17'de krokisi görülen iki eksenli çekme deney düzeneğini tek eksenli çekme deney düzeneğine bağlayarak tahrik etmişlerdir. Çalışmalarında Blatz-Ko'dan farklı olarak λ_1 ve λ_2 yönlerinde birbirinden bağımsız ölçümler yapabilmişlerdir. $63.3 \times 63.5 \times 1$ [mm] boyutlarında numune kullanarak maksimum $\lambda=2.7$ değerine kadar numuneyi deforme etmişlerdir. Numuneye uygulanan uzama oranı ve kuvvet tek eksenli çekme makinasından okunmuştur.

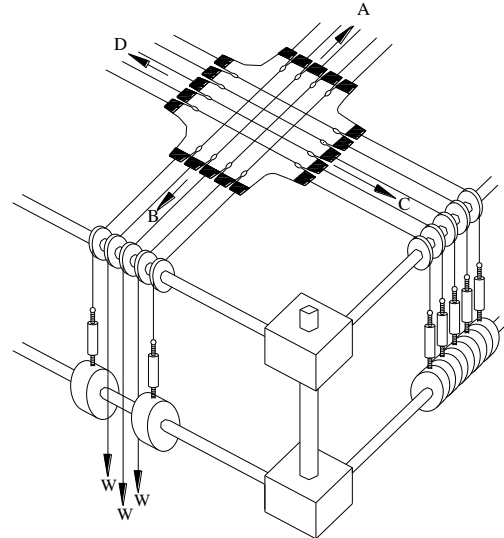


Şekil 17: Becker tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Arenz, Landel, Tsuge, sistematığı yukarıda verilen Becker'in [30] kullandığı mekanizmayı yine tek eksenli çekme cihazına bağlamışlar fakat kuvveti tek eksenli çekme cihazından okumamışlardır [31]. Özellikle ilk çalışmadaki okunan kuvvetin gerilme gevşemesi deneyi için yetersiz olduğunu

belirterek her bir çekme koluna kendileri dizayn ettikleri küçük özel yük hücreleri yerleştirerek numunenin bir tarafına uygulanan kuvvet yerine her bir çekme koluna gelen kuvvet okunmuştur. İlk çalışmalarında 5 adet tutma kolu ile bir kenarın tahriki yapılırken bu çalışmada numunenin bir kenarı 7 adet tutma kolu ile tahrik edilmiştir. Ayrıca numune boyutlarını da $61.5 \times 61.5 \times 1.3$ [mm] olarak değiştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmalar, NASA'nın bir alt laboratuvarı olan Jet Propulsion Laboratory'de gerçekleştirilmiştir.

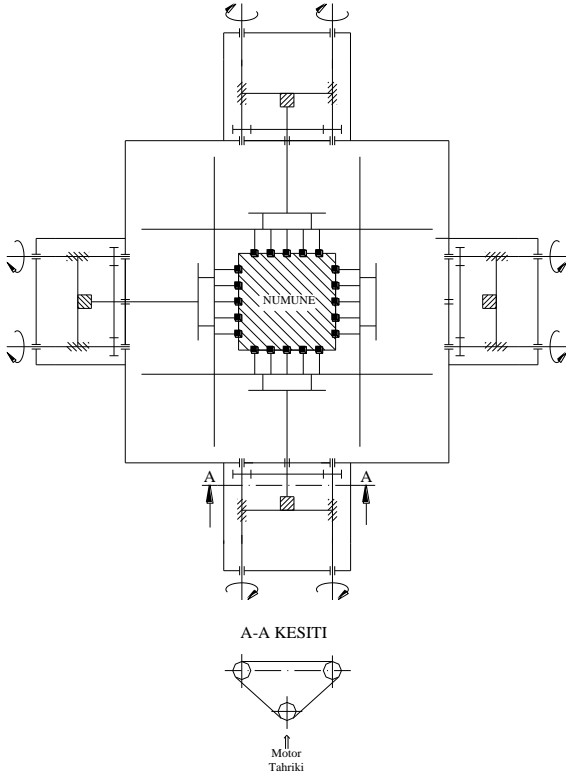
Zapas, büyük deformasyon altında kauçuk türü malzemelerin vizkoelastik davranışını ifade edebilmek için BKZ teorisinde yer alan yeni bir U potansiyel fonksiyonu önermiştir [32]. Bu fonksiyonun geçerliliğini test etmek için yapmış olduğu deneylerden bir tanesi de iki eksenli çekme deneyidir. Kurmuş olduğu deney düzeneğinin çalışma prensibi Rivlin-Saunders'ın deney düzeneği ile aynıdır (Şekil 18). Deneysel çalışmasında kenarları $80 \times 80 \times 0.7$ [mm] olan numune kullanılmıştır. Numune 5 adet tutma yerlerinden deforme edilmiştir. Numune üzerine her iki yönde de 1 cm aralıklı 4 adet çizgi çizilerek numune üzerinde ızgara oluşması sağlanmış ve şekil değiştirme ölçümleri buradan alınmıştır. Şekilden de görüleceği üzere W ile gösterilen üç çekme teline ağırlıklar asılmak sureti ile numunenin ölçüm alınan kenarına uygulanan kuvvet buradan da gerilme belirlenmiştir.



Şekil 18: Zapas tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Klosner ve Segal, elastomerlerde gerilme yığılmasını özellikle de ortasında delik bulunan kauçuk numunelerdeki gerilme yığılmasını incelemek istemişlerdir [33]. Bunun için, çalışmalarının ilk bölümünde, elastomerlerin mekanik özelliklerini ifade eden şekil değiştirme enerji fonksiyonunu elde edebilmek için iki eksenli çekme deney düzeneği kurmuşlardır (Şekil 19).

Deney düzeneğinde; asal doğrultulardaki uzamaları ayrı ayrı kontrol etmişlerdir. Numunenin herhangi bir asal yöndeki deformasyonu sırasında numunenin her iki ucundan da uzaması sağlanmış ve bu nedenle de numunenin çekme hızı normalin iki katı olarak elde edilmiştir. Deney düzeneğinde, numuneyi çekme hızı 1-20 inç/dak ($0.423-8.467 \text{ mm/sn}$) arasında değişebilecek şekilde ayarlanmıştır. Asal yölerdeki tahrik ise çift ağızlı vida vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Numunenin bir kenarı 5 adet çekme çubuğu ile tahrik edilmiş ve bu çekme çubuklarının uyguladığı toplam kuvvet ise bir yük hücresi vasıtasıyla ölçülmüştür.

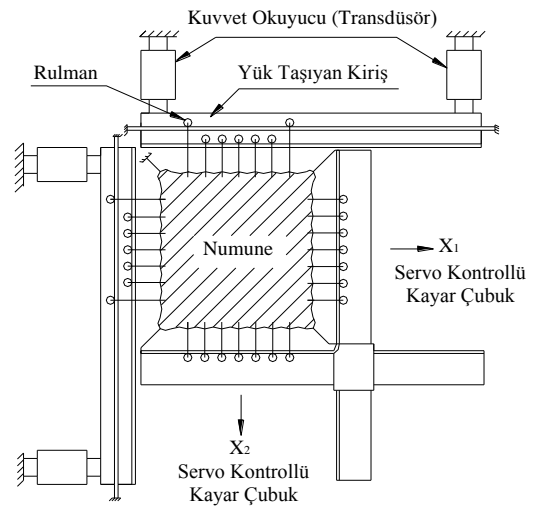


Şekil 19: Klosner ve Segal tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Çekme çubukları, çekme doğrultusuna dik doğrultularda sağa ve sola hareket edebilecek şekilde rulmanlı olarak yataklanmıştır. Deney düzeneğinin tamamı bir sıcaklık odası içersine alınmış olup (-62)-(93) °C ((-80)-(200) °F) aralığında deneyler yapılabilmektedir. Üst yüzey ısıya dayanıklı şeffaf bir levhayla kapatılmış ve böylece numunenin yer değiştirmesi optiksel algılayıcılarla ölçülmüştür. Deneylerde kalınlığı 0.079 inç (2 mm) ve kenarları 6.5 inç (165.1 mm) olan doğal kauçuk numune kullanılmıştır. Numunenin üzerine 1/4 inç'lik (6.35 mm) ızgaralar çizilerek deformasyon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, numune önceden belirlenen boya kadar bir yönde uzatılmış ve bu durumda sabit tutularak numunenin birinci yöne dik doğrultuda da aynı miktar kadar uzaması sağlanmıştır. Uzama oranı ölçümleri 1.0-1.8 aralığında 0.1 adımla gerçekleştirilmiştir. Deneyler 30, 60, 90, 120 ve 150 °F'da (0, 15, 32, 49 ve 66 °C) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar çalışmalarını aynı sıcaklık aralığı için tek eksenli çekme deformasyonu için de gerçekleştirmişlerdir.

Kauçuk mekaniğinde önemli çalışmalardan birisi de Kawabata ve arkadaşlarının [34-39] yaptığı deneysel çalışmalarıdır. Kawabata ve arkadaşları [34, 36] Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunda yer alan $\partial W/\partial I_1$ ve $\partial W/\partial I_2$ türevlerinin I_1 , I_2 ve sıcaklık ile değişimini incelemek üzere 1966 yılında iki eksenli çekme deney düzeneği kurmuşlardır. Bu deney düzeneği ile numuneyi her iki asal doğrultuda iki eksenli olarak deforme etmişlerdir. Deney düzeneğinde λ_1 ve λ_2 'nin, 0.6-3.5 aralığında ölçümlerini yapmışlardır. Bu ise numunenin $3 \leq I_1 \leq 25$ ve $3 \leq I_2 \leq 150$ deformasyon aralığına tekabül etmektedir. 1970 yılındaki çalışmalarında [34] numune boyutlarını 114*114*1 [mm] olarak, 1973 yılındaki çalışmasında [36] ise numune boyutlarını 100*100*1 [mm] olarak almışlardır. Numunenin

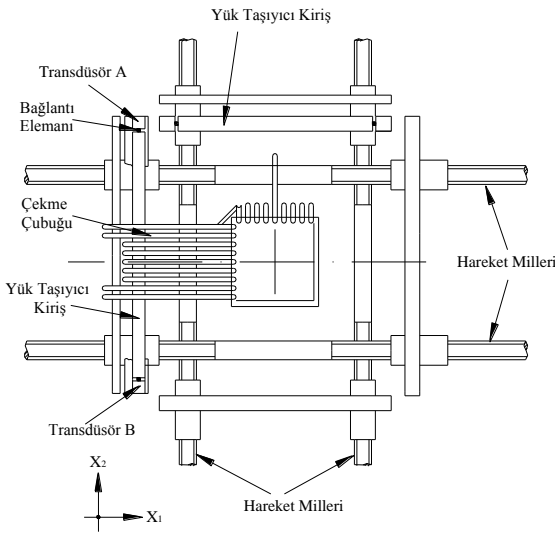
bir kenarı 7 adet tutma çubuğu ile tutulmuş ve çekme yönüne dik yönlere hareket ise rulmanlar sayesinde sağlanmıştır. Asal yönlerdeki hareket ise servo kontrollere ile sağlanmıştır. Numunenin üzerine 7 adetten oluşan birbirine dik iki takım çizgiler çizilerek numunenin deformasyon sırasında davranışını gözlemlemiştir. Çizgiler arası mesafe ise 15 mm'dir. Asal yönlerdeki kuvvetler ise yük hücreleri ile, yer değiştirmeler ise potansiyometre ile ölçülmüştür. Deney düzeneğinde asal yönlerden birine uygulanabilecek maksimum kuvvet 1000 N ve uzama oranı $\lambda=6$ 'dır. Çalışmalarında kullandıkları deney düzeneğinin genel krokişi Şekil 20'de görülmektedir. Deneyler sırasında gerilme yumuşaması etkilerinin ortadan kaldırılması ve zaman bağımsız verilerin elde edilebilmesi amacıyla her bir deformasyonda numune 10 kez yükleme boşaltma işlemine tabi tutularak numunenin gerilme gevşemesi sağlanmıştır. Numune dakikada %400 sabit bir deformasyon hızıyla deforme edilmiş ve kuvvet ölçümleri 5 dakika beklemeden sonra alınmıştır.



Şekil 20: Kawabata ve arkadaşları tarafından yapılan ilk iki eksenli çekme deney düzeneği.

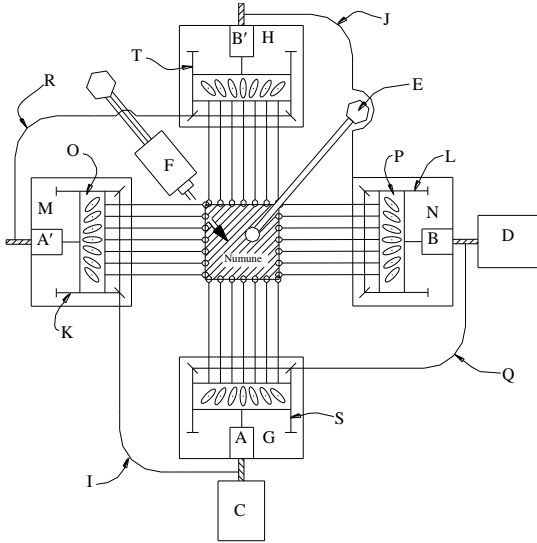
Kawabata, 1973 yılındaki çalışmasında [38], iki eksenli çekme deneyinde küçük deformasyon bölgesinde deneylerin yapılması sırasında gerilme ve şekil değiştirme ölçümlerinde küçük hataların olduğunu bunun ise $\partial W/\partial I_1$ ve $\partial W/\partial I_2$ değerlerinin belirlenmesindeki hataların sebep olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle de küçük deformasyon bölgelerinde $\partial W/\partial I_1$ ve $\partial W/\partial I_2$ değerlerinin daha doğru olarak belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Çalışmasında küçük deformasyon bölgesiyle I_1 ve I_2 'nin 4'ten küçük olduğu şekil değişimleri kabul etmiştir. Bu amaçla 1974 yılında Kawabata $I_1 < 4$ ve $I_2 < 4$ bölgelerinde daha hassas ölçümler yapıldığı yeni bir deney düzeneği tasarlamıştır (Şekil 21). Böylece küçük deformasyon bölgelerinde yeni deney düzeneğini, büyük deformasyon bölgelerinde de ilk kurdukları deney düzeneğini kullanarak istenilen numune için gerilme-şekil değiştirme verilerini elde etmişlerdir [38]-[39]. Ayrıca her iki deney düzeneği de sıcaklık odası içersine alınmış ve 273-353 K sıcaklık aralığında deneyleri yapmışlardır.

San Miguel, katı roket yakıtlarının iki eksenli deformasyonunun zamanla değişimini incelemek için otomatik iki eksenli çekme deney düzeneği kurmuştur [40]. Bilgisayar şeritleri vasıtasıyla numunenin her iki yöndeki şekil değişimleri ayrı ayrı olarak kontrol edilmiştir.



Şekil 21: Kawabata ve arkadaşları tarafından yapılan ikinci eksenli çekme deney düzeneği.

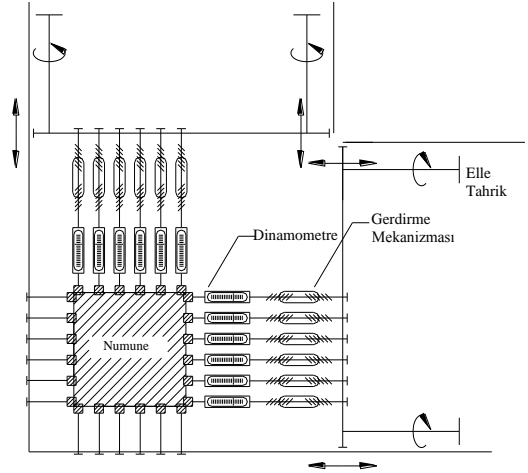
İki adet yük hücresi vasıtasıyla her bir andaki yükler ve 70 mm'lik kamera ile de iki eksenli şekil değiştirme ölçülmüştür. Çalışmasında 100*100*2.5 [mm] boyutlarındaki numuneyi maksimum %50 deformasyona tabi tutmuştur. Deneyler, yapılan çalışmaya göre yarı statik durumdan 150 cm/dakika çekme hızına kadar gerçekleştirilmiştir. Numunenin bir tarafı 7 adet çekme çubuğu ile tahrik edilmiş olup deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 22'de verilmiştir.



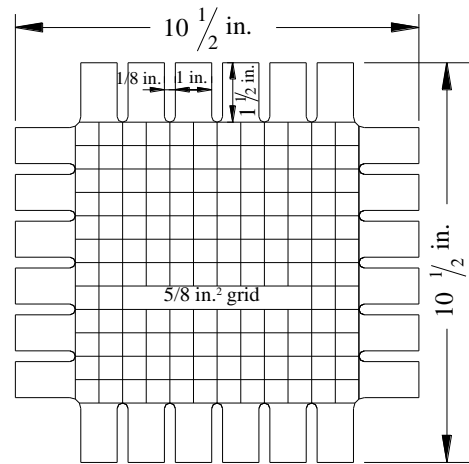
Şekil 22: San Miguel tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Kauçuk mekaniğinde gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntılar şekil değiştirme enerji fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Durelli ve Parks doğal gerilme (natural stress) tanımını kullanarak kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının tanımlanabileceğini belirtmişlerdir [41]. Doğal gerilme-doğal şekil değiştirme tanımlaması yaptıkları çalışmada gerilme-şekil değiştirme eğrisinin lineer değiştiğini bu nedenle de bu yaklaşımın şekil değiştirme enerji fonksiyonuna göre daha basit olması nedeniyle alternatif teşkil edebileceğini belirtmişlerdir. Chen ve Durelli [13] kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının doğal gerilme-doğal şekil değiştirme

tanımlamasından elde etmek için yapmış oldukları deneylerden birisi de iki eksenli çekme deneyidir (Şekil 23). Deney düzeneğinin tahriki elle yapılmıştır. Dolayısıyla da deneylerinde sabit bir çekme hızı söz konusu değildir. Numuneye uygulanan kuvvet dinamometre vasıtasıyla, şekil değişimi ölçümü ise her bir yükleme sonunda numune üzerine çizilen ızgaraların fotoğrafının çekilmesi ile ölçülmüştür. Deneylerde poliüretan kauçuk (100 PMW of Hysol 2085 and 45 PBW Hysol 3462) numunesi kullanılmış olup numunenin boyutları Şekil 24'de görülmektedir.



Şekil 23: Chen ve Durelli tarafından yapılan iki eksenli deney düzeneği.



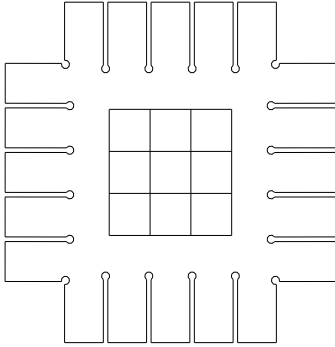
Şekil 24: Chen ve Durelli tarafından yapılan iki eksenli çekme deneyinde kullanılan numune boyutu.

James, Green ve Simpson, kauçuk türü malzemelerin mühendislik uygulamalarında mekanik davranışını tam olarak modelleyebilmek için Rivlin tarafından önerilen şekil değiştirme fonksiyonunu birçok farklı formda seriye açmış ve bunları iki eksenli çekme deney düzeneğinden elde ettiği verilerle olan uyumunu incelemiştir [42]-[43]. James, Green ve Simpson [42], Kawabata'nın [34] 1970 yılında yapmış olduğu iki eksenli çekme deney düzeneğinin benzerini DUNLOP Araştırma ve Geliştirme Merkezinde kurmuştur.

Numunenin tahriki iki yönden de ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve tahrikler vidalı millerin motor kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Numunenin bir kenarının deformasyonu, köşeler hariç, 5 adet tutma çubukları ile gerçekleştirilmiş olup bu çubukların deformasyonu sırasında deformasyon yönüne dik hareketleri

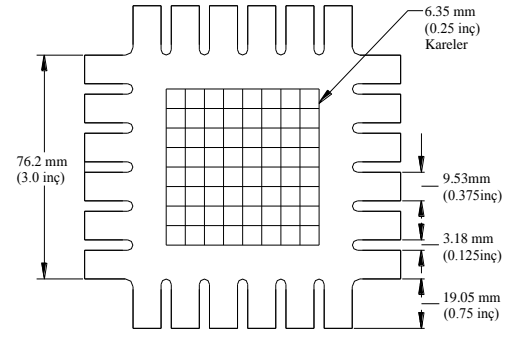
rulmanlar ile sağlanmıştır. Numunenin tutma yerleri ortadaki ölçüm alanından daha ince yapılarak yırtılma probleminin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarında karbon siyahı katkı maddesi katılmamış malzemeyi maksimum $\lambda=3.5$ 'a kadar, karbon siyahı katılmış malzemeyi ise $\lambda=2.0$ 'a kadar deforme edebilmişlerdir. Numunenin üzerine 2 cm aralıklı, ki bunlardan her birisi de 2 mm aralıklı parçalara bölünmüş, kare ızgaralar çizilerek şekil değiştirme ölçümlerinin kolaylaştırılması ve şekil değişimlerinin homojen olup olmadığının kontrolünün yapılması amaçlanmıştır. Numunenin boyutları $10 \times 10 \text{ cm}^2$ olup kalınlık hakkında bilgi verilmemiştir. Deformasyon sırasında bir kenardan uygulanan kuvvet iki yük hücresi vasıtasıyla ölçülmüştür. Yük hücresinden alınan sinyallerin ayrı ayrı ve toplamalarının digital metreden okunması sağlanmıştır. Deneylerde zaman bağımsız ölçümlerin yapılabilmesi için gerilme yumuşaması etkisini ortadan kaldıracak deney prosedürünün belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [43].

Jones ve Treloar, 1975 yılında, Valanis-Landel hipotezinin doğruluğunu incelemek için iki eksenli çekme deneyi gerçekleştirmişlerdir [44]. Bu amaçla Rivlin ve Saunders tarafından kullanılan iki eksenli çekme deney düzeneğinde bazı değişiklikler yaparak benzer bir deney düzeneği kurmuşlardır. Deneylerinde $50 \times 50 \times 1 \text{ [mm]}$ boyutlarında numune kullanmışlar ve numunenin bir tarafı 5 adet çekme kollarıyla deforme edilmiştir. Ortadaki üç kola bağlanan kalibre edilmiş yay sayesinde, $30 \times 30 \times 1 \text{ [mm}^3\text{]}$ lük hacme etki eden, kuvvet ölçülmüştür. Şekil değişimleri ise 0.25 mm hassasiyetle milimetrik skaladan ölçülmüştür. Numunenin tutma yerlerinden yırtılmasını önlemek için tutma yerlerinin uçlarına 1 mm çapında delikler açılmıştır (Şekil 25).



Şekil 25: Jones ve Treloar tarafından iki eksenli çekme deneyinde kullanılan numune.

Chow ve Cundiff, otomobil tekerleklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerini yapabilmek için iki eksenli çekme deneyini gerçekleştirmişlerdir [45]. Deneylerinde kullandıkları iki eksenli çekme numunesi ve boyutları Şekil 26'da görülmektedir. Burada numune her bir kenardan altı adet çekme kolu ile deformasyona tabi tutulmaktadır. Numunenin deformasyon sırasında çekme kollarının bağlı oldukları yerlerden kayabilmeleri nedeniyle numunenin istenen özellikte deformasyonu gerçekleştirmişlerdir. Numuneye uygulanan kuvvet ise ortadaki dört adet çekme kollarından okunmuştur. Numunenin üzerine bir kenarı 0.25 inç (6.35 mm) olan 64 adet kare ızgaralar çizilmiş ve ölçümler buradan cathetometer vasıtasıyla alınmıştır. Numuneye uygulanan kuvvetler ise yük hücresi vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneylerde maksimum $\lambda=1.6$ 'ya kadar deformasyon gerçekleştirilebilmiş ve bu değer üzerinde ise numunenin yırtılması nedeniyle deneylere daha büyük deformasyonlarda devam edilememiştir.

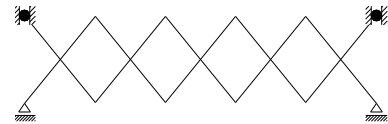


Şekil 26: Chow ve Cundiff tarafından iki eksenli çekme deneyinde kullanılan numune boyutu.

Deneyler sırasında, James ve Green'in [43] kullandığı deney prosedüründen yararlanılarak aşağıdaki deney prosedürünü uygulamışlardır.

- Deneyler $\lambda=1.2$ 'den başlanılmış ve 0.2 artırımlarla gerçekleştirilmiştir,
- Her bir uzama oranında numune 15 defa istenen boya kadar deforme edilip serbest bırakılmıştır. Böylece numunede gerilme gevşemesi sağlanarak denge durumunda deneysel verilerin alınması amaçlanmıştır,
- Her bir yükleme boşaltma işlemi sırasında 10 dakika beklenilmiştir,
- 15. yükleme boşaltma sonunda numunenin stabil bir halde olabilmesi için 45 dakika beklenilmektedir,
- 45 dakika sonunda ölçüm alınarak yeni bir uzama oranında deneyler yapılmıştır.

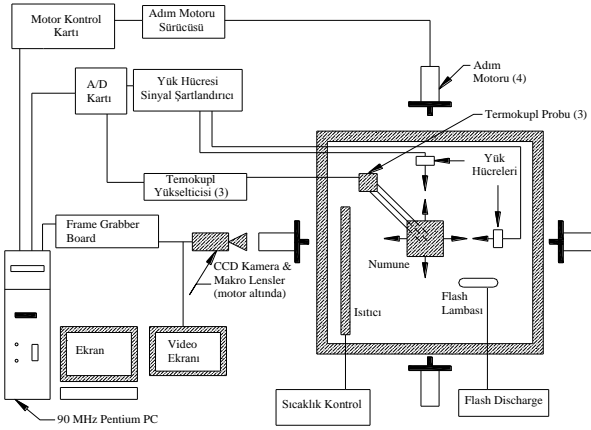
Amerika Birleşik Devletleri'nde kauçuk türü malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği, önemli Ar-Ge çalışmalarının yapıldığı, yeni teknolojilerin geliştirildiği merkez Ohio eyaletidir. Bu eyalet içerisinde yer alan Akron şehri ve Akron Üniversitesi ülkenin kauçuk teknolojisinde ana merkezlerden birisidir. Akron Üniversitesi'nde kauçuk geliştirme ve laboratuvarı (ARDL) Ar-Ge çalışmalarının yapıldığı önemli bir merkezdir. ARDL'de yapılan ve bu laboratuvarlarda kurulan deneylerden bir tanesi de iki eksenli çekme deneyidir [8]. Deney düzeneklerinde Şekil 27'de görülen mekanizmayı numunenin dört bir tarafında kullanarak numunenin istenen formda iki eksenli çekme deformasyonunun gerçekleştirilmesini sağlamışlardır. Deney düzeneği motor ile tahrik edilmiş ve çekme hızı 5.08 mm/dak'dır. Numuneye uygulanan kuvvet her bir çekme kolundaki yük hücreleri vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneylerde $122 \times 122 \times 1.25 \text{ [mm]}$ boyutlarında numune kullanmışlardır. Deney sırasında 5 mm'lik deformasyonlar uygulanmış ve her bir 5 mm'lik deformasyon sonunda 30 sn. beklenilmiş ve 30 sn. sonunda ölçümler alınmıştır. Böylece kauçuğun vizkoelastik özelliklerini elimine ederek zaman bağımsız deneysel verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.



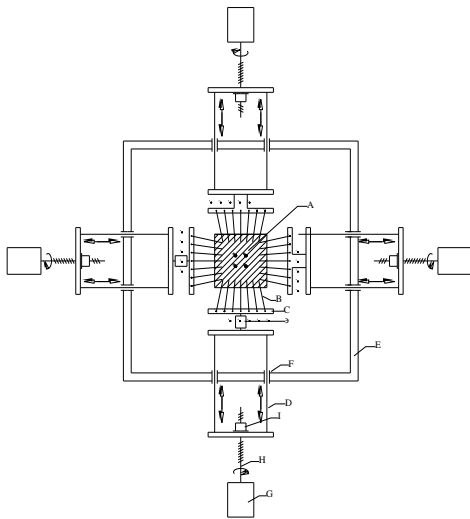
Şekil 27: Akron kauçuk geliştirme laboratuvarında numunenin iki eksenli deformasyonunun gerçekleştirilmesinde kullanılan tahrik mekanizması.

Ortt ve arkadaşları, 2000 yılında, elastomerlerin ve yumuşak dokuların termomekanik davranışlarının analitik olarak incelenmesi durumunda bu malzemelerin çok eksenli

deformasyonlar altında deneylerinin yapılarak deneysel ve analitik sonuçlarının karşılaştırılması gerektiğini vurgulamışlardır [46]. Bu amaçla elastomerlerin ve yumuşak dokuların farklı sıcaklıklarda davranışını iki eksenli çekme deneyleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları deney düzeneğinin krokisi Şekil 28 ve Şekil 29'da verilmiştir. 50*50*1.6 [mm] boyutlarındaki kare numune (A) her bir tarafından 7 adet kevlar ipler (B) vasıtasıyla C parçasına bağlanmıştır. D sistemi, sıcaklık odasında (E) lineer yataklama elemanlarına (F) yataklanmış olan ve 6.35 mm çapında iki adet sertleştirilmiş paslanmaz çelik millerden oluşan bir lineer kızak kayıt sistemidir. Dört bir yandan adım motorlarının (G) tahriki ile özel bilyalı millerin (A) dönmesi sağlanmaktadır. Özel bilyalı millerin somununun (I) lineer kızak kayıt sistemine bağlı olması nedeniyle (H) milindeki dönme hareketi (D) lineer kızak kayıt sistemleri ile doğrusal harekete dönüştürülmüştür. Lineer kızak kayıt sisteminin ileri-geri hareketi yük hücresi vasıtasıyla (C) parçasına aktarılmış ve de uygulanan kuvvet okunmuştur. Böylece adım motorunda oluşan dönme hareketi lineer kızak kayıt sistemlerinde doğrusal harekete dönüştürülmesi buradan da kevlar ipler vasıtasıyla numunenin deforme edilmesi ile iki eksenli çekme deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 28: Ort ve arkadaşı tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.



Şekil 29: Deney düzeneğinin tahrik sistemi.

Numunenin şekil değişimi, numunenin alt yüzeyine işaretlenen dört adet noktanın video kamerayla takip edilmesiyle ölçülmüştür. Ölçümleri yapmak için kamera

numunenin altında yer almaktadır. Tüm sistem 12.7 mm kalınlığında ve 400*400*76.2 [mm] boyutlarında polikarbonat levhalar ile kapatılarak sıcaklık odası oluşturulmuştur. Sıcaklık odası numunenin hava veya sıvı ortamda ± 1 °C toleransla ısıtılmasına izin vermektedir. Sıcaklık odasının sızdırmazlığını sağlamak için ise silikon sızdırmazlık elemanları kullanılmıştır. Oda sıcaklığından 90 °C sıcaklığa kadar sıcaklıklar elde edebilmek için 750 W gücünde 12.7 mm çapında 305 mm boyunda sıvı ortamlarda da çalışabilen ısıtıcı kullanılmıştır. Sistemdeki ölçüm cihazlarının ve motorlarının kontrolü 90 mHz'lik bir Pentium PC ve data acquisition kontrol kartıyla yapılmıştır.

2.1.2.1.2 İnce Cidarlı Tüp Numunenin İki Eksenli Çekme Deneyi

Kauçuk türü malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer deney ise ince cidarlı kauçuk silindirin aynı anda çekme ve iç basınç deneyidir (Şekil 30). Bu deneyde kauçuk silindir yüzeyinde iki eksenli gerilme durumu elde edilir. 1 ve 2 doğrultularındaki şekil değiştirmeler, 1 doğrultusundaki çekme kuvveti ile numuneye uygulanan iç basıncın ayarlanması sureti ile ister iki eksenli çekme isterse eş iki eksenli çekme gerilmesi elde edilir.

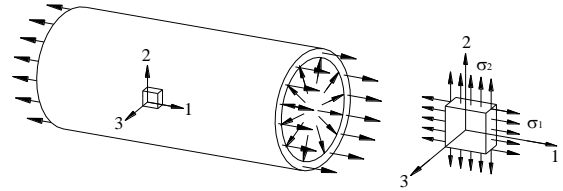
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_1 \\ \lambda_2 &= \lambda_2 \\ \lambda_3 &= \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \end{aligned} \quad (20)$$

Numuneye uygulanan 1 ve 2 yönlerindeki gerilmeler ise;

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_0} + \frac{Pr}{2t} \quad (21)$$

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{t} \quad (22)$$

bağıntılarından bulunur.



Şekil 30: İnce cidarlı kauçuk numuneye aynı anda uygulanan çekme kuvveti ve iç basınç altında iki eksenli gerilme hali.

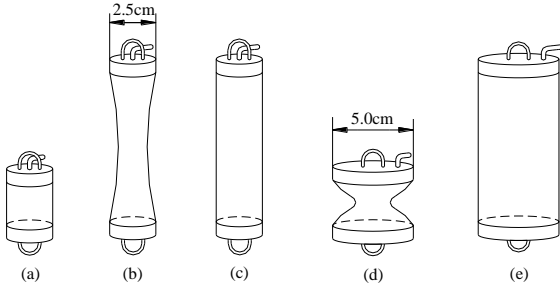
Literatürde bu tür deneysel çalışma ilk olarak Boonstra tarafından yapılmıştır [47]. Boonstra, 1950 yılına kadar kauçuk türü malzemelerin dikdörtgen formda numune kullanarak iki eksenli çekme deneyinin Ariano [20] ve Treloar [21] tarafından yapıldığını ve her iki araştırmacının da kauçuğun düşük yırtılma dayanımı nedeniyle yüksek şekil değiştirmelerde deney yapamadıklarını vurgulamıştır.

Bunlardan sadece Treloar'ın [48] dairesel kabuk numunenin şişirilmesiyle eş iki eksenli gerilme hali için yüksek şekil değiştirmelerde deney yapabildiğini fakat bu durumda da her iki yöndeki gerilmelerin aynı olduğunu ve yüksek şekil değiştirmelerde gerilmelerin birbirinden bağımsız olarak elde edilemediğini belirtmiştir. Bu nedenle 1950 yılındaki çalışmada ince cidarlı kauçuk türü malzemelerin hem çekme hem de şişirme deneyleriyle her iki yönde ve birbirinden bağımsız yüksek şekil değişimlerin elde edildiği iki eksenli çekme deneyi yapmıştır. Numuneye uygulanan eksenel kuvvet dinamometre vasıtasıyla, basınç ise civalı manometre vasıtasıyla ölçülmüştür.

Kauçuk tüpün, Schopper marka çekme cihazıyla uzaması, el pompasıyla da iç basınç altında şişmesi sağlanmıştır. Numunenin dört farklı deformasyon için son hali Şekil 31'de verilmiştir. Çalışmalarında basınç uygulamadan çekme, orijinal çap değeri sabit kalacak şekilde çekme ve farklı çaplarda yani iç basınçlarda çekme deneyleri yapmışlardır. Aynı anda maksimum $\lambda=7$ boy uzaması ve $\lambda=3$ çapta büyüme elde etmiştir.

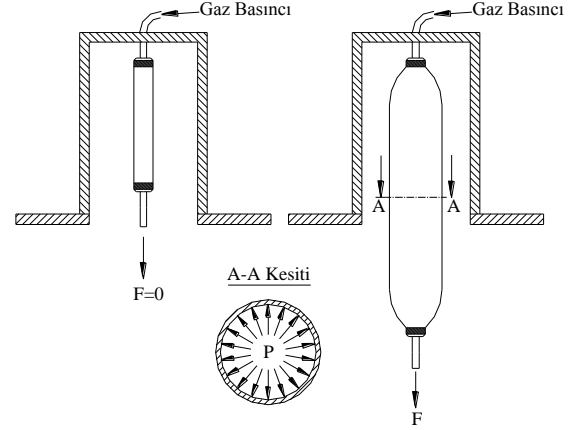
Hoppmann ve Wan, büyük elastik deformasyona maruz kalabilen malzemelerin yanında biyolojik malzemelerin de büyük elastik deformasyonlarının sistematik bir şekilde belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir [49]. Bu amaçla ilk önce lateks kauçuk numunesinin hem çekme hem iç basınç altında iki eksenli deformasyon davranışını incelemişlerdir. Bunun için 0.5 inç çapında, 27 inç boyunda ve 1/32 inç cidar kalınlığında numune kullanmışlardır. Tüp numune alt ucundan asılmış ve üst ucundan ise iç basınç uygulanmıştır. Kontrol vanaları sayesinde de istenen iç basıncın içeride oluşması sağlanarak gaz basıncı civa kolonundan ölçülmüştür. Alt ucuna asılan ağırlıklar sayesinde de eksenel yük uygulanmıştır. Numunenin 15 inç'lik orta bölgesinde boyuna uzama ve çap değişimi ölçülmüştür. Deneysel olarak elde ettikleri verileri teorik sonuçlarla karşılaştırarak kauçuk türü malzemelerin büyük elastik davranışını incelemişlerdir.

Araştırmacılar kauçuk türü malzemelerin iki eksenli deformasyon deneyini tavşan'ın şah damarından alınan biyolojik malzeme için de yapmışlardır. Kendilerinin elde ettikleri deneysel veriler ve literatürden elde ettikleri deneysel verilerle kauçuk için elde ettikleri teorik verileri kullanarak tavşan'ın şah damarının büyük elastik deformasyonunu incelemişlerdir.



Şekil 31: İki eksenli gerilme halinde numunelerin deformasyonu a) Şekil değiştirmemiş hali b) Sadece çekmeye maruz c) Hem çekmeye hem de iç basınca maruz d) Sadece $\lambda=2$ çap şekil değişimi e) $\lambda=2$ boy ve çap şekil değişimi.

Alexander, tek eksenli çekme ve iç basınç etkisindeki kauçuk tüp elemanın dairesel ve boyuna gerilme dağılımını analitik olarak çözmüşlerdir [50]-[51]. Bunun için ilk önce gerçek gerilme ile Henky (logaritmik) şekil değiştirme arasında lineer bir ilişkinin olduğunu düşünerek, ikinci olarak da araştırmacının daha önce kendisi tarafından önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonunu [52] kullanılarak analitik çözüm yapmıştır. Yapmış oldukları analitik çözümlerinin doğruluğunu test etmek için ince cidarlı kauçuk tüp numunenin çekme ve şişme deneyini gerçekleştirmiştir (Şekil 32). Deney için 12 inç boyunda, 1 inç dış çapında ve 14 mil (0.3556 mm) cidar kalınlığında lateks tüp kauçuk numune kullanmışlardır. Numune alt ve üst noktalarından bağlanmış, üst noktadan basınç ve alt noktadan da çekme kuvveti uygulanmak sureti ile iki eksenli çekme deformasyonu elde edilmiştir. Numune üzerine çizilen çizgilerden ise deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 32: İnce cidarlı kauçuk tüp numunenin a) Deformasyon öncesi hali b) İç basınç ve tek eksenli kuvvet uygulanmış hali.

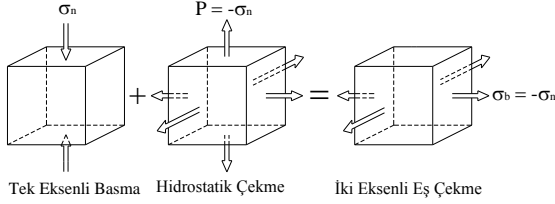
Çalışmalarının sonunda lineer gerilme-şekil değiştirme bağıntısı kullanılarak yapılan analitik çözümün problemin davranışını modellemeye uzak olduğu buna karşılık araştırmacının kendisi tarafından önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonu kullanılarak yapılan çözümlerin ise kararsız bölge haricinde, deneysel verilerle uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Vangerko ve Treloar, kare formdaki kauçuk türü malzemelerin iki eksenli çekme deneylerinin tutma çenelerine yakın bölgelerinde homojensizlikler ve düşük kopma dirençleri nedeniyle büyük uzama oranlarında deneylerin yapılamadığını ve bu nedenle de önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının test edilmesinin sınırlı kaldığını belirtmişlerdir [53]. Bu amaçla çalışmalarında ince cidarlı numunenin hem çekme hem de iç basınç altındaki iki eksenli deformasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmaları için 75 mm boyunda, 25 mm iç çapında ve 1 mm cidar kalınlığına sahip tüp numune kullanmışlardır. Numunenin alt kısmına ağırlık asılarak eksenel yük, üst kısmından da basınç girişi sağlanarak iç basınç uygulanmıştır. Basınç değeri ise civalı manometre ile ölçülmüştür. Deney sırasında numunenin uçlarına farklı çaplarda tıplar takılmak sureti ile çaptaki uzama oranı (λ_2) belirlenmiştir. Numunenin altına uygulanan yük ve içine uygulanan basıncın ayarlanmasıyla numunenin silindirik formda kalması sağlanmıştır. Deneysel verilerini özellikle Valanis-Landel hipotezinin değerlendirilmesinde kullanmışlar ve bu hipotezin $\lambda=3.0$ değerine kadar geçerli olabileceğini fakat daha büyük deformasyonlar için güvenilmez olduğunu ifade etmişlerdir.

2.1.2.2 İki Eksenli Eş-Çekme Deneyi

Kauçuk mekaniğinde uygulanan ikinci bir iki eksenli çekme deneyi ise iki eksenli eş-çekme deneyidir. Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerini ifade eden malzeme sabitlerinin sadece tek eksenli çekme deneyinde belirlenemeyeceği daha önceki kısımlarda vurgulanmıştı. Bu nedenle basma bölgesindeki davranışında bilinerek malzeme sabitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tek eksenli basma deneylerinde numunenin deformasyonu sırasında safi homojen şekil değişimi olmalı ve deformasyon sırasında numunede kayma gerilmeleri oluşmamalıdır. Bu nedenle de numune iki plaka arasında sürtünmesiz olarak sıkıştırılabilir. Bu durumun gerçekleştirilmesi ise pratikte oldukça zordur ve numune ile sıkıştırma plakaları arasındaki küçük sürtünme katsayılarında bile gerilme-şekil değiştirme diyagramlarında oldukça farklı sonuçlar elde

edilmektedir [54]. Bu nedenle araştırmacılar, tek eksenli basma deneyi ile eşdeğer olan deneyler araştırmışlardır. Kauçuk türü malzemelerin sıkıştırılmaz olmaları nedeniyle iki eksenli eş çekme deneyinin tek eksenli basma deneyi ile aynı olduğunu görmüşlerdir (Şekil 33).



Şekil 33: Kauçuk türü malzemeler için iki eksenli eş çekme deformasyonunun elde edilmesi.

Kauçuk türü malzemelerin sıkıştırılmaz olmaları nedeniyle tek eksenli basma deformasyonuna, tek eksenli basma deformasyonunda uygulanan miktarda gerilmeye sahip hidrostatik çekme deformasyonunu eklemek numunenin deformasyonunda bir değişikliğe sebep olmaz. Fakat bu yeni konumdaki numune iki eksenli eş çekme deformasyonuna maruz kalır. Bu nedenle tek eksenli basma deneylerinde sürtünme etkilerinden dolayı literatürde bu deformasyona eş iki eksenli eş çekme deneyi yapılmaktadır. Bu deformasyonda numuneye uygulanan gerilmeler ve uzama oranları birbirine eşit olup

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma & \quad \sigma_3 = 0 \\ \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda & \end{aligned} \quad (23)$$

kalınlık boyunca olan uzama oranı sıkıştırılmazlık konumundan bulunur.

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 &= 1 \\ \lambda_3 &= \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (24)$$

Literatürde kauçuk türü malzemelerin eş iki eksenli çekme deformasyonunu gerçekleştirebilmek için

- Kare formdaki numunenin iki eksenli eş çekme deneyi,
- Daire formdaki numunenin iki eksenli eş çekme deneyi,
- Düz formdaki numunenin iç basınç altında şişme deneyi.

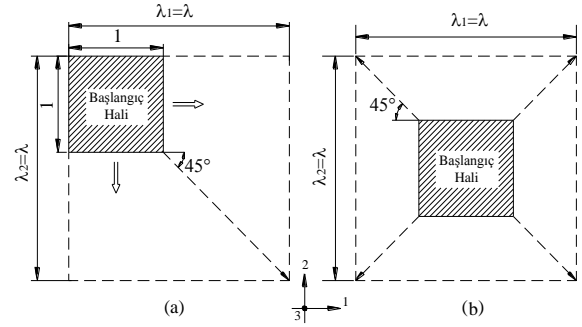
yapılmaktadır. Bu deformasyon ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

2.1.2.2.1 Kare Formdaki Numunenin İki Eksenli Eş Çekme Deneyi

İki eksenli eş çekme deneylerinde numunenin dört bir tarafı aynı kuvvet altında deforme edilmekte ve dolayısıyla 1 ve 2 doğrultularında eşit miktarda deformasyon söz konusudur (Şekil 34). Literatürde iki eksenli çalışma yapanlar aynı zamanda iki eksenli eş çekme deneylerini de gerçekleştirmişlerdir. Bu kısımda ise sadece iki eksenli eş çekme deneyini yapan çalışmalar incelenecektir.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad \sigma_3 = 0 \quad (25)$$

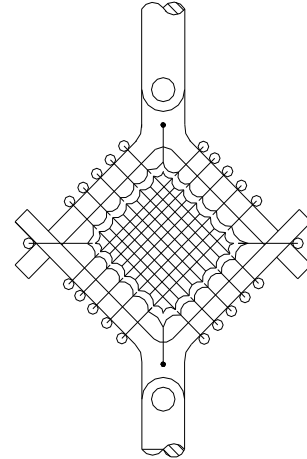
$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (26)$$



Şekil 34: Kare formdaki numunenin iki farklı durumda iki eksenli eş çekme deformasyon hali.

Blatz ve Ko [55]-[56], kauçuk türü malzemelerde kullanılan şekil değiştirme enerji fonksiyonuna sıkıştırılabilirliğinde katıldığı yeni bir şekil değiştirme enerji fonksiyonunu önermişler ve bu önerdikleri şekil değiştirme enerji fonksiyonunun doğruluğunu ispatlamak için de tek eksenli çekme, iki eksenli çekme ve safi kayma deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarında, iki eksenli çekme deformasyonunu gerçekleştirebilmek için Şekil 35'de görülen deney düzeneğini Instron tek eksenli çekme deney düzeneğine bağlayarak gerçekleştirmişlerdir. Teorik çalışmalarında sıkıştırılabilirliği incelediklerinden, sıkıştırılabilen bir malzeme olan köpük kauçuk malzemesini deneylerde numune olarak kullanmışlardır. Numune boyutlarını ise $3 \times 3 \times 3/16$ [inç] ($76.2 \times 76.2 \times 4.7625$ [mm]) olarak almışlardır. Tüm deneyler 75°F 'de (23.89°C) gerçekleştirilmiştir.

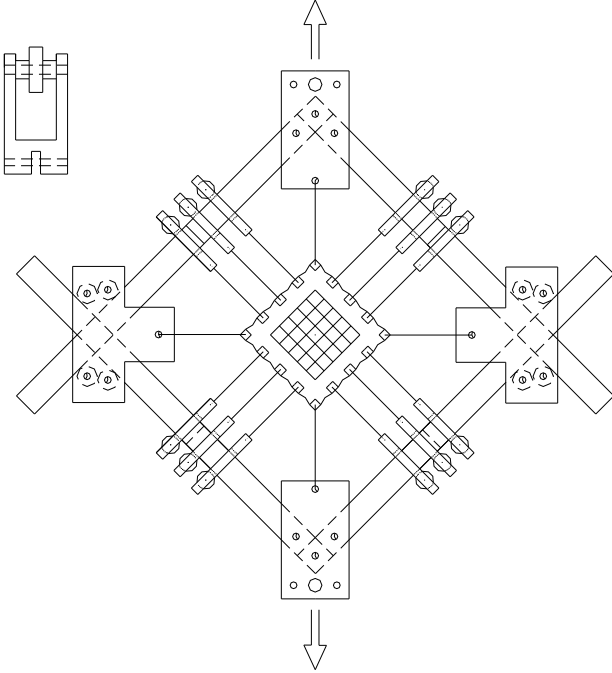
McGuirt ve Lianis [57], stiren-bütadien kauçuk numunesinin vizkoelastik davranışını modelleyebilmek için izotermal durum altında sıkıştırılmaz malzemeler için vizkoelastik bünye denklemi önermişlerdir. Önermiş oldukları bu denklemin geçerliliğini ise tek eksenli çekme ve iki eksenli eş çekme gevşeme (relaxation) testleri ile belirlemişlerdir.



Şekil 35: Blatz ve Ko tarafından yapılan iki eksenli eş çekme deney düzeneği.

Deneyisel çalışmalarında kullandıkları eş iki eksenli deney düzeneğinin kroki resmi Şekil 36'de görülmektedir. Deney düzeneğinin tahriki tek eksenli çekme deney düzeneğine bağlanmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Numunenin her iki yöndeki şekil değişimi hareket edebilen mikroskop ile optiksel olarak okunmuştur. Deneylerde maksimum deformasyon sırasında numunenin köşelerden yırtılması nedeniyle maksimum $\lambda=1.7$ 'ye kadar deneysel çalışmalar yapılabilmektedir.

Haines ve Wilson, literatürde var olan kauçuk türü malzemelerin şekil değiştirme enerji fonksiyonlarını incelemek için yaptıkları deneylerden bir tanesi de eş iki eksenli çekme deneyidir [14]. Deneylerinde Treloar'ın kurmuş olduğu deney düzeneğinin benzerini kurmuş olup 50*50 [mm] boyutlarında numuneyi deforme etmişlerdir. Deney düzeneği hakkında ayrıntılı bilgi vermemekle birlikte Treloar'ın uyguladığı deney yöntemi ve prosedürünün benzerini kullanmışlardır.

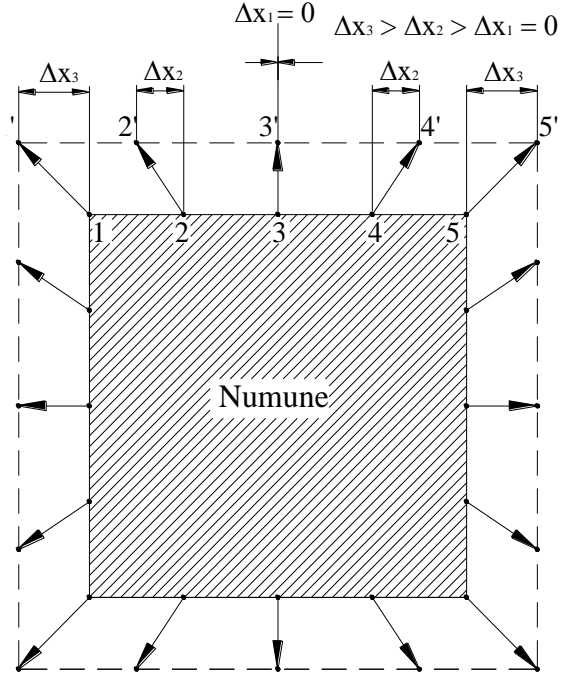


Şekil 36: Mc Guirt ve Lianis tarafından yapılan iki eksenli çekme deney düzeneği.

Baranwal, Pannikottu ve Seiler, Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarlarında, Blatz ve Ko [55]-[56] tarafından kurulan deney düzeneğinin aynısını kurmuşlardır [19]. Araştırmacılar çalışmalarında Blatz ve Ko'nun aksine 127*127*1.27 [mm] boyutlarında numune kullanmışlar ve numuneyi 5.08 mm/dak. çekme hızında tahrik etmişlerdir. Deney düzeneği Blatz ve Ko tarafından kurulan deney düzeneği ile aynı olduğundan deney düzeneği hakkında bilgi verilmemiştir.

Vahapoğlu, kauçuk türü malzemelerin eş-iki eksenli çekme deneylerinden elde edilen gerilme ve şekil değiştirme verilerini kullanarak malzeme sabitlerini elde edebilmek için eş-iki eksenli çekme deney düzeneği kurmuştur [58]. Çalışmasında Şekil 34b'de görülen deformasyon biçimi seçmiştir. Kinematik olarak bu deformasyon biçimini analiz ettiği zaman (Şekil 37) kare formdaki numunenin deformasyondan sonra kenar uzunluğu daha büyük olan kare forma dönüştüğünü görmüştür. Numunenin bir kenarı üzerinde eşit aralıklı 5 adet nokta almış ve bu noktaların deformasyon boyunca hareketlerini izlemiştir. Burada dikkati çeken husus; 3 noktasının 3' noktasına tam dik olarak, 5 noktasının 5' noktasına 45° sağa yatık, 1 noktasının da 1' noktasına 45° sola yatık şekilde hareket etmesidir. 1' ve 3' arasındaki noktalar giderek artan şekilde 0-45° arasında sola doğru, 3' ve 5' arasındaki noktalar ise giderek artan şekilde 0-45° arasında sağa doğru hareket etmektedir. Araştırmacı numunenin her bir kenarı iki eksenli eş-çekme deformasyonu sonrasında bu şekilde bir yer değiştirmeye maruz kalmasını Şekil 27'de verilen mekanizmanın sağlayabileceğini

görmüştür. Bu nedenle bu mekanizmayı numuneyi tahrik etmek için kullanmıştır. Bu mekanizma sayesinde başlangıçta Şekil 38a'daki gibi olan sistem iki eksenli eş-çekme sonunda Şekil 38b'deki hali almış ve numune istenen özellikte deforme edilebilmiştir. Numuneye uygulanan kuvvet streyn geyç vasıtasıyla, şekil değişimi ise kumpas vasıtasıyla ölçülmüştür. Ortadaki üç kolun etkilediği alan deformasyon bölgesi olarak düşünülmüş ve ölçümler için bu alan esas alınmıştır.



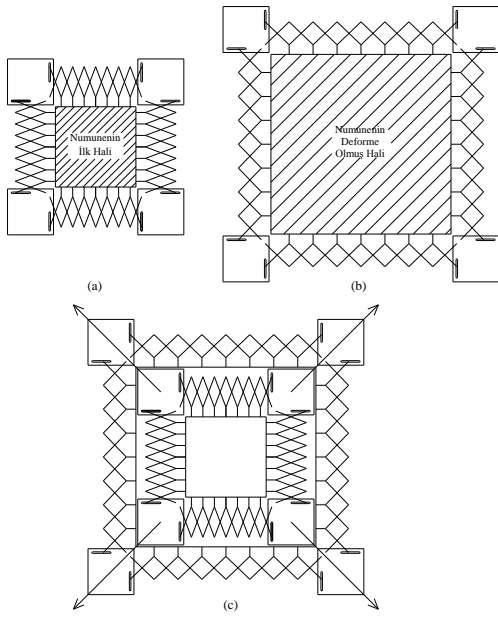
Şekil 37: Numunenin iki eksenli eş-çekme deformasyonu.

2.1.2.2.2 Daire Formdaki Numunenin İki Eksenli Eş Çekme Deneyi

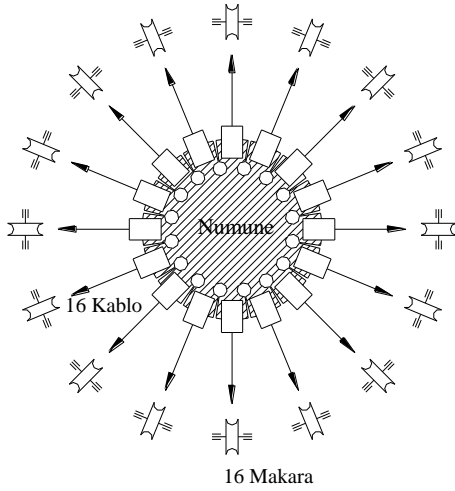
Kauçuk türü malzemelerin iki eksenli eş-çekme deneyleri literatürde ya kare formdaki numunenin iki eksenli çekilmesi veya düz silindirik numunenin iç basınç altında şişirilmesi deneyidir. Fakat ilk defa Axel Products Inc. şirketi tarafından düz silindirik numune çevresi boyunca eş-çekme kuvvetlerine maruz bırakılarak numunenin iki eksenli eş-çekme deformasyonuna maruz kalması sağlanmıştır (Şekil 39). Axel Product çalışanları, daha önce bahsettiğimiz tek eksenli basma deformasyonunun iki eksenli eş-çekme deformasyonuna, kauçuk türü malzemeler için denk olduğu düşüncesiyle tek eksenli basma deney numunesine eksenel yönde basma kuvveti uygulamak yerine çevresel çekme kuvveti uygulanabileceğini düşünerek ilk defa silindirik bir numuneyi iki eksenli eş-çekme deformasyonuna tabi tutmuşlardır [59]-[54]. Bunun için çalışmalarında Şekil 40'da boyutları verilen numuneyi kullanmışlardır. Numune çevresel 16 adet tutma yerlerinden kablolar vasıtasıyla çekilerek iki eksenli eş-çekme deformasyonunun oluşması sağlanmıştır. Numunenin şekil değiştirmesi numune üzerine işaretlenen 25 mm aralıklı çizginin temassız lazer extensometer ile ölçülmesinden elde edilmiştir. 16 kablonun bir yük hücreğine bağlanmasından numuneyi deforme etmek için gerekli kuvvet (F) bulunmuştur. Numuneye uygulanan gerilme ise D ; dış çap, t ; numune kalınlığı olmak üzere

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{\pi Dt} \quad (27)$$

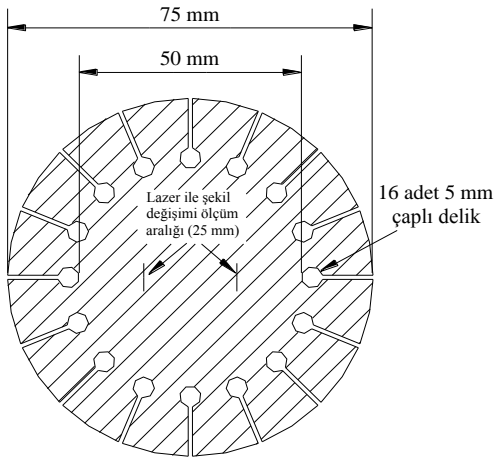
bağıntısından belirlenmişlerdir.



Şekil 38: Makas tahrik sisteminin (a) Başlangıç hali (b) Deforme olmuş hali (c) Her iki konumda.



Şekil 39: Axel Product Inc. tarafından yapılan iki eksenli eş-çekme deney düzeneği.

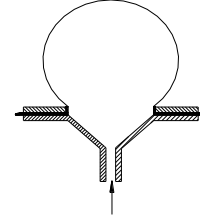


Şekil 40: Axel Product tarafından deneylerde kullanılan numune boyutu.

2.1.2.2.3 Kauçuk Numunenin İç Basınç Altında İki Eksenli Eş-Çekme Deneyi

Kauçuk türü malzemelerde uygulanan diğer bir deney de dairesel kauçuk membranın şişirilmesi deneyidir (Şekil 41). Deneysel olarak yapılması kolay olması ve küçük şekil değişimlerinde kare formdaki numunelerin iki eksenli çekme deneylerine göre daha doğruluklu sonuç vermelerinden dolayı kauçuk türü malzemelerin iki eksenli çekme deformasyonları ilk olarak bu deney vasıtasıyla incelenmiştir.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma = \frac{Pr}{2t} \quad (28)$$

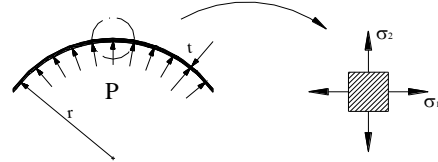


Şekil 41: Dairesel kauçuk membranın şişirilmesi deneyi.

Burada deformasyon sonrasında daha önceki kısımda incelenen kare formdaki numunenin eş-iki eksenli çekme deneyinde olduğu gibi; numunenin her iki doğrultuda da aynı şekil değişimi ve gerilmelerin oluşması sağlanmaktadır.

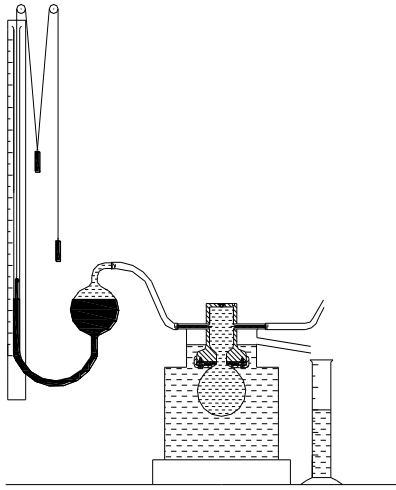
$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma & & \sigma_3 = 0 \\ \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda & & \lambda_3 = \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (29)$$

Fakat şekil değişimleri dairesel yüzeyin tamamı boyunca değil ortasındaki küçük bir alanda üniform olarak değiştiği kabul edilmekte ve ölçümler bu kısımda yapılmaktadır (Şekil 42). Numunedeki uzama oranları, numune üzerine işaretlenen iki noktanın yer değiştirmesinin ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Numuneye etkileyen gerilmeler ise; polar bölgenin yarıçapı, r , ve numuneye uygulanan iç basınçtan, P , belirlenir.



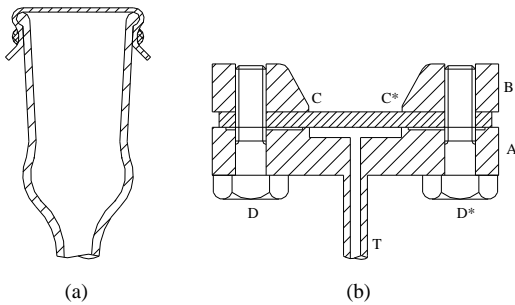
Şekil 42: Dairesel kauçuk membranın şişirilmesi deneyinde ölçüm alınan bölge.

Literatürde bu konuda ilk çalışma Flint ve Naunton [60] tarafından yapılmıştır (Şekil 43). Flint ve Naunton, kauçuk türü malzemeler için dumb-bell numune kullanarak tek eksenli çekme deneyi tasarımlarına rağmen bu deformasyonun rutin kullanımlar için hazır olmadığını ifade ederek kauçuk türü malzemelerin şişme ve patlama deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında 1.75 inç çapında ve 0.04 inç kalınlığındaki numuneyi yukarıda krokisi verilen deney düzeneğinde test etmişlerdir. Burada numunenin 1.0 inç'lik kısmı, uygulanan basınç altında şişmeye ve patlamaya maruz bırakılmıştır. Sisteme uygulanan basınç, sıkıştırılmış hava yerine su ile sağlanmış ve basınç değeri manometreden okunmuştur. Numuneye uygulanan basınç nedeniyle taşan su hacminden ise deformasyon miktarı ölçülmüştür. Araştırmacılar çalışmalarını daha çok patlama deneyine yöneltmişler ve kopma dayanımı ve kopma uzaması ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 43: Flint ve Naunton tarafından kullanılan şişme deney düzeneği.

1944 yılında Treolar; Flint ve Naunton tarafından yapılan şişme ve patlama deneylerini kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını elde etmek için yapmıştır [48]. Numuneye uygulanan basınç altında numunenin ortasındaki bölgenin üniform iki boyutlu deformasyona maruz kaldığını kabul etmiş ve her bir basınçta ortada oluşan deformasyonu ölçülmüştür. Bu deney için, Şekil 44a'daki deney düzeneği ve 50 mm çapında ve 0.8 mm kalınlığında lateks numune kullanılmıştır. Numunenin 25 mm çapındaki kısmı deforme edilmiş ve numunenin tam ortadaki 2 mm çapa sahip bölgenin üniform iki eksenli deformasyona maruz kaldığı düşünülerek ölçümler buradan alınmıştır. Burada; numuneyi şişirmek için, Flint ve Naunton'un aksine, hava basıncı kullanılmıştır. Her bir şişmede hava kesilmiş ve P , r ölçümleri alınmıştır. Bu işleme yüksek şişme bölgelerine kadar devam edilmiştir. En son şişme durumundan numune içindeki hava dışarıya verilerek geri dönüş eğrisi elde edilmiştir. Ölçümler arasındaki zaman, kontrol edilmemekle birlikte ortalama 4 dakikadır. Kauçuğun vizkoelastik davranış sergilemesi nedeniyle birinci gerilme-şekil değiştirme eğrisi, ikinci ve daha sonraki gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle ölçüm almadan önce 2 dakika beklenilerek numunenin mekanik özelliklerinin stabil hale gelmesi sağlanmıştır. Treolar, ayrıca kauçuk türü malzemelerin patlama deneylerini de yapmıştır (Şekil 44b). Fakat kauçuğun şişme deneyi ve buradan elde ettiği gerilme-şekil değiştirme verileri literatürde önemli bir yere sahip olup halen kullanılmaktadır. Bu deneyden elde etmiş olduğu deneysel verilerini ise Neo-Hookean şekil değiştirme enerji fonksiyonunun kullanılabilirliğini test etmek için kullanmıştır.

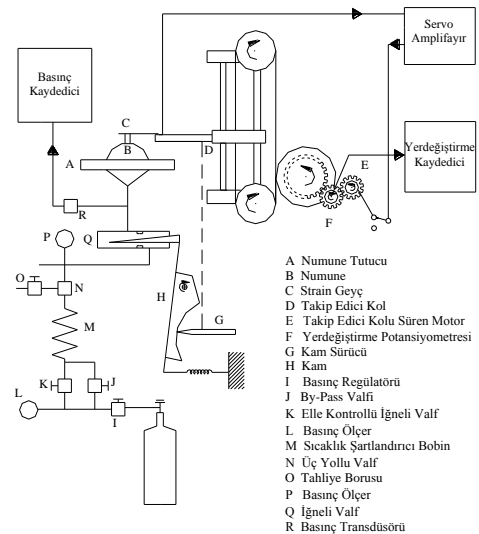


Şekil 44: Treolar tarafından yapılan (a) Şişme deney düzeneği (b) Patlatma deney düzeneği.

Rivlin ve Saunders [12], Rivlin tarafından önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonunun doğruluğunu araştırmak için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de kauçuk türü malzemelerin şişme deneyidir (Şekil 41). Deneylerinde kenarları $10*10*0.170$ [cm] boyutlarında kare numune kullanmışlardır. Numune iki pirinç yüzeyi arasına sıkıştırılmıştır. Üstteki pirinç plakada 5 cm çapında dairesel boşluk oluşturulmuş ve alttaki pirinç plaka ise bir tüpe bağlanmıştır. Tüpün içerisinden basınçlı havanın geçirilmesi ile numunenin şişirilmesi sağlanmış ve numuneye uygulanan basınç civalı manometre ile ölçülmüştür. Numune ve tutma yüzeyleri arasında özel hazırlanmış kauçuk solüsyonu sürülerek numune üst tutma yüzeyleri arasındaki sürtünmenin artırılması sağlanmıştır. Numunenin ortasına çizilen 1 cm çaplı bölgeden ise cathetometer vasıtasıyla ölçümler alınarak r ve λ değerleri hesaplanmıştır. Elde etmiş oldukları deneysel veriler ile de Rivlin tarafından önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonunun doğruluğunu incelenmiştir.

Dickie ve Smith [61], katkı maddesi katılmamış stiren-bütadien numunesinin kopma anındaki özelliklerini belirlemek amacı ile dairesel formdaki numuneyi şişirerek eş-iki eksenli çekme deformasyonuna tabi tutmuşlardır. Çapı 4.6 inç olan numune iç çapı 40 inç olan metal plakalar arasında bağlanmış ve numune gaz basıncı altında farklı uzama oranlarında deforme edilmiştir (Şekil 45). Numunenin orta bölgesinden yani eş-iki eksenli çekme deformasyonunun olduğu bölgeden ölçümler alınarak numunenin şekil değiştirmesi, orta bölgenin eğrilik yarıçapı ve numuneye uygulanan iç basınçtan ise gerilme hesaplanmıştır.

Kawabata, 1973 yılında, kauçuk türü malzemelerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin analizinde yırtılma olayının incelenmesinin faydalı olacağını düşünmüştür. Bu amaçla iki farklı metotla iki eksenli çekme deneyi gerçekleştirmiştir. Bunlardan bir tanesi kare formdaki numunenin iki eksenli çekme deneyi olup diğeri ise kauçuk numunenin şişirilmesi deneyidir [36]. Şişme deneyinde numuneye iç basınç, hava ile uygulanmıştır. Çalışmalarında dairesel kalıp kullanarak eş-iki eksenli çekme ($\lambda_1=\lambda_2$), eliptik kalıp kullanılarak da iki eksenli çekme gerçekleştirmiştir. Makalelerinde deney düzeneği hakkında fazla ayrıntı bilgi vermemişlerdir.

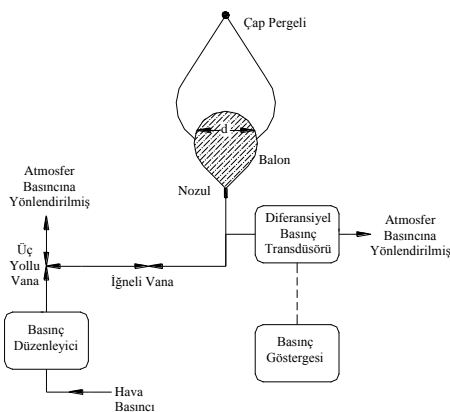


Şekil 45: Dickie ve Smith tarafından yapılan şişme deney düzeneği.

Buraya kadar bahsedilen çalışmalarda, dairesel veya kare formdaki ve düzgün yüzeyli kauçuk elemanın iç basınç etkisinde şişme deneyleri incelenmiştir. Bunun yanında literatürde bazı araştırmacılar çocukların kullandıkları balonlara, yani küresel formda yüzeye sahip kauçuk elemana, iç basınç uygulayarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Alexander, neopren film malzemesinin gerilme-şekil değiştirme bağıntısının o zamana kadar var olan bünye denklemleri ile modellenemeyeceğini belirterek yeni bir şekil değiştirme enerji fonksiyonu önermiştir [52]. Önermiş olduğu bu fonksiyonun doğruluğunu test etmek için de neopren malzemesinden yapılmış balonları iç basınç altında şişirerek iki eksenli çekme deney verilerini elde etmiştir. Alexander, ayrıca başlangıç anında küresel formdaki balonların büyük deformasyon analizini, analitik olarak yapmış ve deneysel sonuçları ile karşılaştırmıştır. Deneylerin yapılması sırasında basınç-yarıçap karakteristiğinin incelenmesinden, lokal bir maksimum bölgenin oluştuğunu bunun ise çekme kararsızlığından meydana geldiğini ifade etmiştir.

Merritt ve Weinhaus [62], yine kauçuk balon numune kullanarak uygulanan iç basınç altında yarıçaptaki değişimi incelemişlerdir. Ayrıca teorik olarak James ve Guth teorisini [63] kullanarak uygulanan iç basıncı yarıçapın fonksiyonu olarak ifade etmişler ve deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır.

Johnson ve Beatty [64], birçok araştırmacıların aksine eş-iki eksenli çekme deneyini yani kauçuk balonun şişirilmesi deneyini kauçuk türü malzemelerde görülen Mullin etkilerini incelemek için yapmıştır. Çalışmalarında kullandıkları kauçuk türü balonların şişirilmesi deney düzeneği Şekil 46'da görülmektedir. Deney düzeneği basınç düzenleyici, üç yollu vana, iğneli vana, diferansiyel basınç transdüseri ve bir nozuldan oluşmaktadır. Balon üç yollu vananın uygun konumda tutulması ile şişirilmekte veya iç basıncı düşürülmektedir. İğneli valf, balonun içine veya dışına hava akışını kontrol etmek ve balondan hava sızdırmazlığını sağlamak için kullanılmaktadır. Basınç transdüseri vasıtasıyla balonu şişirmek için gerekli basınç ölçülmüştür. Burada diferansiyel tip basınç transdüseri kullanılarak balonun içindeki ve dışındaki fark okunmuştur. Ölçüm 0.1 mmHg hassasiyetinde mm Hg olarak okunmuştur. Numune kalınlığı deneye başlamadan önce mikrometre ile ölçülmüştür. Deney sırasında balon üzerindeki kırışıklıkları gidermek amacıyla, balon çok az şişirilmiştir. Balon küresel olmadığından tek bir çap yoktur. Bu nedenle de nozul eksenli boyunca en büyük çap ölçümler için esas alınmış ve bu durum içinde çap, çap pergelii ile 0.8 mm hassasiyetli ölçülmüştür.



Şekil 46: Johnson ve Beatty tarafından yapılan şişme deney düzeneği.

Johannknecht ve Jerrams [65], kauçuk türü malzemelerin eş-iki eksenli çekme verilerinin malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemede yeterli olup olmadığını incelemek için kauçuk türü malzemelerin şişirilmesi deneyini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta malzemelerin fiziksel özelliklerini tanımlamada hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma dolayısıyla da eş-iki eksenli çekme verilerine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında deney düzenekleri hakkında pek bilgi vermemekle birlikte iç basıncı hem hidrolik hem de pnömatik olarak uygulamışlardır. Hidrolik olarak uygulanan iç basıncın daha problemlili ve zor olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca deneydeki şekil değişimleri video extensometer vasıtasıyla ölçmüşlerdir.

2.1.2.3 İki Eksenli Strip Çekme Deneyi

Kauçuk mekaniğinde uygulanan üçüncü bir iki eksenli çekme deneyi ise iki eksenli strip çekme deneyidir. Bu deformasyon daha çok diğer deformasyonlardan elde edilen malzeme sabitlerinin doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılmaktadır. Numunenin asal doğrultulardan birisi boyunca çekmeye maruz kalırken diğer asal doğrultu boyunca numunenin ilk boyunun sabit kalması istenmektedir. Daha önce de belirttiği üzere, iki eksenli çekme deneyi yapan tüm araştırmacılar aynı numune ve aynı deney prosedürü için iki eksenli strip çekme deneyini gerçekleştirdiklerinden bu çalışmalar tekrar burada incelenmeyecektir. Literatürde bu deformasyonu gerçekleştirebilmek için

- Kare formdaki numunenin iki eksenli strip çekme deneyi,
- İnce cidarlı tüp formundaki numunenin iki eksenli strip çekme deneyi,

yapılmıştır. Bu deformasyonlar ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

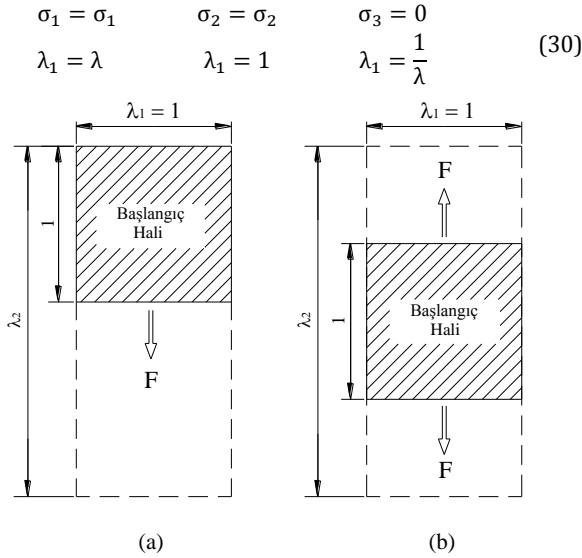
2.1.2.3.1 Kare Formdaki Numunenin İki Eksenli Strip Çekme Deneyi

İki eksenli strip çekme deformasyonunda uygulanan deformasyonlardan bir tanesi kare formdaki numuneye 2 doğrultusunda kuvvet uygulanması sonucu 2 doğrultusunda uzama meydana gelir. Buna mukabil numune 1 doğrultusunda boyu kısalma ister. Numunenin 1 doğrultusundaki boyu kısalmasına müsaade etmeyecek şekilde 2 doğrultusunda numune çekilir (Şekil 47). Bu şekildeki deformasyonlar literatürde iki eksenli strip çekme olarak adlandırılmaktadır.

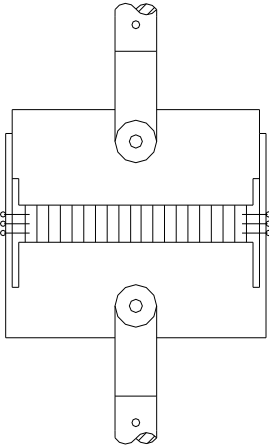
Literatürde iki eksenli strip çekme deneyi tabirine ilk defa Blatz ve Ko [55] tarafından, yapılan çalışmada rastlanılmaktadır. Blatz ve Ko önermiş oldukları yeni şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunun doğruluğunu incelemek için yaptıkları deneysel çalışmalardan birisi de iki eksenli strip çekme deneyidir. Çalışmalarında iki eksenli strip çekme deneyini gerçekleştirebilmek için Şekil 48'de görülen aparatı Instron tek eksenli çekme deney düzeneğine bağlayarak gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde $7*13/16$ [inç] ($76.2*25.4*4.7625$ [mm]) boyutlarında numune kullanmışlar ve deneylerini 75°F 'da (23.89°C) gerçekleştirmişlerdir.

Fuhahari ve Seki [66], $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ ve $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ türevlerinin I_1 ve I_2 invariantları ile değişiminin incelemek için ve de literatürde sıkça kullanılan Mooney-Rivlin $\frac{\sigma}{\lambda - \lambda^{-2}} \sim \frac{1}{\lambda}$ grafiğinin lineer değişim gösterip göstermediğini incelemek için strip iki eksenli çekme deneyleri yapmışlardır. Kurmuş oldukları deney düzeneğinde Prof. Dr. S. Kawabata'dan yardım alarak Şekil 47a'da görülen çalışma prensibine sahip deney düzeneği kurmuşlardır. Çalışmada numunenin tutma kenarları

numunenin orta kısmından daha ince yapılarak numunenin tutma çenelerinden kayması önlenmiştir. Deneylerde numunenin bir yönde sabit kalması sağlanırken diğer yönde maksimum $\lambda=6.0$ 'a kadar deformasyon sağlanmıştır. Her iki yöndeki kuvvetler ise yük hücresi çiftleriyle ölçülmüştür. Deneylerde çekme hızı 50 mm/dak olup deneyler oda sıcaklığında (24 °C) yapılmıştır. Numunenin üzerine çizilen ızgaralar sayesinde numunenin homojen deformasyon gerçekleştirip gerçekleştirmediği izlenmiştir. Deneylerde vulkanize edilmiş doğal kauçuk (NR1-NR3), karbon siyahı katkı maddesi katılmış vulkanize edilmiş doğal kauçuk (NR4-NR7), bütadien kauçuk (BR), stiren-bütadien kauçuk (SBR) ve nitril butadiene kauçuk (NBR) numuneleri kullanılmışlardır.



Şekil 47: Kare formdaki numunenin iki farklı durumda iki eksenli strip çekme deformasyonu.



Şekil 48: Blatz ve Ko tarafından yapılan iki eksenli strip çekme deneyi.

Tagigawa, Yamasoki, Urayama, Tahahoski ve Masuda, polyurethaneureas malzemesinin küçük deformasyon bölgesinde davranışını deneysel ve teorik olarak incelemek için iki eksenli strip çekme deneyini yapmışlardır [67]. Bunun için özel olarak dizayn edilmiş (Iwamoto Seisakusho Co.) iki eksenli çekme cihazı kullanmışlardır. Tutma çeneleri arasındaki mesafe 50*50 [mm] ve kalınlığı 0.1-0.2 mm olan numune kullanmışlardır. Deneylerini ise 0.83 mm/san. çekme hızında gerçekleştirmişlerdir.

2.1.2.3.2 İnce Cidarlı Tüp Formundaki Numunenin İki Eksenli Strip Çekme Deneyi

İki eksenli strip çekme deformasyonunda uygulanan ikinci bir deney ince cidarlı tüp numunenin eksenel yönde çekilmesi sırasında orijinal tüp çapının sabit kalacak şekilde iç basınç uygulanması deneyidir.

Literatürde bu deney ilk defa, Boonstra [47] tarafından yapılmıştır. Boonstra'nın çalışmasına daha önce bahsedildiğinden burada bahsedilmeyecektir. Literatürde bilinen ikinci çalışma ise Mooney tarafından yapılmıştır. Mooney, 1940 yılındaki çalışmasında [68] basit kayma deneyinde, $\lambda=2$ 'ye kadar, gerilme ve şekil değiştirme arasında lineer bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir. Fakat daha sonraki araştırmacıların bu lineer ilişkinin küçük deformasyon bölgelerinde geçerli olduğunu belirtmeleri üzerine kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirme arasında lineer ilişkinin daha büyük deformasyon bölgelerinde de geçerli olduğunu göstermek için ince cidarlı kauçuk tüp numunenin iki eksenli strip çekme deneylerini gerçekleştirmişlerdir [69]. Bunun için iç çapı 49.4 mm, dış çapı 52.5 mm, numune boyu 280 mm ve ölçüm boyu 200 mm olan ince cidarlı tüp numune kullanmıştır. Numunenin ucuna asılan ağırlıklarla eksenel uzama sağlanırken numune içine verilen iç basınç sayesinde numunenin orijinal sabit çapta kalması sağlanmıştır. Numunenin dış çevresi kağıt metre şeridiyle ve basınç ise civalı manometre ile ölçülmüştür. Normal gerilme ve normal şekil değiştirme değerlerinden

$$\gamma = \lambda - \frac{1}{\lambda} \quad (31)$$

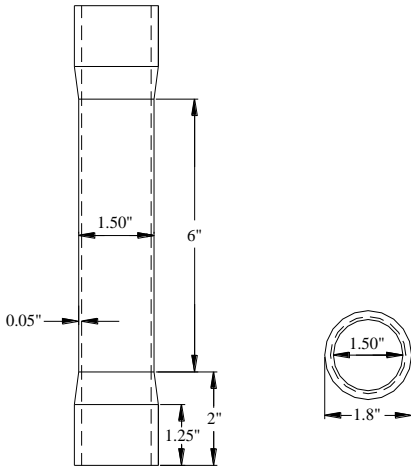
$$\tau = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\lambda + \frac{1}{\lambda}} \right) \quad (32)$$

dönüşüm bağıntılarıyla kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimini elde etmişlerdir. Deneysel çalışmaları sonunda da kayma gerilmesi ile kayma şekil değişiminin, Treloar'ın aksine, lineer değiştiğini belirtmişlerdir.

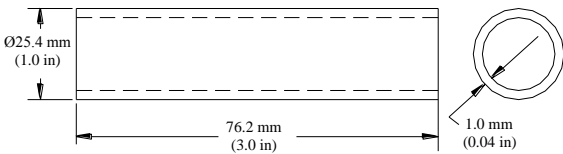
Smith ve Frederick [70], kauçuk türü malzemelerin büyük deformasyona maruz vizkoelastik davranışının tek eksenli çekme deformasyonu dışında birkaç çalışmayla sınırlı olduğunu ve özellikle de geniş bir sıcaklık aralığında deneysel verilerin olmadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmalarında, farklı sıcaklıklarda iki eksenli çekme deneyinden elde edilen verilerin faktörizasyon yöntemiyle tanımlanıp tanımlanamayacağını araştırmışlardır. Daha önceden elde edilen verilerin yeterli doğrulukta olmadığı ve bu nedenle de faktörizasyon metodunun geçerliliğini incelemede yetersiz kaldığını ifade etmişlerdir. Bunun için ince cidarlı tüp kauçuk numunenin tek eksenli çekme ve iç basınç altında iki eksenli gerilme davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında stiren-bütadien vulkanize edilmiş kauçuk numune kullanmışlardır. Numune 0.05 inç cidar kalınlığında olup 6 inç'lik boydan ölçüm alınmıştır. Tutma kısımları ise 0.15 inç cidar kalınlığı ve 1.25 inç boyundadır (Şekil 49). Eksenel kuvvet Instron test makinasıyla sağlanmıştır. Deney sırasında numune çapının sabit kalması istendiğinden numuneyi çevreleyen bir çemberden üç prob geçerek numuneye temas etmektedirler. Çaptaki küçük bir büyüme bir probun bağlı bulunduğu yaprak yayı harekete geçirerek içeri verilen nitrojen gazı kesiliyor ve bir miktarı iğneli vana vasıtasıyla dışarı verilmiştir. Numuneye gaz girişi numunenin üst tarafından yapılmış ve numunenin sabit çapta kalması hassas bir şekilde sağlanmıştır. Numune içindeki basınç ise

0.03 psi hassasiyetinde basınç transdüsörü ile ölçülmüştür. Numunenin uzaması ise, numune üzerine tükenmez kalemle çizilen 12 adet eş aralıklı çizginin deney sırasında fotoğrafının alınması suretiyle elde edilmiştir. Fotoğraf büyük bir ekran üzerine düşürülmüş ve buradan çizgiler arası mesafe ölçülmüştür. Deney düzeneği sıcaklık odası içine alınarak farklı sıcaklık ve çekme hızlarında deneyler yapılmıştır.

Chow ve Cundiff [45], otomobil tekerleklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerini yapabilmek için gerçekleştirilen ikinci deney ince cidarlı kauçuk tüp numunenin tek eksenli çekme ve iç basınç uygulandığı iki eksenli çekme deformasyonudur. Çalışmalarında kullandıkları numune boyutları Şekil 50'de görülmektedir. Numuneye eksenel kuvvet vıda mekanizmasıyla, iç basınç ise numunenin uç kısmının kapandığı tapadan içeriye verilen basınçlı hava ile sağlanmıştır. Kuvvet; yük hücresi, basınç; manometre ve şekil değişimleri ise cathetometer ile ölçülmüştür. Uygulanan eksenel çekme kuvveti altında numune çapındaki değişim optik sensörler vasıtasıyla algılanmış ve numune çapının sabit kalması ise basınç giriş ve çıkışının mikro-anahtarlar vasıtasıyla kontrolü ile sağlanmıştır. Deney sırasında sabit çap değerinde maksimum $\lambda=2.8$ 'e kadar deformasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 49: Smith ve Frederick tarafından iki eksenli strip çekme deneyinde kullanılan ince cidarlı tüp numune.



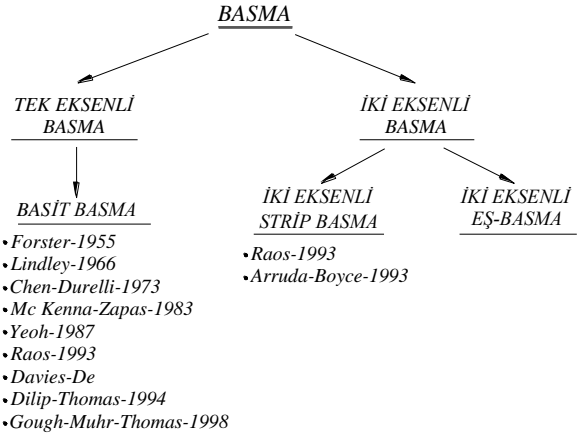
Şekil 50: Chow ve Cundiff tarafından kullanılan ince cidarlı kauçuk tüp numune.

2.2 Basma Deneyleri

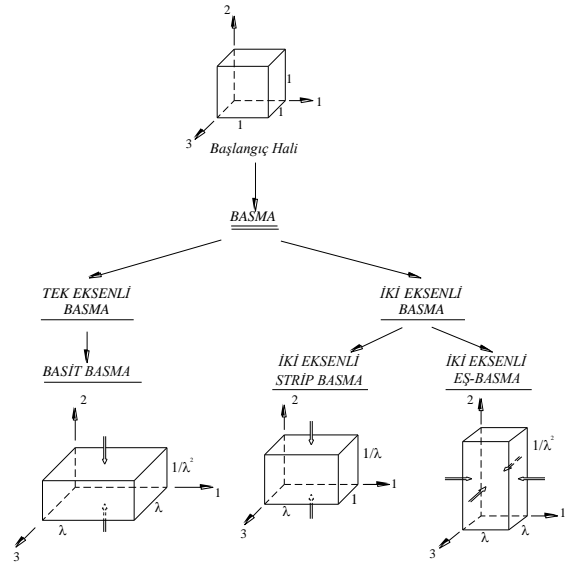
Literatürde kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan bir diğer deney basma deneyleridir. Basma deneyleri numuneye uygulanan kuvvete göre;

- Tek eksenli basma,
- İki eksenli basma,

olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu bölümde literatürde sınırlı sayıda da olsa var olan basma deneyleri incelenecektir. Şekil 51 ve Şekil 52'de sırasıyla literatürde tek eksenli basma deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar ve tek eksenli basma deformasyonları görülmektedir.



Şekil 51: Literatürde tek eksenli basma deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar.



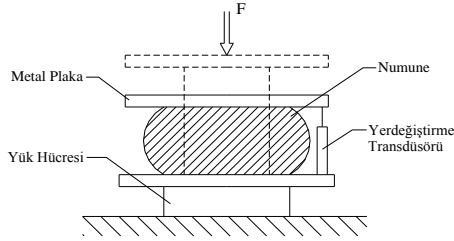
Şekil 52: Tek eksenli basma deformasyonları.

2.2.1 Tek Eksenli Basma Deneyleri

Kauçuk türü malzemelerin non-linear davranış göstermeleri nedeniyle mekanik özelliklerini ifade eden malzeme sabitlerinin hem çekme hem de basma bölgesini kapsayacak şekilde belirlenmelidir. Bu nedenle de kauçuk türü malzemeler için basma deneyleri yapılmalıdır. Literatürde yapılan tek eksenli basma deneyi basit basma deneyidir. Esasen basit basma deneyleri, deformasyon açısından, uygulaması kolaydır (Şekil 53). Silindirik formdaki numune metal plakalar arasına konur. Tek eksenli çekme makinasında metal plakalara eksenel kuvvet uygulanmasıyla numune deforme edilir.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma & \sigma_2 &= \sigma_3 = 0 \\ \lambda_1 &= \lambda & \lambda_2 &= \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \end{aligned} \quad (33)$$

Uygulanan yük, yük hücresinden, yer değiştirme ise yer değiştirme transdüsöründen okunur. Basit çekme deneyine göre uygulanan kuvvetin yönü farklı ve kuvvet doğrultusundaki uzama oranı birden küçüktür.



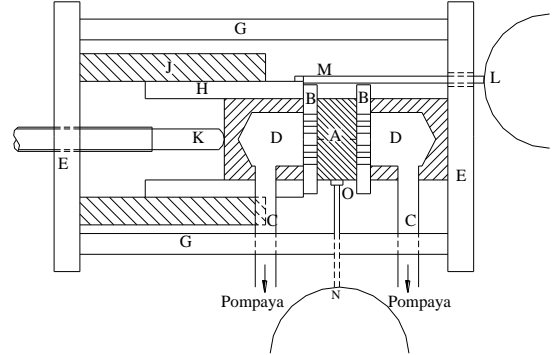
Şekil 53: Basit basma deformasyonu.

Bu deformasyon türünde metal plakalar ile kauçuk numune arasındaki sürtünme katsayısının ihmal edilemeyecek derecede fazla olmasından dolayı, daha önce de belirtildiği üzere, literatürde bu deney yerine iki eksenli eş çekme deneyleri yapılmaktadır. Sürtünme katsayısının 0.1 olması durumunda bile kayma şekil değişimi olmakta, bu ise ölçüm sonuçlarını hatalı vermektedir. Gerçek sürtünme katsayısının bilinmediği için de çoğu kez maksimum kayma şekil değişimi, maksimum basma şekil değişimini geçmektedir [8]. Bu nedenle de literatürde basit basma deneyleri yerine iki eksenli eş-çekme deneyleri yapılmaktadır. Bu belirtmiş olduğumuz olumsuzluklara rağmen literatürde yapılan bazı basit basma deneyleri burada incelenecektir. Ayrıca kauçuk türü malzemelerin basit basma deneyleri için hazırlanmış ASTM D 575 [71] standardına müracaat edilebilir.

Literatürde ilk basit basma deneyi Forster tarafından yapılmıştır [72]. 1955 yılına kadar tek basit basma verileri Treloar tarafından iki eksenli eş-çekme verilerinden elde edilen basit basma verileriydi. Forster teorik çalışmaları deneysel verilerle karşılaştırmak ve iki eksenli eş-çekme verilerinden elde edilen basit basma verilerini direkt olarak elde edilen basit basma verileri ile karşılaştırmak için Şekil 54'de görülen basit basma deney düzenineyi kurmuştur. Şekilde A numunesi, üzerine 0.343 mm çapında 64 adet delik açılmış B plakaları arasında yerleştirilmiştir. Belirli bir basınç altında pompadan gelen akışkan C kanalından geçip D haznesine gelmekte buradan da B metal plakadaki deliklerden geçerek numune ile B metal plaka arasına yağlama sağlamaktadır. Forster, böylece, basit basma deneylerinde oluşan sürtünmeyi en aza indirmeyi hatta hiç oluşmamasını sağlamayı amaçlamıştır. C hattına bağlı cihazdan da uygulanan sıvı basıncı okunmuştur. Numunenin sıkıştırılması soldaki, H bronzu içerisine yataklanmış bloğun hareketi ile sağlanmıştır. Bu bloğun hareketi ile yağlama sistemi de hareket etmektedir. K vidası da H bronzu içerisine yataklanmış bloğun J gömleği içerisinde kaymasını sağlamak ve numune deforme edilmektedir. Numunenin deformasyon miktarı, M ayağı bronza bağlanmış L komparatörü ile yapılmıştır. Benzer şekilde numunenin yanal genişlemesi, o ayağı numuneye temas eden N komparatörü ile ölçülmüştür. Sistem E plakaları arasına 4 adet G çubuklarıyla bağlanarak monte edilmiştir. Deneylerde 40 mm çapında ve 19 mm boyunda silindirik numune kullanmıştır.

Lindley [73] çalışmasında, büyük deformasyonlarda kauçuk türü malzemelerin basma bölgesindeki davranışını ifade etmek için yeni bir fonksiyon önermiştir. Bu fonksiyonun doğruluğunu ise yapmış olduğu deneylerle incelemiştir. Çalışmasında 63 mm çapında ve 12.6 mm kalınlığında numune kullanmıştır. Deneyler sırasında basma yüzeyleri arasında sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı madde kullanmıştır. Chen ve Durelli [13] çalışmalarında yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de basit basma deneyidir. Deneylerde 1 inç çapında ve 2 inç boyunda silindirik numune kullanmışlardır. Numuneye yük asılmak suretiyle deformasyonu sağlanmıştır.

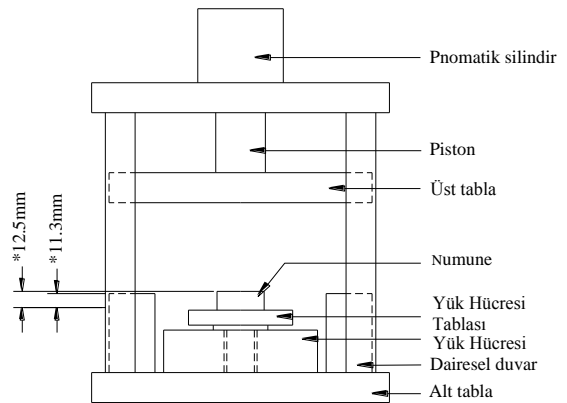
Numune ve metal yüzey arasında gres sürülmek suretiyle de yüzeyler arasındaki sürtünmenin azaltılması amaçlanmıştır. Numune üzerine bir kenarı 1/4 inç olan kare ızgaralar çizilmek sureti ile deformasyon izlenmiş ölçümler ise hareketli mikroskop vasıtasıyla yapılmıştır.



Şekil 54: Forster tarafından kurulan basit basma deney düzenineyi.

Mc Kenna ve Zapas [74], kauçuk türü malzemelerin küçük deformasyon bölgesinde çekme ve basma davranışını modelleyebilmek için yapmış olduğu deneylerden bir tanesi de basit basma deneyidir. Çalışmalarında 12.7 mm çapında ve 12.7 mm boyunda veya 22 mm çapında ve 33 mm boyunda silindirik numune kullanmışlardır.

Yeoh [75] çalışmasında, kauçuk türü malzemelerin basma modülünü belirleyebilmek için yeni bir metod tanımlamıştır. Kauçuk türü malzemelerin basma modülünü belirleyebilmek için gerekli deney düzeneklerinin pahalı olduğunu vurgulamış ve kendisinin kurduğu deney düzenineyi bu amacı yerine getirebilecek ucuz bir düzenek (Şekil 55) olduğunu ifade etmiştir. Sistemde, pnömatrik silindir ve piston vasıtasıyla numuneye baskı kuvveti uygulanmış ve uygulanan kuvvet yük hücresi vasıtasıyla belirlenmiştir. Numuneye uygulanmak istenen deformasyon miktarı dairesel duvar vasıtasıyla sınırlandırılmıştır. Şekilde numunenin %10 deformasyonuna müsaade eden bir duvar vardır. Numunenin deformasyonunu 0.01 mm hassasiyetli derinlik mikrometresi ile ölçmüştür. Numunedeki vizkoelastik özellikleri elimine etmek için, keyfi olarak, yük uygulandıktan 1 dakika sonra ölçümleri almıştır. Çalışmasında ASTM D 575 [71] belirtilen boyutlarda, 29 mm çapında ve 12.5 mm yüksekliğinde numune kullanmıştır.



Şekil 55: Yeoh tarafından kurulan basit basma deney düzenineyi.

Yeoh [76] çalışmasında, şekil değiştirme enerji fonksiyonunun sadece birinci şekil değiştirme invaryantına, bağlı olduğunu kabul etmiş ve yeni bir şekil değiştirme enerji fonksiyonu önermiştir. Önermiş olduğu fonksiyonun doğruluğunu test

etmek için yapmış olduğu testlerden bir tanesi basit basma deneyidir. Çalışmasında numune olarak 29 mm çapında ve 13 mm yüksekliğinde silindirik numune kullanmış olup numune ve metallerin basma yüzeyini sürtünmeyi azaltmak amacıyla silikon gres kullanmıştır.

Arruda ve Boyce [77], kauçuk türü malzemeler için yeni bir şekil değiştirme enerji fonksiyonu önermişlerdir. Önermiş oldukları fonksiyonun doğruluğunu test etmek için yapmış oldukları deneyden bir tanesi basit basma deneyidir. Deneylerinde bir kenarı 12 mm olan numuneyi Instron 1350 servo-hidrolik test makinasında 1 mm/san. basma hızında deforme etmişlerdir. Deneyler sırasında ise numuneyi maksimum $\lambda=0.2$ 'ye kadar deforme edebilmişlerdir.

Raos [16] çalışmasında, basit basma deneyi için 50 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde numune kullanmıştır. Deneylerini Zwick 1485 çekme cihazında ve düşük basma hızında gerçekleştirmişlerdir.

Davies, De Dilip ve Thomas [18] çalışmalarında, 29 mm çapında ve 12.5 mm kalınlığında numune kullanmışlardır. Deneylerinde viskoelastik özellikleri ortadan kaldıracak bir deney prosedürü uygulamamışlardır. Deneylerini 23 °C'de Instron çekme cihazında dakikada %10 deformasyon hızında gerçekleştirmişlerdir.

Gough, Muhr ve Thomas çalışmalarında, 32 mm çapında ve 25 mm boyunda numune kullanmışlardır [78].

Noparanakailas [79], sonlu elemanlar yöntemiyle köprü yataklamalarının modellenmesi üzerine çalışmış olduğu projede kauçuk türü malzemelerin malzeme sabitlerinin sonlu elemanlar paket programına veri olarak girilmesine ihtiyaç duymuştur. Bu nedenle bu sabitlerin belirlenebilmesi için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de basit basma deneyidir. Deneylerinde 28 mm çapında 13 mm yüksekliğindeki numuneyi 5 mm/dak basma hızında deforme etmiştir. Ölçümleri üçüncü yüklemde almış ve numuneyi maksimum % 30-40 deforme edebilmiştir.

Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarlarında ise 25.3 mm çapa ve 17.8 mm boya sahip numune temas yüzeyleri iyi bir şekilde yağlanarak 5.08 mm/dak. basma hızında deforme edilmektedir. Fakat, özellikle, malzemenin basma bölgesindeki davranışının temas bölgelerindeki sürtünme katsayısının büyük olması nedeniyle basit basma deneyiyle belirlenemeyeceğini bunun yerine iki eksenli eş-çekme deneylerinin yapılması gerektiğini vurgulamışlardır [8].

2.2.2 İki Eksenli Basma Deneyleri

Literatürde yapılan iki eksenli basma deneyleri oldukça sınırlıdır. İki eksenli basma deneylerinde temasta bulunan yüzey sayısı iki olmakta bu ise yüzeyler arasındaki sürtünme nedeniyle deformasyonu daha da zorlaştırmaktadır. Bu bölümde numuneye uygulanan kuvvete göre;

- İki eksenli strip basma,
- İki eksenli eş basma,

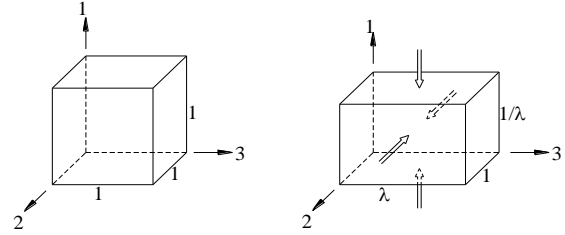
deneylerinden kısaca bahsedilecektir.

2.2.2.1 İki Eksenli Strip Basma Deneyi

Literatürde pek kullanılmayan bu deformasyon türünde numune 1 doğrultusunda F kuvveti altında sıkıştırılmakta ve numunenin 2 doğrultusunda boyunun değişmemesi sağlanırken 3 doğrultusunda numunenin uzamasına müsaade edilmektedir (Şekil 56).

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1 & \sigma_2 &= \sigma_2 & \sigma_3 &= 0 \\ \lambda_1 &= \lambda & \lambda_2 &= 1 & \lambda_3 &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (34)$$

Literatürde bilinen iki eksenli strip basma deneyi sadece 1993 yılında iki farklı araştırmacı tarafından yapılmıştır. Bu deformasyon, deneysel olarak uygulanması çok kolay olan ve çok basit bir aparatla, tek eksenli çekme ve basma makinelerinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı araştırmacılar tarafından kauçuk türü malzemelerin malzeme sabitlerini belirlemede kullanıldığı tahmin edilen bu deneyden alınan deneysel verilerin doğruluğu tartışılır düzeydedir.



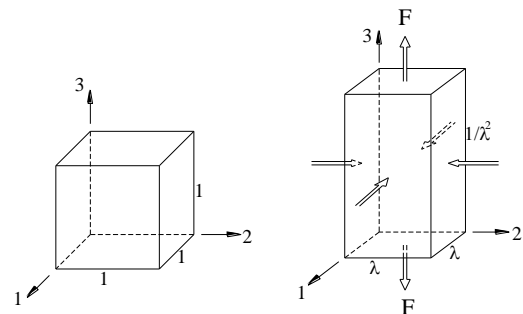
Şekil 56: İki eksenli strip basma deformasyonu.

Raos [16], kauçuk türü malzemelerin sonlu elemanlar uygulamaları için gerekli olan malzeme katsayılarını belirleyebilmek için iki eksenli strip basma deneyini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında 50*50*30 [mm] boyutlarındaki numuneyi Zwick 1485 çekme makinasında özel yapılmış aparat vasıtasıyla düşük basma hızında deforme etmiştir. Deneylerde zaman bağımsız ölçümler elde edebilmek için beşinci yüklem boşaltma işleminden sonra ölçümler alınmıştır. Numunenin basma yüzeyleri silikon yağ ile yağlanarak sürtünmenin azaltılması amaçlanmıştır.

Arruda ve Boyce [77] çalışmasında, önermiş oldukları yeni şekil değiştirme enerji fonksiyonunun doğruluğunu test etmek için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi iki eksenli strip basma deneyidir. Çalışmalarında 12*9*12 [mm] boyutlarında numuneyi 9 mm'lik kenar sabit kalacak şekilde maksimum $\lambda=0.15$ 'e kadar deforme etmişlerdir. Deneyleri Instron 1350 servo-hidrolik test makinasında 1 mm/san basma hızında gerçekleştirmişlerdir.

2.2.2.2 İki Eksenli Eş Basma Deneyi

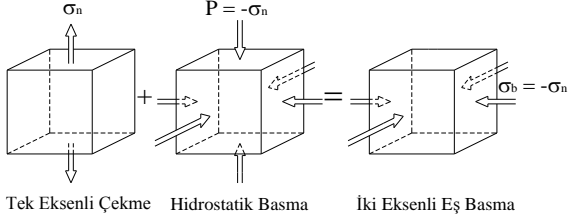
Literatürde, henüz, iki eksenli eş-basma deformasyona maruz deney yapılmış değildir. Numune 1 ve 2 doğrultularında eşit F kuvvetleri altında basmaya maruz kalırken 1 doğrultusunda ise uzamaktadır (Şekil 57).



Şekil 57: İki eksenli eş-basma deformasyonu.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma & \sigma_3 &= 0 \\ \lambda_1 &= \lambda_2 = \lambda & \lambda_3 &= \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (35)$$

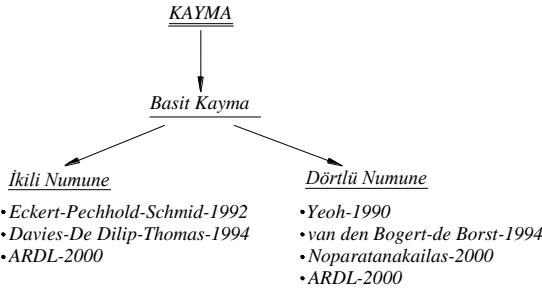
Literatürde bu deneyin yapılmamasının en büyük sebebi ise iki eksenli eş-basma deneyinin, kauçuk türü malzemelerde, tek eksenli çekme deneyi ile aynı olmasıdır (Şekil 58). Dolayısıyla pratikte en kolay uygulanan bir deneyin daha zor bir formda yapılmasının da anlamı yoktur.



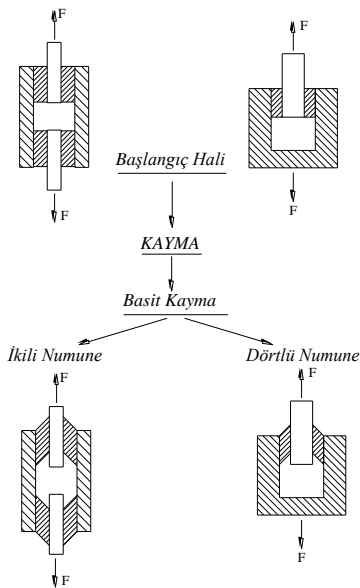
Şekil 58: Kauçuk türü malzemeleri için iki eksenli eş-basma deformasyonunun elde edilmesi.

2.3 Kayma Deneyleri

Kayma deneyi denilince ilk akla gelen basit kayma deneyidir. Safi kayma deformasyonu işlenirken belirtildiği üzere literatürde basit kayma deformasyonları yerine safi kayma deformasyonları yapılmaktadır. Basit kayma deformasyonunu uzama oranları cinsinden ifade etmek zor olmasına rağmen literatürde yapılmış çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda daha çok Sekant modülü veya Chord modülünün belirlenmesinde kullanılmıştır. Şekil 59 ve Şekil 60'da sırasıyla basit kayma deneyi üzerine çalışma yapan araştırmacılar ve basit kayma deformasyonları verilmiştir. Aşağıda da bu deformasyonlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 59: Literatürde basit kayma deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar.



Şekil 60: Basit kayma deformasyonları.

Basit kayma deneyi, çekme ve basma deneylerinden farklı olarak, sadece homojen bir deformasyon türüdür. Çekme ve basma deneyleri ise safi homojen deformasyon türüdür. Basit kayma deneyi, uygulanan kuvvetin yönünden dolayı, deformasyon sırasında asal eksenler sabit kalmamaktadır. Bu nedenle de basit kayma deformasyonunda safi homojen deformasyondan söz edilemez [80]. Kauçuk mekaniğinde genellikle kayma gerilme-kayma şekil değiştirmesi metal plakalara yapıştırılmış dikdörtgen veya dairesel silindirik blokların deformasyonundan elde edilir. Yapıştırılmış metal plakalardan bir tanesi sabit tutulurken diğer plakaya kendi düzlemi içinde kuvvet uygulanır (Şekil 61). Buradan τ ; kayma gerilmesi, F ; uygulanan kuvvet ve A ; ise kuvvetin uygulandığı alan olması durumunda

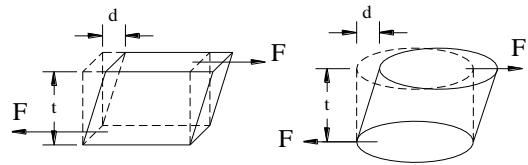
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (36)$$

olarak elde edilir. Kayma şekil değiştirmesi ise d ; lineer yer değiştirme ve t ; kauçuk bloğun kalınlığı olmak üzere

$$\gamma = \frac{d}{t} \quad (37)$$

olarak elde edilir.

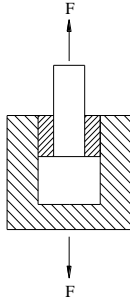
Basit kayma deneylerine olan ilgi esasen Mooney'in [68], 1940 yılında kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmesi arasında lineer bir ilişkinin olduğunu belirtmesinden sonra ortaya çıkmıştır. Hatta Mooney [69], kendisi gibi düşünmeyen ve deneysel sonuçları kendisinininkinden farklı olan araştırmacılara cevaben 1964 yılında, kayma deformasyonunda kauçuk türü malzemeler için lineer bir ilişkinin olduğunu ifade etmek için önceki çalışmasındaki deneyleri daha ayrıntılı olarak yapmıştır. Literatürde basit kayma deneylerinin iki farklı formda yapıldığını görmekteyiz. Bunlardan birincisi ikili numune (Dual Lap Shear Test) diğeri ise dörtlü numune (Quad Lap Shear Test) kullanılarak yapılan basit kayma deneyleridir. Esasen her iki durumda da oluşan deformasyon tamamen basit kayma deformasyonu değildir. Basit kayma deformasyonu oluşturabilmek için kuvvetlerin serbest yüzeylere paralel şekilde uygulanması gerekir. Pratikte kuvvetleri teorikte tanımlanan şekilde uygulamak mümkün olmadığından, genellikle, numune basit kayma ve eğilme deformasyonlarının etkisindedir. Fakat numunenin kalınlığı diğer boyutlarına göre düşük tutulmak suretiyle eğilmenin etkisi toplam deformasyona göre küçük kalır. Bu nedenle de numunenin kalınlığının diğer kenarlarına oranı 1:4'den küçük olması tavsiye edilir [81]. Aşağıda literatürde yapılan deneysel basit kayma çalışmaları incelenmiştir.



Şekil 61: Basit kayma deformasyonu.

2.3.1 İkili Numune Kullanılarak Yapılan Basit Kayma Deneyi

Literatürde yapılan basit kayma deneylerinden bir tanesi ikili numune (Dual Lap Shear Test) kullanılarak yapılan basit kayma deneyidir. Deneyde iki adet numune metal plakalar arasında yapıştırılarak eksenel yönde kuvvet uygulanır (Şekil 62). Bu deformasyon türü ise daha çok otomobil tekerlek endüstrisinde kullanılmaktadır [8]. ASTM D 945 standartlarında bu deformasyon türü için numune boyutları verilmiştir [82].

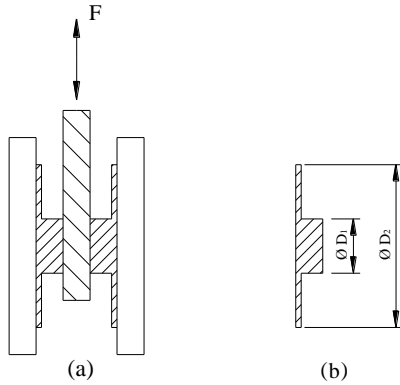


Şekil 62: İkili numune kullanarak yapılan basit kayma deformasyonu.

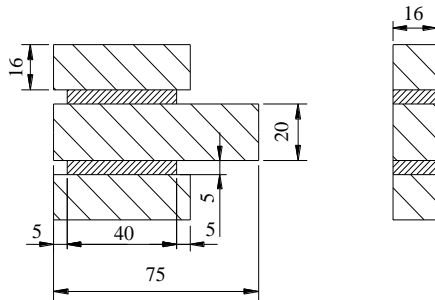
Eckert, Pechold ve Schmid [83] çalışmalarında, literatürde yapılan basit kayma deneylerinin büyük deformasyonların gerçekleştirilemediğini belirtmişlerdir. Bu nedenle silindirik H formunda numune kullanarak daha büyük deformasyonlarda deneyler yapmışlardır (Şekil 63). Dış kısmın çapını 10 mm ve kalınlığını 0.5 mm ve iç kısmın çapını 4 mm ve kalınlığını ise 0.5 mm olarak almışlardır.

Davies, De Dilip ve Thomas [18], kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemek için yapmış oldukları deneylerden bir tanesi de basit kayma deneyidir. Deneylerini Instron test cihazında ve dakikada %10 deformasyon hızında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde disk formundaki numune çelik plakalara yapıştırılmıştır. Numune boyutları olarak çapı 25 mm ve boyu 6 mm olarak alınmış ve deformasyondaki eğilme etkisi ihmal edilmiştir.

Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarında (ARDL) standart olarak yapılan deneylerden bir tanesi de ikili numune kullanarak yapılan basit kayma deneyidir. Çalışmalarda 40*16*5 [mm] boyutlarında kullanmakta olup numunenin bağlandığı metal plakalar ve boyutları Şekil 64'de verilmiştir [8].



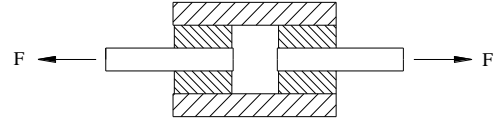
Şekil 63: Eckert, Pechold ve Schmid tarafından kullanılan (a) Tahrik sistemi (b) Numune.



Şekil 64: ARDL tarafından kullanılan numune ve tutma plakası boyutları.

2.3.2 Dörtlü Numune Kullanılarak Yapılan Basit Kayma Deneyi

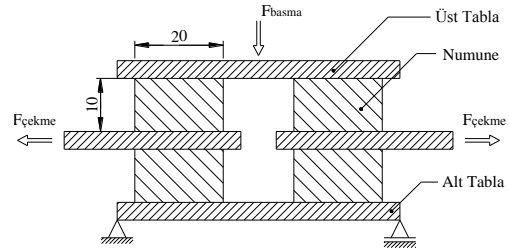
Literatürde yapılan diğer bir basit kayma deneyi ise dörtlü numune (Quad Lap Shear Test) kullanılarak yapılan basit kayma deneyidir. Deneyde dört adet numune metal plakalar arasına yapıştırılarak aksel yönde kuvvet uygulanır (Şekil 65). Bu deformasyon türü ise daha çok yataklama ile ilgili endüstrilerde kullanılmaktadır [8]. ISO 1827-2007 [84] ve BS 903 Part A14 [85] standartları bu deformasyon türü hakkında hazırlanmıştır.



Şekil 65: Dörtlü numune kullanılarak yapılan basit kayma deformasyonu.

Literatürde sınırlı sayıda olan deneysel çalışmalardan bir tanesini Yeoh [76], yapmıştır. Çalışmasında 25*25*6 [mm] boyutlarındaki numuneyi çelik elemanlara yapıştırmış ve numuneyi deforme etmiştir.

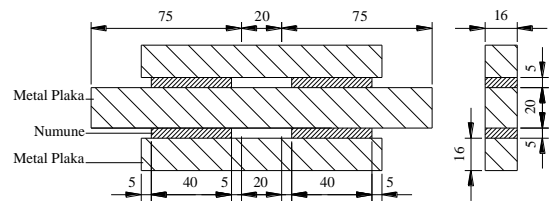
van den Bogert ve de Borst [86], tek eksenli çekme deneyinden almış olduğu malzeme sabitlerini kullanarak kauçuk türü malzemelerin, aynı anda uygulanan, basma ve kayma deformasyonunu (Şekil 66) deneysel ve sayısal olarak çözerek Mooney-Rivlin, Ogden ve Besseling malzeme modellerinin doğruluklarını incelemişlerdir. Çalışmalarında 10*20*20 [mm] boyutlarında dikdörtgen numune kullanmışlardır.



Şekil 66: van den Bogert ve de Borst tarafından yapılan basit kayma ve basma deformasyonu.

Noparatanakailas [79], BS 903 Part A14 [85] standartlarına göre 5*25*25 [mm] boyutlarında numune kullanarak kauçuk türü malzemelerin basit kayma deneyini gerçekleştirmiştir. Deneylerini 10 mm/dak çekme hızında gerçekleştirmişler ve numuneyi kullanmış oldukları malzemeye göre maksimum %25-60 oranında deforme etmişlerdir.

Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarında standart olarak yapılan deneylerden bir tanesi de dörtlü numune kullanılarak yapılan basit kayma deneyidir. Çalışmalarda 40*16*5 [mm] boyutlarında numune kullanmakta olup numunenin bağlandığı metal plakalar ve boyutları Şekil 67'de verilmiştir [8].



Şekil 67: ARDL tarafından kullanılan numune ve tutma plakası boyutları.

3 Kauçuk Mekanizminde Yapılan Homojen Olmayan Şekil Değişimine Sahip Deneyler

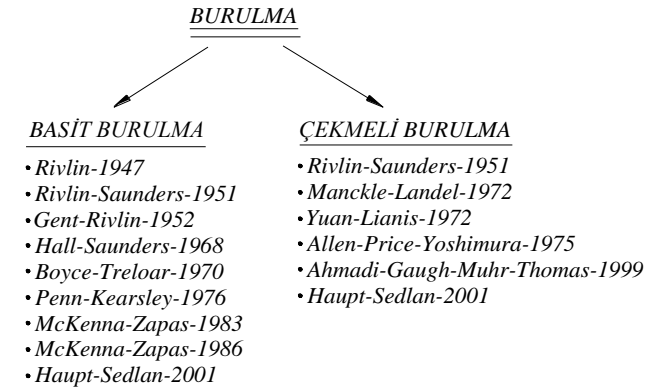
Daha önceki bölümlerde u , v , w yer değiştirme fonksiyonlarının x , y , z koordinatlarının lineer fonksiyonu olması durumunda cisimde homojen şekil değişiminin olduğu ifade edilmişti. Eğer u , v , w yer değiştirme fonksiyonları x , y , z kartezyen koordinatlarının lineer fonksiyonu değil ise bu şekil değişimine homojen olmayan şekil değiştirme denir. Bu durumda bir nokta civarındaki şekil değiştirme analizinin yapılması gerekir. Bir kirişin eğilmesi veya bir milin burulması homojen olmayan şekil değişimine örnek olarak verilebilir.

3.1 Burulma Deneyleri

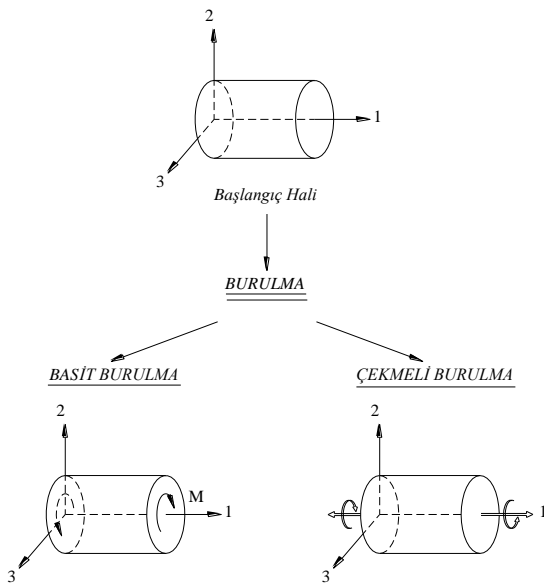
Literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan homojen olmayan deformasyonlar burulma deneyleri ile sınırlı olup literatürde burulma deneyleri

- Basit Burulma,
- Çekmeli Burulma,

olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 68 ve Şekil 69'da sırasıyla literatürde burulma deformasyonları üzerine çalışma yapan araştırmacılar ve burulma deformasyonları görülmektedir. Bu bölümde diğer bölümlerde olduğu gibi literatürde yapılan çalışmalar incelenmemiş daha sonraki bir çalışmaya bırakılmıştır.



Şekil 68: Literatürde burulma deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar.



Şekil 69: Burulma deformasyonları.

4 Sonuç

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede, literatürde, birçok farklı deneyler farklı şartlarda yapılmaktadır. Kauçuğun non-lineer bir malzeme olması, lineer davranış göstermemesi, çekme ve basma bölgelerindeki davranışının farklı olması günümüzde de halen bu malzemenin davranışlarının ve deneysel çalışmalarının incelenmesine ve araştırılmasına sebep olmaktadır. Esasen tüm bu deneysel çalışmaların amacı; kauçuk türü malzemeler için önerilen gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının doğruluğunun test edilmesidir.

Hazırlanan bu literatür çalışmasında kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesinde, literatürde, yapılan homojen şekil değişimine sahip çekme, basma ve kayma deneyleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sınıflandırılarak (Şekil 1) bu konuda çalışma yapan araştırmacılara yardımcı olunması amaçlanmıştır. Çalışmada, teorik çalışmalara mümkün olduğu kadar yer yerilmemiş daha çok konuyla ilgili deneysel çalışmalar incelenmiştir.

5 Kaynaklar

- [1] Vahapoğlu, V. and Karadeniz, S., Constitutive Equations for Isotropic Rubber-Like Materials Using Phenomenological Approach: A Bibliography (1930-2003), Rubber Chemistry and Technology, 78 (3) 489-499, 2006a.
- [2] Vahapoğlu, V., Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KTÜ, 2006b.
- [3] Gough, J., A Description of a Property of Caoutchouc, or Indian Rubber; with some Reflections on the Cause of the Elasticity of This Substance, Mem. Lit. Phil. Soc. Manchester, 1, 288-295, 1805.
- [4] Joule, J.P., On Some Thermo-Dynamic Properties and Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical and Physical Sciences, 149, 91-131, 1859.
- [5] ASTM D 412, Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomer-Tension, ASTM, Philadelphia, 1992.
- [6] DIN 53 504, Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch.
- [7] ISO 37:205, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic. Determination of Tensile Stress-Strain Properties, International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [8] Anonim, Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, MSC Software Corporation, Los Angeles, CA, 2002.
- [9] Treloar, L.R.G., Strees-Strain Data for Vulcanized Rubber Under Various Types of Deformation, Transaction of Faraday Society, 40, 59-69, 1944a.
- [10] Vahapoğlu, V., Karadeniz, S. and Yazıcı, İ., Uniaxial Test of Rubber-Like Materials, Experimental Techniques, 35 (1) 17-23, 2011.
- [11] Love, A.E.H., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Dover Publications, Fourth Edition, New York, 1944.
- [12] Rivlin, R.S. and Saunders, D.W., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII: Experiments on the Deformation of Rubber, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 243, 251-288, 1951.

- [13] Chen, T.L., and Durelli, A.J., Stress Field in a Sphere Subjected to Large Deformations, *International Journal of Solids and Structures*, 9, 1035-1052, 1973.
- [14] Haines, D.W. and Wilson, W.D., Strain-Energy Density Function for Rubber Like Materials, *Journal of the Mechanical Physical of Solids*, 27, 345-360, 1979.
- [15] Sullivan, J.L. and Demery, V.C., The Nonlinear Viscoelastic Behaviour of a Carbon-Black-Filled Elastomer, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 10, 2083-2101, 1982.
- [16] Raos, P., Modelling of Elastic Behaviour of Rubber and its Application in FEA, *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 19, 293-303, 1993.
- [17] Gregory, M.J., Measurement of Rubber Properties for Design, *Polymer Testing*, 4, 211-223, 1984.
- [18] Davies, C.K.L., Dilip, K. De, and Thomas, A.G., Characterization of the Behaviour of Rubber for Engineering Design Purposes. 1 Stress-Strain Relations, *Rubber Chemistry and Technology*, 67 (4), 716-728, 1994.
- [19] Baranwall, K., Pannikottu, A. and Seiler, J.A., Various Testing Technique Aid Development of Useful Constants, *ITEC*, 1996.
- [20] Ariano, R., Rubber Stretched by Forces in Two Directions Perpendicular to One Another, *Rubber Chemistry and Technology*, 13, 92-102, 1940.
- [21] Treloar L.R.G., Stresses and Birefringence in Rubber Subjected to General Homogeneous Strain, *Proceeding of Physics of Society*, 60 (2), 135-144, 1947.
- [22] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials I: Fundamental Concepts, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 240, 455-490, 1948a.
- [23] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials II: Some Uniqueness Theorems for Pure Homogeneous Deformation, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 240, 490-508, 1948b.
- [24] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials III: Some Simple Problems in Cylindrical Polar Co-ordinates, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 240, 509-525, 1948c.
- [25] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials IV: Further Developments of the General Theory, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 241, 379-397, 1948d.
- [26] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials V: The Problem of Flexure, *Proceeding of the Royal Society of London-Series A*, 195, 463-473, 1949a.
- [27] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VI: Further Results in the Theory of Torsion and Flexure, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 242, 173-195, 1949b.
- [28] Rivlin, R.S. and Thomas, A.G., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials III: Strain Distribution Around a Hole in a Sheet, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 243, 289-298, 1951.
- [29] Adkins, J.E., and Rivlin, R.S., Large Elastic Deformation of Isotropic Materials IX. The Deformation of Thin Shells, *Royal Society of London. Philosophical Transactions. Series A. Mathematical Physical*, 244, 505-531, 1951/52.
- [30] Becker, G.W., On the Phenomenological Description of the Nonlinear Deformation Behaviour of Rubberlike High Polymers, *Journal of Polymer Science: Part C*, 16, 2893-2903, 1967.
- [31] Arenz, R.J., Landel, R.F. and Tsuge, K., Miniature Load-Cell Instrumentation for Finite Deformation Biaxial Testing of Elastomers, *Experimental Mechanics*, 15, 114-120, 1975.
- [32] Zapas, J.L., Viscoelastic Behaviour Under Large Deformations, *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, 70A, (6), 525-532, 1966.
- [33] Klosner, J.M. and Segal, A., Mechanical Characterization of a Natural Rubber, *Polytechnic Institute of Brooklyn, Department of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, PIBAL REPORT NO. 69-42*, October, 1969.
- [34] Obata, Y., Kawabata, S. and Kawai, H., Mechanical Properties of Natural Rubber Vulcanizates in Finite Deformations, *Journal of Polymer Science : Part A-2*, 8, 903-919, 1970.
- [35] Kawabata, S. and Kawai, H., Strain Energy Density Functions of Rubber Vulcanizates From Biaxial Extension, *Advances in Polymer Science*, 24, 89-124, 1970.
- [36] Kawabata, S., Fracture and Mechanical Behaviour of Rubber-Like Polymer Under Finite Deformation in Biaxial Stress Field, *Journal of Macromolecule Science-Physics*, B8, 605-630, 1973.
- [37] Kawabata, S., Biaxial Testing of Elastomers, *Proceeding of the 1973 Symposium on Mechanical Behaviour of Materials*, August, Kyoto, Japan, 299-308, 1974.
- [38] Kawabata, S., Matsuda, M., Tei, K. and Kawai, H., Experimental Survey of the Strain Energy Density Function of Isoprene Rubber Vulcanizate, *Macromolecules*, 14, 154-162, 1981.
- [39] Matsuda, M., Kawabata, S. and Kawai, H., Quantitative Analysis of the Strain Energy Density Function for cis-1,4-Polyisoprene Rubber Vulcanizate, *Macromolecules*, 14, 1688-1692, 1981.
- [40] San Miguel, A., An Automated Biaxial Sheet Tester, *Experimental Mechanics*, 12 (3), 155-157, 1972.
- [41] Durelli, A.J. and Parks, V.J., Natural Stress, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 4, 7-16, 1969.
- [42] James, A.G., Green, A. and Simpson, G.M., Strain Energy Functions of Rubber I: Characterization of Gum Vulcanizates, *Journal of Applied Polymer Science*, 19, 2033-2058, 1975.
- [43] James, A.G. and Green, A., Strain Energy Functions of Rubber II: Characterizations of Filled Vulcanizates, *Journal of Applied Polymer Science*, 19, 2319-2330, 1975.
- [44] Jones, D.F. and Treloar, L.R.G., The Properties of Rubber in Pure Homogeneous Strain, *Journal of Physics, D: Applied Physics*, 8, 1285-1304, 1975.
- [45] Chow, C.L. and Cundiff, C.H., On the Characterization of Mechanical Properties of Rubber Vulcanizates, *Tire Science and Technology*, 15 (2), 73-96, 1987.
- [46] Ortt, E.M., Doss, D.J., Legall, E., Wright, N.T., ve Humphrey, J.D., A Device for Evaluating the Multiaxial Finite Strain Thermomechanical Behaviour of Elastomers and Soft Tissues, *Journal of Applied Mechanics*, 67 (3), 465-471, 2000.
- [47] Boonstra, B.B.S.T., Stress-Strain Properties of Natural Rubber Under Biaxial Strain, *Journal of Applied Physics*, 21, 1098-1104, 1950.

- [48] Treloar, L.R.G., Strains in an Inflated Rubber Sheet and the Mechanism of Bursting, *Rubber Chemistry and Technology*, 17, 957-967, 1944b.
- [49] Hoppmann, W.H. and Wan, L., Large Deformation of Elastic Tubes, *Journal of Biomechanics*, 3, 593-600, 1970.
- [50] Alexander, H., Tensile Instability of Initially Spherical Balloons, *International Journal of Engineering Science*, 9, 151-162, 1971a.
- [51] Alexander, H., The Tensile Instability of an Inflated Cylindrical Membrane as Effected by an Axial Load, *International Journal of Mechanical Science*, 13, 87-95, 1971b.
- [52] Alexander, H., Constitutive Relation for Rubber-Like Materials, *International Journal of Engineering Science*, 6, 549-563, 1968.
- [53] Vangerko, H. and Treloar, L.R.G., The Inflation of Rubber Tube for Biaxial Strain Studies, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 11, 1969-1978, 1978.
- [54] Anonim, Compression or Biaxial Extension?, Axel Products Testing and Analysis Report, Ann Arbor, Michigan, 2000.
- [55] Blatz, P.J. and Ko, W.L., Application of Finite Elastic Theory to the Deformation of Rubbery Materials, *Transactions of the Faraday Society*, 6, 223-251, 1962.
- [56] Blatz, P.J., Application of Finite Elastic Theory to the Behaviour of Rubberlike Materials, *Rubber Chemistry and Technology*, 36, 1459-1496, 1963.
- [57] McGuirt, C.W. and Lianis, G., Constitutive Equations for Viscoelastic Solids Under Finite Uniaxial and Biaxial Deformations, *Transactions of the Society of Rheology*, 14 (2), 117-134, 1970.
- [58] Vahapoğlu, V., Kauçuk Türü Malzemelerin Malzeme Sabitlerinin Eş-İki Eksenli Çekme Deneyi ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KTÜ, 1998.
- [59] Day, J. and Miller, K., Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of Experimental Technique, ABAQUS 2000 User's Conference Proceeding, Newport, Rhode Island, May 30 - June 2, 205-220, 2000.
- [60] Flint, C.F. and Naunton, J.S., Physical Testing of Latex Films, *Rubber Chemistry and Technology*, 10, 584-614, 1937.
- [61] Dickie, R.A. and Smith, T.L., Ultimate Tensile Properties of Elastomers. VI. Strength and Extensibility of a Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizate in Equal Biaxial Tension, *Journal of Polymer Science: Part A-2: Polymer Physics Edition*, 7, 687-707, 1969.
- [62] Merritt, D.R. and Weinhaus, F., The Pressure Curve for a Rubber Balloon, *American Journal of Physics*, 46 (10), 976-977, 1978.
- [63] James, H.M. and Guth, E., Theory of Elastic Properties of Rubber, *The Journal of Chemical Physics*, 11 (10), 455-481, 1943.
- [64] Johnson, M.A. and Beatty, M.F., The Mullins Effect in Equibiaxial Extension and its Influence on the Inflation of a Balloon, *International Journal of Engineering Science*, 33 (2), 223-245, 1945.
- [65] Johannknecht, R. and Jerrams, S.J., The Need for Equibiaxial Testing to Determine Elastomeric Material Properties, Proceeding of the First European Conference on Constitutive Models for Rubber, Vienna, Austria, 9-10 September, Ed. Dorfman A., and Muhr, A. 73-76, 1999.
- [66] Fukahari, Y. and Seki, S., Molecular Behaviour of Elastomeric Materials Under Large Deformation-I: Re-Evaluation of the Mooney-Rivlin Plot, *Polymer*, 33 (3), 502-508, 1999.
- [67] Takigawa, T., Yamasaki, S., Urayama, K., Takahashi, M., and Masuda, T., Stress-Strain Behaviour of Segmented Polyurethaneureas Under Pure Shear Deformation, *Rheologica Acta*, 35, 288-295, 1996.
- [68] Mooney, M., A Theory of Large Elastic Deformation, *Journal of Applied Physics*, 11, 582-592, 1940.
- [69] Mooney, M., Stress-Strain Curves of Rubbers in Simple Shear, *Journal of Applied Physics*, 35, 23-26, 1964.
- [70] Smith, T.L., and Frederick, J.E., Viscoelastic Properties of a Styrene-Butadiene Vulcanizate in Large Biaxial and Simple Tensile Deformations, *Transactions of the Society of Rheology*, 12 (3), 363-396, 1968.
- [71] ASTM D 575, Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression, ASTM, Philadelphia, 1991.
- [72] Forster, M.J., Unilateral Compression of Rubber, *Journal of Applied Physics*, 26 (9), 1104-1106, 1955.
- [73] Lindley, P.B., Load-Compression Relationships of Rubber Units, *Journal of Strain Analysis*, 1 (3), 190-195, 1966.
- [74] McKenna, G.B., and Zapas, L.J., Experiments on the Small-Strain Behaviour of Crosslinked Natural Rubber: 2. Extension and Compression, *Polymer*, 24 (11), 1495-1501, 1983.
- [75] Yeoh, O.H., A Method for the Routine Determination of Compression Modulus of Rubber Vulcanizates, *Polymer Testing*, 7, 121-136, 1987.
- [76] Yeoh, O.H., Characterization of Elastic Properties of Carbon-Black Filled Rubber Vulcanizates, *Rubber Chemistry and Technology*, 63 (5), 792-805, 1990.
- [77] Arruda, E.M., and Boyce, M.C., A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behaviour of Rubber Elastic Materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41 (2), 389-412, 1993.
- [78] Gough, J., Muhr, A.H., and Thomas, A.G., Material Characterization for Finite Element Analysis of Rubber Components, *Journal of Rubber Research*, 1 (4), 222-239, 1998.
- [79] Noparanakailas, V., Vulcanized Rubber Characterization for Finite Element Analysis, *Journal of Rubber Research*, 3 (4), 222-231, 2000.
- [80] Rivlin, R.S., Large Elastic Deformation, in *Rheology: Theory and Applications*, Ed.: Eirich, F.R., Volume-I, Chapter-10, Academic Press, Newyork, 1956, 351-385.
- [81] Gent, A.N., *Engineering with Rubber*, Hanser Publishers, Munich, 1992.
- [82] ASTM D 945, Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression or Shear (Mechanical Oscillograph), ASTM, Philadelphia, 1992.
- [83] Eckert, G., Pechhold, W. and Schmid, M., On the Interrelation of Rubber Elastic Stress-Strain Curves Under Different Types of Strain, *Polymer Engineering and Science*, 32 (17), 1213-1216, 1992.
- [84] ISO 1827-2007, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Shear Modulus and Adhesion to Rigid Plates-Quadruple-Shear Methods, International Organization for Standardization, Geneva, 2007.
- [85] BS 903: Part A14: 1970, Methods of Testing Vulcanized Rubber. Determination of Modulus in Shear of Rubber (Bonded Quadruple Shear Test Piece), British Standards Institution, 1970.
- [86] Van den Bogert, P.A.J. and Borst, R. de, On the Behaviour of Rubberlike Materials in Compression and Shear, *Archieve of Applied Mechanics*, 64, 136-146, 1994.