

**Kemal Çalışkan**  
Mak. Yük. Müh.

**İlhan Konukseven**  
Y. Doç. Dr.

**Y. Samim Ünlüsoy**  
Prof. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü  
06531 ANKARA

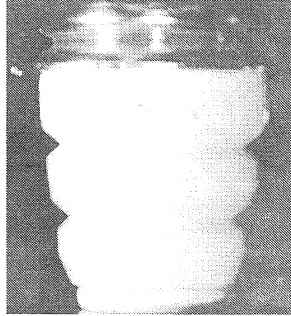
# Elastik Süspansiyon Tamponları için Bilgisayar Destekli Tasarım Yöntemi

*Bu çalışmada, gözenekli elastomerden üretilen süspansiyon tamponları için sonlu elemanlar analizinin etkin biçimde kullanıldığı bir tasarım yöntemi sunulmaktadır. Tampon tasarımında amaç, tampondan istenen bir yük-yol eğrisi elde etmek üzere tampon ve kapak şekilleri ile tampon malzemesinin belirlenmesidir. Kullanılan elastomer malzemenin hiperelastik özellikleri ve tamponun maruz kaldığı yüksek deformasyon nedeniyle bilgisayar ortamında gerçekleştirilen tasarım analizlerinde zorluklar yaşanmaktadır. Bilgisayar ortamında tasarımların gerçeğe yakın modellerinin elde edilebilmesi için; malzeme testlerinin yapılması, malzeme testi sonuçları kullanılarak matematiksel malzeme modeli katsayılarının bulunması, katsayıların gerçek parçalar üzerinde yapılacak deneylerle doğrulanması ve doğrulanan katsayıları kullanarak tamponun sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.*

*Anahtar Kelimeler: Süspansiyon tamponları, Elastomer, Hiperelastik, Sonlu elemanlar analizi, Malzeme testi*

## GİRİŞ

Süspansiyon tamponları, bozuk yol yüzeylerinde tekerleklerin aşırı yer değiştirmesi durumunda süspansiyon yayına yardımcı olarak süspansiyon elemanları ile araç şasisinin çarpışmasını engelleyen parçalardır (Şekil-1).



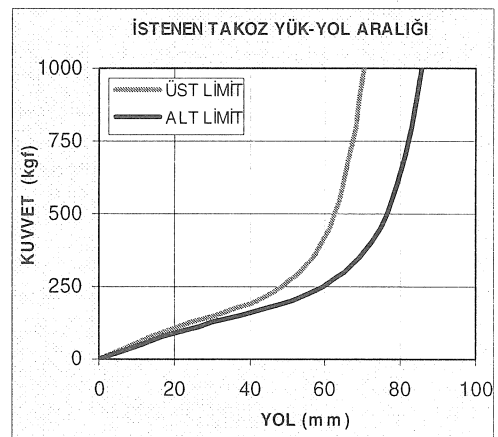
Şekil 1 - Süspansiyon tamponu

Süspansiyon tamponları belirli bir yük-yol eğrisini verecek şekilde tasarlanmaktadır. Süspansiyon tamponunun geleneksel deneme-yenilme yöntemiyle tasarımı, tasarım süresi, maliyeti ve başarısı konusunda olumsuzluklar yaratmaktadır. Tasarım sürecinde yaşanan bu olumsuzlukları en aza indirmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilecek bilgisayar destekli tasarım analizlerinden yararlanılmasının gerekli olduğu görülmektedir. Ancak, tampon üretiminde kullanılan elastomer malzemenin hiperelastik özellikte olması ve tamponun maruz kaldığı deformasyon miktarının çok yüksek olması, tamponun sonlu elemanlar analizini zorlaştıran hususlardır.

Bu makalede, süspansiyon tamponunun sonlu elemanlar analizini gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde gerçekleştirmek için yapılan çalışmalar aktarılmaktadır. Tamponun sonlu elemanlar analizleri için Msc.MARC/MENTAT [1] programı kullanılmıştır.

## TASARIMIN AMACI VE TASARIM PARAMETRELERİ

Süspansiyon tamponu tasarımında amaç, yük-yol eğrisi Şekil-2'de örneği verilen alt ve üst limitler arasında yer alan bir tampon geliştirmektir. İstenen yük-yol eğrisini elde etmek için değiştirilebilecek tasarım parametreleri tamponun ve alt-üst kapakların şekilleri ile tampon üretiminde kullanılacak malzemenin yoğunluğudur. Bu çalışmada gerçekleştirilen tampon tasarımına, alt ve üst kapakların dayanım analizleri ile tamponun yorulma analizi dahil edilmemiştir.

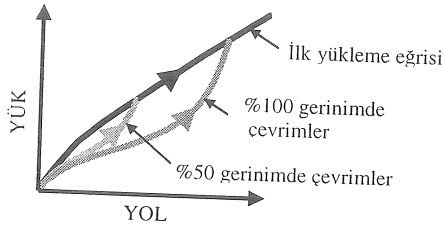


Şekil 2 - Yük-yol eğrilerinin alt ve üst limitlerini belirten tipik bir örnek

## HİPERELASTİK MALZEME MODELLERİ

Hiperelastik elastomerlerin kendine özgü bazı mekanik özellikleri vardır:

- Elastik gerinim limitleri oldukça yüksektir.
- Gerilme-gerinim ilişkisi doğrusal değildir.
- Bazı elastomerler hemen hiç sıkışmazken bazıları çok fazla sıkışabilmektedirler.
- Hiperelastik elastomerlerin yük altındaki davranışları yüklemenin yönü, hızı ve büyüklüğü (Şekil-3), daha önce maruz kalınan yüklemelerin sayısı ve büyüklüğü ve ortam sıcaklığı gibi bir çok faktörden etkilenmektedir [2].



Şekil 3 - Yük miktarının yük-yol eğrisi üzerindeki etkisi

Hiperelastik malzemelerinin elastikiyet özelliklerinin açıklanmasına yönelik birçok matematiksel model bulunmaktadır. Bu modeller temel olarak gerilme-gerinim ilişkisini malzemeye özel katsayılar içeren Gerinim Enerjisi Fonksiyonu (Strain Energy Function) yardımıyla ifade etmektedir. Bu fonksiyonun esneme oranına göre türevi alındığında mühendislik gerilmesini vermektedir. Literatürde varolan matematiksel hiperelastik malzeme modelleri, hacim sabitliğine dayanan ve hacimsel sıkıştırılabilirliğe izin veren modeller olarak iki gruba ayrılabilir. Hacimsel sıkıştırılabilirliğe izin veren iki model ve bu modellere ait gerinim enerjisi fonksiyonları aşağıda verilmiştir [3].

### i. Ogden Modeli

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[ J^{-\frac{\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] + 4.5K(J^{1/3} - 1)^2$$

### ii. Ogden Köpük Modeli

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - J^{\beta_n})$$

W: Gerinim enerjisi

N: Model derecesi

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ : Asal esneme oranları

J =  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ : Hacim oranı

K: Bulk modülü

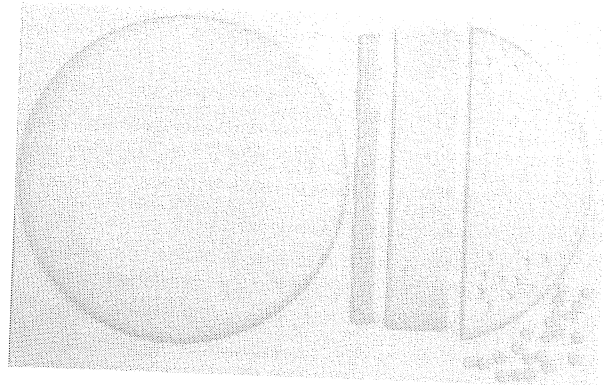
$\mu_n, \alpha_n, \beta_n$ : Malzeme katsayıları

Süspansiyon tamponu gözenekli elastomer malzemeden imal edilmektedir ve yüksek oranda sıkıştırılabilir özelliktedir. Bu nedenle, analizler için yalnız küçük hacim değişimlerine izin veren Ogden modeli yerine "hyperfoam model" olarak da adlandırılan Ogden Köpük modelinin kullanılması uygun bulunmuştur.

Uygun matematiksel malzeme modelini tespit ettikten sonra, elastik tampon tasarımının en zor aşaması olan malzemeye ait model katsayılarının ( $\mu_n, \alpha_n, \beta_n$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Üretimle ilgili bir çok faktör elastomerlerin mekanik özellikleri üzerine etkili olmaktadır. Kullanılan karışım, malzemenin yoğunluğu, pişirme süresi, soğuma süresi vs. gibi birçok etken malzeme özellikleri üzerinde yüksek etkiye sahiptir. Bu nedenle, literatürde elastomerlere ait matematiksel malzeme model katsayıları kolay bulunmamaktadır. Herhangi bir elastomer malzemenin malzeme katsayılarının temini için malzemenin belirli deformasyonlar altında davranışı deneysel olarak incelenmeli ve eğri uydurma (curve fitting) uygulamaları ile aynı davranışı matematiksel olarak simgeleyecek katsayılar tespit edilmelidir. Bu çalışmada, belirli bir yoğunluktaki gözenekli elastomer için malzeme model katsayıları tespit edilmiştir.

## MATEMATİKSEL MODEL KATSAYILARININ TEMİNİ İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN TESTLER

Malzeme testlerinde kullanılacak tüm numunelerinin aynı levhalardan kesilerek çıkarılması ve numunelerin döküm yüzeylerinden uzak noktalardan alınması gerekmektedir [4]. Bu çalışmada kullanılan numuneler 2mm kalınlığında 150mm çapında dairesel levhalardan çıkartılmıştır (Şekil-4). Dairesel levhalar tornada hazırlandığı için numunelerin döküm yüzeylerinden uzak noktalardan alınması koşulu sağlanmıştır.



Şekil 4 - Dairesel levhalardan çıkarılan deney numuneleri

Malzeme testleri ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 20kN kapasiteli Zwick Z020 test cihazında yapılmıştır.

Malzeme deneyleri yapılırken şu noktalara dikkat edilmiştir:

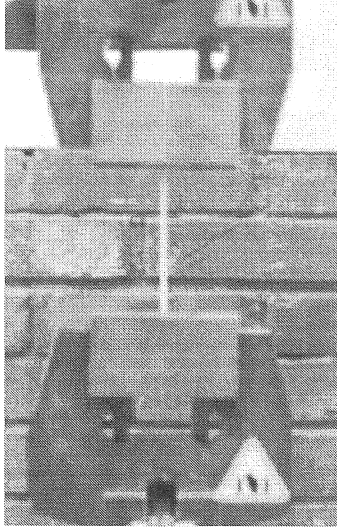
- Yükleme gerçek tamponun test edileceği hızlarda yapılmıştır.

- Yükleme miktarlarına gerçek tamponun maruz kalacağı gerinim büyüklükleri düşünülerek karar verilmiştir.

- Yükleme dört çevrim halinde yapılmış ve deney verisi olarak dördüncü çevrime ait yükleme eğrisi alınmıştır. Bunun nedeni yükleme eğrilerinin dört çevrimde yeterli kararlılığa ulaşması ve gerçek tamponun dördüncü çevrimde test edilecek olmasıdır.

#### *i. Tek Eksenli Çekme Testi*

Bu test için, numuneyi tutan çeneler arasında kalan numune boyu, enin 10 katından büyük olmalıdır [3]. 120mm x 6mm x 2mm boyutlarında bir numune kullanılarak ve çeneler arasında 80mm mesafe bırakarak bu koşul sağlanmıştır (Şekil-5).



Şekil 5 – Basit çekme testi



Şekil 6 - Çekme testi numunesi

Çekme gerinimi video görüntüleri kullanılarak numunenin çenelerden uzak orta noktalarında yapılmış işaretlemeler (Şekil-6) arasındaki mesafenin değişimi ile ölçülmüştür. Aynı şekilde numunenin en ve kalınlığındaki değişim yakın çekim video görüntüleri ile kaydedilmiştir ve görüntülerin bilgisayar ortamında işlenmesiyle alan değişimi bilgisi elde edilmiştir.

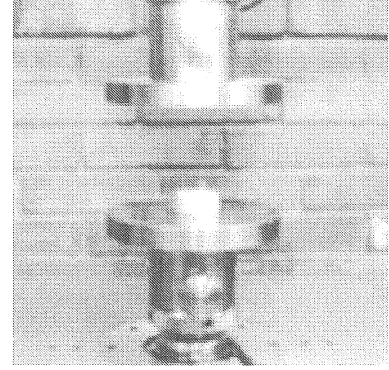
#### *ii. Tek Eksenli Basma Testi*

Tek eksenli basma testi, 28.6mm çapında 12.5mm yüksekliğinde [9] silindirik bir düğmenin

**MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ**

iki yatay düzlem arasında ezilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Bu test ile elde edilmek istenen gerinim durumu yalın tek eksenli basma gerinimidir. Fakat numune ile yüzeyler arasındaki sürtünme nedeniyle malzeme üzerinde kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Sıkıştırılabilir malzemelerde ise yanal genişleme çok fazla olmayacağı için sürtünme daha az etki yaratmaktadır. Sürtünme etkisini azaltmak amacıyla temas yüzeyleri yağlanmıştır.

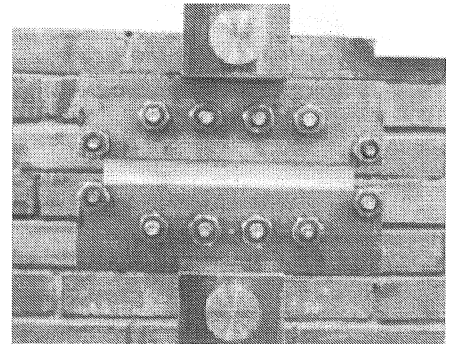


Şekil 7 - Tek eksenli basma testi

Tek eksenli basma testi ile ilgili başka bir dezavantaj ise düğme şeklindeki numunenin diğer numunelerle aynı levhadan kesilemiyor olmasıdır. Bu testte kullanılan parçanın yoğunluk ve üretim şekliyle ilgili farklılıklar nedeniyle diğer testlerde kullanılan malzemeye göre kısmen farklı bir malzeme test edilmektedir. Tüm bu dezavantajlar nedeniyle, özellikle sıkıştırılabilirliği az olan malzemeler için basma testi yerine iki eksenli çekme testi tercih edilebilir. Ancak, bu testin yapılabilmesi için özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır [5].

#### *iii. Düzlemsel Kayma Testi*

Bu test için numunenin eni, çekme makinesinin çeneleri arasında kalan numune boyunun 10 katından büyük olmalıdır [7]. Bu çalışmada 150mm x 35mm x 2mm boyutlarında bir numune kullanılarak ve çeneler arasında 15 mm mesafe bırakarak bu koşul sağlanmıştır (Şekil-8).



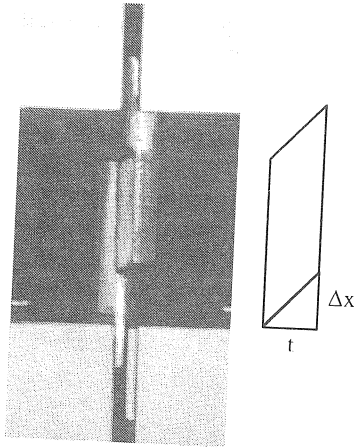
Şekil 8 - Düzlemsel kayma testi

Şekil 9 - Düzlemsel kayma numunesi

İlk bakışta basit çekme testinin geniş bir plakayla uygulanmış hali olarak görülen bu testte, parça eninin boyuna göre çok daha uzun olması nedeni ile yük altında numunenin eninde ihmal edilebilecek kadar çok küçük bir değişim olmaktadır. Buna bağlı olarak numune üzerinde yalın kayma gerinimi oluşmaktadır [5]. Gerinim ölçümü için orta kısımda yapılmış işaretlemeler (Şekil-9) arası mesafenin değişimi video ile kaydedilmiş ve gerekli ölçümler bu video görüntüleri üzerinden alınmıştır.

#### iv. Basit Kayma Testi

Bu test, iki paralel yüzey arasına 30mm x 25mm x 4mm boyutlarında bir numunenin yapıştırılması ve yüzeylerin birbirine yaklaştırılmadan hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

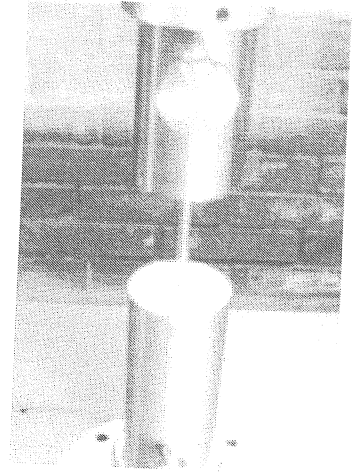


Şekil 10 - Basit kayma testi ve numunedeki meydana gelen deformasyon

Gerinim ve gerilme değerleri test cihazı üzerinden okunan kuvvet ve yer değiştirme bilgileri kullanılarak elde edilmiştir.

#### v. Hacim Sıkıştırma Testi

Hacimsel sıkıştırma testi, hacimsel genişlemenin büyük oranda engellendiği uygulamalarda basınç-hacim ilişkisinin bulunmasında kullanılır. Test, 6mm çapında ve 2mm yüksekliğinde 18 adet yuvarlak parçanın bir delik içerisine yerleştirilip sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sürtünmenin sonuca etkisini azaltmak için parçalar arasında ve yüzeylerinde yağlama yapılmıştır.



Şekil 11 - Hacim testi

### MALZEME TEST SONUÇLARINDAN MODEL KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ

Malzeme modeli katsayılarının elde edilmesi için ilk olarak deneylerden alınan dördüncü çevrime ait yükleme eğrileri üzerine sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmalıdır [3]:

i. Kalıcı deformasyonla oluşan gerinim miktarı ( $\epsilon_{offset}$ ) kaydedilir ve bu miktar tüm gerinim değerlerinden çıkartılır.

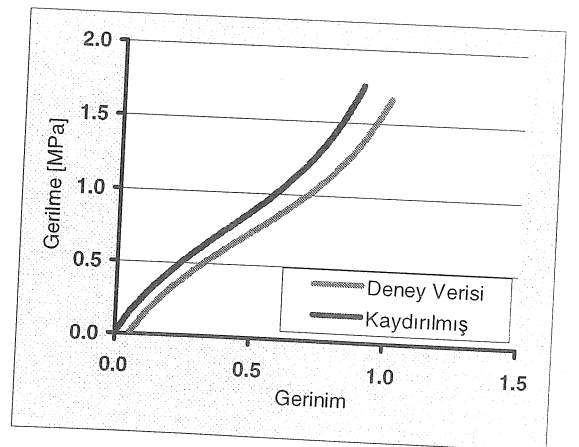
ii. Kalıcı gerinim nedeniyle ölçek uzunluğunda meydana gelen değişim göz önüne alınarak tüm gerinimler ( $1 + \epsilon_{offset}$ ) değerine bölünür.

$$\epsilon = (\epsilon' - \epsilon_{offset}) / (1 + \epsilon_{offset})$$

Kesit alanındaki değişim göz önüne alınarak tüm gerilmeler ( $1 + \epsilon_{offset}$ ) değeriyle çarpılır.

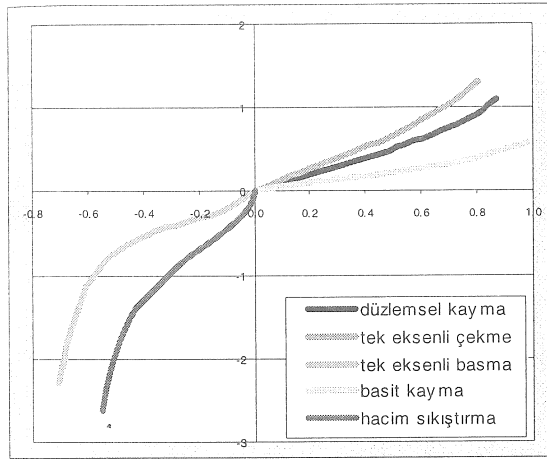
$$\sigma = \sigma' (1 + \epsilon_{offset})$$

iii. Gerilme değeri sıfıra çok yakın olmasına rağmen halen tam sıfır noktasında olmayabilir. Grafik aradaki fark kadar kaydırılarak eğrinin sıfır gerilme-sıfır gerinim noktasından geçmesi sağlanır.



Şekil 12 - Çekme testi dördüncü çevrimine ait yükleme eğrisi ve bu eğrinin kaydırma işlemi sonrası durumu

Bu çalışma kapsamında yapılmış olan 5 deneye ait gerilme gerinim eğrileri Şekil-13'te verilmiştir.



Şekil 13 – Malzeme testi sonuçları

Kaydırma işleminin ardından, eğrilere ait veriler içinden, grafiğin genel formunu yeterli düzeyde temsil edecek şekilde, mümkün olan en az sayıda veri noktası seçilmelidir.

Buna ek olarak hacim testi verisinin kullanımı ile ilgili olarak Msc.Marc/Mentat programında tanımlandığı şekilde gerinim değerleri üçe bölünmüştür [3].

Malzeme model katsayılarının hesabı için deney sonuçlarının işlenmesiyle elde edilen veri noktaları kullanılarak eğri uydurma işlemi yapılmalıdır. Bu konuda Msc.Marc/Mentat programından yararlanılmıştır. Program "downhill-simplex" metodunu kullanarak girilen deney eğrileriyle çıkışacak malzeme model katsayılarını hesaplamaktadır.

Eğri uydurma işlemi tamamen matematiksel bir yaklaşım olduğu için ortaya çıkan malzeme modelinin gerçek malzemeyi tüm deformasyon türleri ve büyüklükleri için tam olarak temsil etmesi beklenemez [7]. Bu nedenle eğri uydurma sonucu ortaya çıkan malzeme modeliyle ilgili aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir :

- Malzeme modeli Drucker Kararlılık Kuralı'nı [8] ihlal etmemelidir. Bu kural, analizde kullanılacak kararlı bir malzeme modelinin tüm deformasyon türlerinde  $d\sigma \cdot d\epsilon > 0$  bağıntısını sağlanması gerektiğini, yani gerilme-gerinim grafiğinde yerel maksimum veya minimumlar bulunmaması gerektiğini ifade eder.

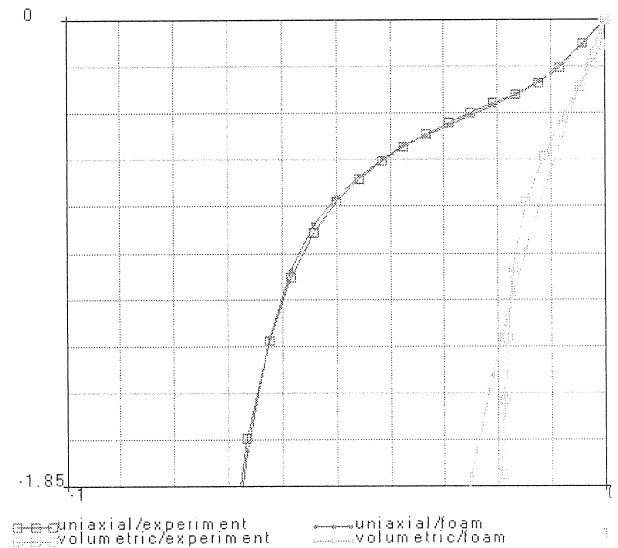
- Model, deney verisi girilen gerinim aralığının dışında ve deney verisi girilmemiş deformasyon türlerinde de kabul edilebilir davranış sergilememelidir.

Malzeme modeli olarak, tampon üretiminde kullanılan gözenekli elastomerin sıkışabilirlik özelliğini modelleyebilecek FOAM modeli tercih edilmiştir. Yük-yol eğrisindeki kıvrımları yakalayabilmek amacıyla üçüncü dereceden (N=3) bir model kullanılmıştır. Uygun bir malzeme modeli elde etmek için eğri uydurma işlemi çeşitli veri kombinasyonları kullanılarak tekrarlanmış ve ortaya çıkan katsayılar kullanılarak tamponun sonlu elemanlar analizleri tekrarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda şu iki önemli sonuca ulaşılmıştır:

- Basma ve hacim sıkıştırma testleriyle en iyi örtüşmenin yakalandığı durumlarda tampon analiz sonuçlarındaki başarı artmaktadır. Yani sözkonusu uygulama için en önemli deney sonuçları bu testlerden elde edilmektedir.

- Eğri uydurma işleminde diğer deney sonuçlarının da kullanıldığı durumlarda basma testi ve hacim testi deneysel sonuçlarıyla örtüşme azalmaktadır.

Bu nedenle, tampon analizi için malzeme modeli oluşturulmasında, öncelikle basma ve hacim sıkıştırma testleri kullanılmıştır. Eğri uydurma işlemi sonucu elde edilen malzeme modelinin basma ve hacim sıkıştırma deformasyonlarındaki davranışı aşağıdaki gibidir.

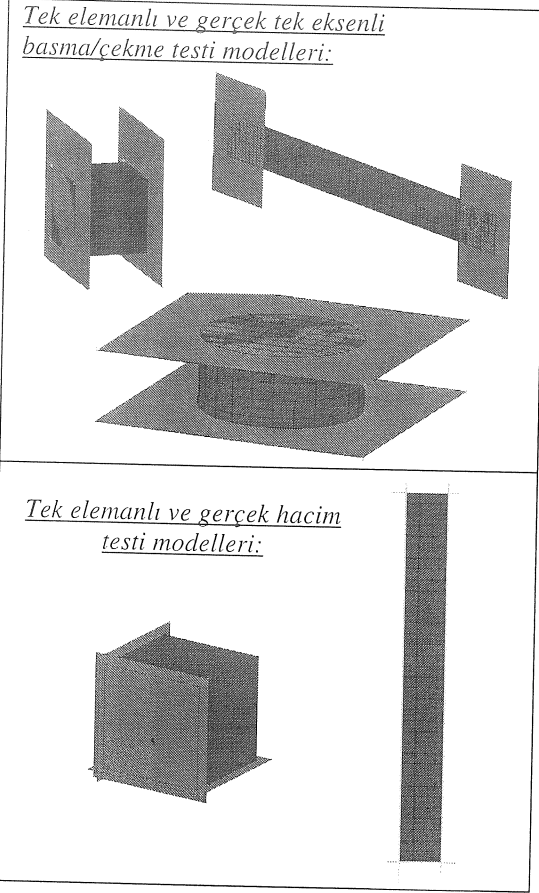


Şekil 14 - Malzeme modelinin kullanılan deformasyon modlarında davranışı

#### 4.2.2 Katsayıların Deney-Analiz Karşılaştırmaları ile Sınanması

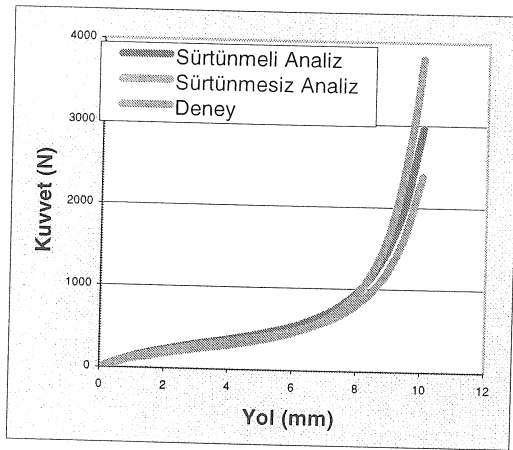
Elde edilen malzeme modeli katsayıları uygulanan malzeme testlerinin tek elemanlı ve gerçek deney sonlu eleman modelleriyle doğrulanmalıdır. Gerçek deneyler aşağıda şekilleri verilen sonlu eleman modelleri tek elemanlı ve tam ölçekli olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Eğri uydurma işlemi yalnız düğme basma ve hacim testleriyle yapıldığı için diğer deneyler için çok yakın sonuçlar

elde etmek mümkün değildir. Çekme ve kayma deneyleri için yapılan analizlerde deney sonuçlarından daha yüksek gerilmeler elde edilmiştir. Deneylerin sonlu elemanlar analizleri için kullanılan sonlu eleman modelleri şunlardır:

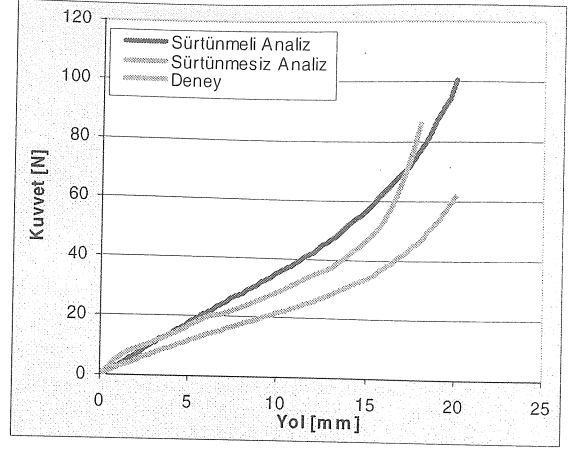


Şekil 15 - Deneylerin sonlu eleman modelleri

Basma ve hacim testlerinin sonlu elemanlar analizleri ile deney sonuçlarının karşılaştırması aşağıda verilmiştir:



Şekil 16 - Basma testi analiz ve deney sonuçları



Şekil 17 - Hacim testi analiz ve deney sonuçları

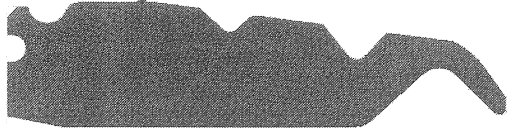
Her iki deneyde de sürtünme etkisi göz önüne alınarak yapılan sonlu eleman analizlerinin deney sonuçlarına daha yakın olduğu Şekil 16 ve 17'de görülmektedir. Sürtünme özellikle hacim sıkıştırma deneyinde sonuçları önemli oranda etkilemektedir. Eğri çakıştırma işleminde kullanılacak deney verilerinde ise sürtünme etkisi bulunmaması gerekmektedir. Bunu sağlamak için iki farklı yol izlenebilir. İlk olarak deneylerdeki sürtünme etkisi ortadan kaldırmak amacıyla, basma testi yerine aynı deformasyonu sağlayan çift eksenli çekme testi kullanılabilir [6]. Hacim testinde sürtünme etkisinden kurtulmak içinse hidrostatik hacim testi tercih edilmelidir [3]. Fakat bu testler için özel aparatlar ve ölçüm cihazları gerekmektedir. İkinci ve daha kolay olan yöntem ise sürtünme etkisini sonlu eleman analizleri ile tahmin ederek deney sonuçlarından çıkartmaktır. Bu çalışmada ikinci yöntem tercih edilmiştir.

Şekil 16 ve 17 incelendiğinde sürtüneli ve sürtünmesiz sonlu eleman analizleri arasında basma testinde yaklaşık %10, hacim testinde ise yaklaşık %40 oranında sürtünme etkisi görülmektedir. Bu saptamaların ışığında, eğri uydurma işleminde deney verilerindeki gerilme değerleri belirtilen oranlarda azaltılarak kullanılmıştır.

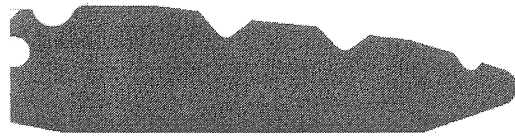
#### ANALİZ SONUÇLARININ PROTOTİPLER ÜZERİNDE DOĞRULANMASI

Gerçek parça testleri, malzeme testlerinde kullanılan malzeme ile aynı yoğunlukta malzemeden dökülmüş olan iki tampon üzerinde yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde eksenel simetrik modeller ile çözüm yapılmıştır. Tamponun sonlu elemanlar ağı üç düğüm noktalı üçgen elemanlarla örülmüştür. Alt ve üst kapaklar rijit gövdeler olarak modellenmişlerdir. Büyük deformasyonlar sonucu sonlu elemanlar ağında meydana gelen bozulmalar nedeniyle ağın belirli aralıklarla ve eleman şekillerindeki bozulma oranına bağlı olarak yeniden örülmesi özelliği (global remeshing) etkin kılınmıştır. Sürtünme modeli olarak

Msc.Marc/Mentat programı içinde bulunan göreceli yer değiştirmeyi (relative displacement) kullanan Coulumb sürtünme modeli kullanılmıştır. Bazı basit testler, benzer çalışmalar ve yapılan analizler neticesinde sürtünme katsayısı olarak tamponla kapaklar arasında 0.4, tamponun kendi kendine temas eden yüzeyleri arasında 0.7 değerlerin kullanılması öngörülmüştür.

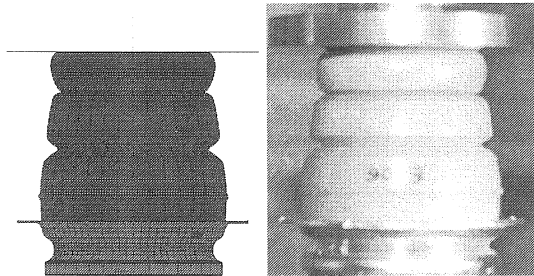


Şekil18 - Tampon A için FEA modeli

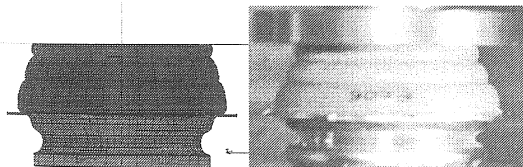


Şekil19 - Tampon B için FEA modeli

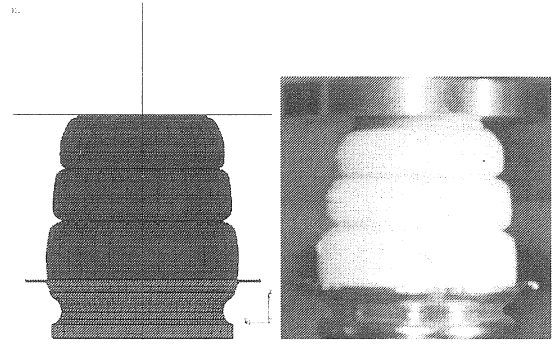
*i. Deformasyon Şekillerinin Karşılaştırılması*



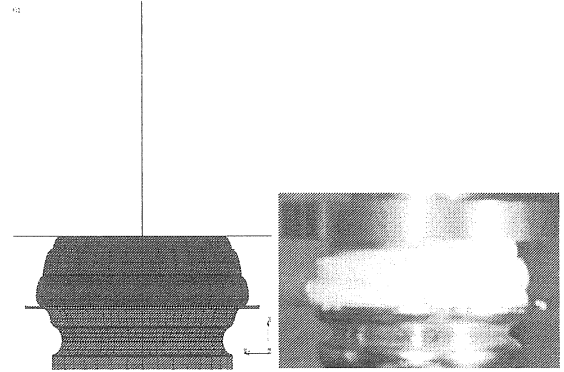
Şekil 20 - Tampon A 40mm deformasyon



Şekil 21 - Tampon A 70mm deformasyon

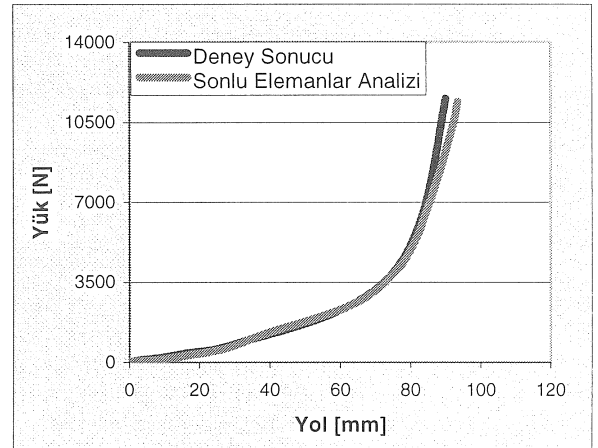


Şekil 22 - Tampon B 40mm deformasyon

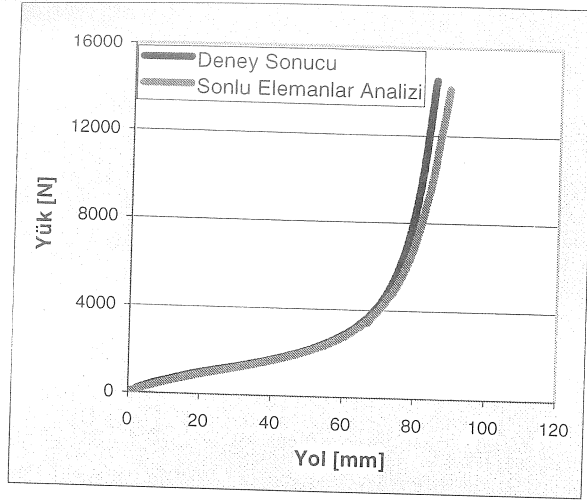


Şekil 23 - Tampon A 80mm deformasyon

*ii. Yük-Yol Eğrilerinin Karşılaştırılması*



Şekil 24 - Tampon A için analiz ve deney sonuçları



Şekil 25 - Tampon B için analiz ve deney sonuçları

### iii. Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 20-25'in incelenmesi sonucunda aşağıda sonuçlara ulaşılmıştır:

- Her iki tamponun sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile gerçek deneylerden elde edilen sonuçlar arasında gerek deformasyon şekilleri gerek yük-yol eğrileri açısından yeterli uyum sağlanmıştır.
- Yalnızca tek eksenli basma ve hacim sıkıştırma testlerinden elde edilen sonuçlar tampon malzemesinin matematik modelini oluşturmada önemli ölçüde etkili olmuştur.
- Her iki analizde de oluşan hatanın karakteristiği aynıdır. Yük-yol eğrisinin son bölümde yaptığı yükseliş gerçekte olduğundan biraz daha geç yakalanmaktadır. Hata karakteristiğinin her iki durum için aynı olması, yapılacak düzeltmelerle herhangi bir parça için hatanın giderilmesi durumunda diğer parçalar içinde doğru sonuçlar alınacağını göstermektedir.

Hatanın oluşmasındaki olası nedenler şunlardır:

- Deney verileri kullanılarak yapılan eğri uydurma işleminde tek eksenli basma deney verisi ile çok yüksek oranda örtüşme sağlanmış, fakat hacim sıkıştırma deney verisi ise tam olarak takip edilememiştir. Özellikle sıkışma oranının arttığı son kısımda meydana gelen sapma tampon analizlerinde meydana gelen sapmaya neden olmaktadır.
- Malzeme deneylerinde önemli oranda sürtünme etkisi mevcuttur ve bu etki sonlu elemanlar analizleriyle yapılan tahminler aracılığıyla ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Fakat sürtünmeden kaynaklanan hataları tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir.

Tampon analizlerinde görülen ve karakteristiği birbirine çok benzeyen bu hatayı gidermek için eğri uydurma işleminde kullanılan

deneylerdeki gerinim düzeyleri, deneylere ait veri noktası sayısı, iterasyon sayısı, hata toleransı parametreleri değiştirilerek örtüşme eniylenmelidir.

## SONUÇ

Raporun tümünde verilen bilgiler ile yapılan deney ve analiz çalışmalarına ait sonuçlar değerlendirilerek istenilen özelliklere sahip elastik tampon tasarımı için önerilen yöntemin işlerliği aşağıda özetlenmiştir:

i. Belirli bir yoğunlukta deney numuneleri ile yapılan malzeme testlerinden elde edilen malzeme modeli, yine aynı yoğunlukta malzemeden üretilmiş gerçek parçalarla sınıandıktan sonra aynı malzeme ile üretilmesi düşünülen tampon tasarımlarının sonlu elemanlar analizlerinde güvenle kullanılabilir. Böylece en fazla bir ya da iki prototip üretimiyle istenen karakteristiklere sahip ürün elde edilmesi mümkün olacaktır.

ii. Elastomer malzemelerin sonlu eleman analizleri için, tüm malzeme deneylerinin yapılması ve buna göre malzeme modeli oluşturulması önerilmektedir. Ancak, yalnız basma yükü altında çalışan elastik süspansiyon tamponlarının sonlu elemanlar analizi için basma ve hacim sıkıştırma testlerinin büyük oranda yeterli olduğu bu çalışmada gösterilmiştir.

Bu çalışmada elastomerden üretilen süspansiyon tamponları tasarımı için önerilen yöntemin önemi aşağıda verilmektedir.

- Elastik tampon tasarım süreci önemli ölçüde kısalacak ve tasarımda standardizasyon sağlanacaktır.
- Prototip sayısı azaltılacağı için tasarım maliyeti önemli ölçüde azalacaktır.
- Bilgisayar tasarımında istenen karakteristiklere sahip birden fazla tasarım oluşturularak, maliyeti en az olanı tercih etme olanağı ile özellikle yüksek sayıda üretimin yapılacağı işlerde önemli ekonomik kazanç sağlanması mümkün olacaktır.
- Bilgisayar ortamında yapılan tasarımlara ait sonuçların bir veri bankasında saklanmasıyla oluşacak veritabanı sayesinde yeni tasarım gereksinimlerine kısa sürede cevap verme olanağı doğacaktır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmanın gerçekleşmesindeki destekleri için FKK Güney Oto Lastik Takoz San. ve Tic. A. Ş.'ye teşekkür ederler.

## COMPUTER AIDED DESIGN ANALYSIS FOR ELASTIC SUSPENSION JOUNCE BUMPERS

In this paper, a design methodology is presented for elastomer suspension jounce bumpers, in which Finite Element Analysis is used effectively. In design of jounce bumpers, the aim is to find the correct combination for bumper and cap geometries, and



bumper material in order to obtain a given load deflection curve. The hyperelastic properties of the elastomer bumper material and the large deformations reached during bumper operation increase the difficulty level of the design analysis for suspension bumpers. For a successful simulation of bumper deformation, the bumper material must be tested and mathematical model coefficients must be found using the test results. After being justified with analysis and experiments of existing parts, these coefficients can be used in finite element analysis of any bumper design to be made from the tested material.

Keywords: Jounce Bumper, Elastomer, Hyperelasticity, FEA, Material Testing

#### KAYNAKÇA

1. MSC.MARC MENTAT, Version 2005, MSC Software Corporation
2. Miller K., "Experimental Loading Conditions Used to Implement Hyperelastic and Plastic Material Models", Axel Products Inc. Technical Paper, 2001
3. MSC.Software Corporation, "MAR103 Training Course Notes - Experimental Elastomer Analysis", 2003
4. MSC.Software Corporation, "Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers", Technical Paper, 2000
5. Axel Products Inc., "Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis", Technical Paper, July, 2000
6. Axel Products Inc., "Compression or Biaxial Extension?", Axel Products Inc. Technical Paper, June, 2000
7. Boast D., Coveney VA, "Finite Element Analysis of Elastomers", Professional Engineering Publishing Ltd, London, 1999
8. L. Palgen, D. C. Drucker, "The structure of stress-strain relations in finite elasto-plasticity", International Journal of Solids and Structures, Vol 19, Issue 6, 1983, Sayfa 519-531
9. ASTM Standart No:D575-91