

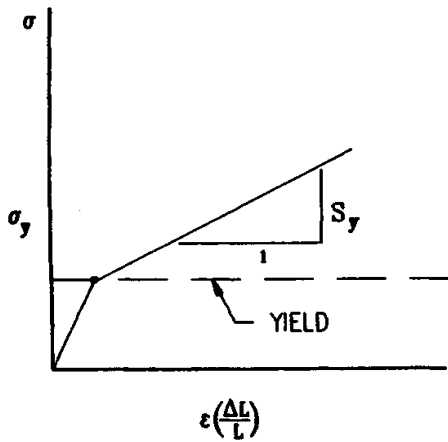
Elastomerlerin FEA'sı Hakkında Temel Bilgiler

Elastomer parça tasarımı yapan mühendisler için Elastomerlerin FEA analizi günümüzde yapılması gereken bir çalışmadır. Mevcut FEA programlarının doğruluğu birçok kez doğrulanmış ve bazen de klasik yollar ile modelleme aşamasında hesaplamalar yapılarak analiz sonuçları doğrulanmıştır. Doğrusal analizler doğrusal olmayan analizlere göre daha kolaydır ve tasarımcılar tarafından tercih sebebidir ama sonuçlar ise bazen tasarımcılara sorunlar yaratmaktadır.

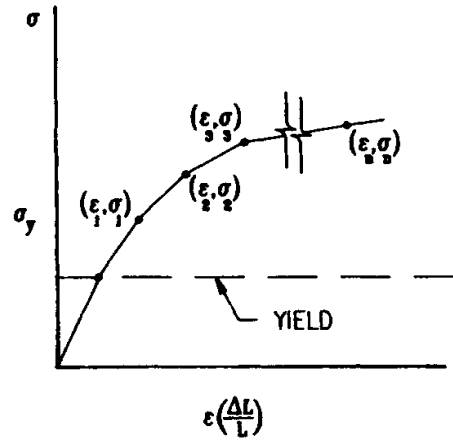
Kauçuk malzemelerin analizleri için önemli bazı noktalar vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Malzeme bilgileri nasıl temin edilir ve hangi malzeme modeli kullanılmalı?
- 2) Doğrusal mı, doğrusal olmayan analiz mi yapılmalı?
- 3) Sonuçlar nasıl değerlendirilmeli?
- 4) Stress/Strain değerleri doğru mu?
- 5) Sınır koşulları nasıl uygulanmalı?
- 6) Model ne kadar detaylı olmalı?
- 7) Plane Strain, Plane Stress ,axi-simetrik veya 3D modelimi ihtiyaç var?
- 8) Modeli tüm komponentleri ile mi almalıyım?
- 9) Yorulma ömrünü FEA analizden elde edebilir miyim?
- 10) Spring(Yay) oranları test dataları ile FEA analiz sonuçlarından ne kadar farklı?
- 11) Hangi element kullanılmalı?

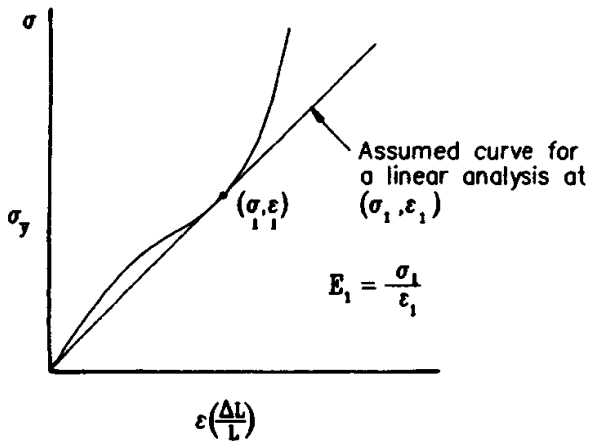
Elastomerlerin FEA analizleri için gerekli malzeme parametreleri, metaller için gerekli olanlardan farklıdır. Metaller genellikle Hookean malzeme olarak bilinir ve gerekli aralıkta doğrusal stress/strain ilişkisi altında değerlendirilir. Metallerin Young's Modulusları referans kaynaklardan rahatlıkla temin edilebilir. Akma noktasını geçen durumlarda ise doğrusal olmayan analizler rahatlıkla uygun modeller yardımı ile yapılabilir. Elastomerler için durum biraz farklıdır. Doğrusal olarak alınırsa poisson's oranı 0.4999 ile 0.5 arasında alınır. Bu kadar yüksek değerden dolayı elemanların FEA için yeniden formüle edilmesi gerekir. Bu yüzden yeni bir yöntem olan "mean pressure function" tanımlanmıştır.



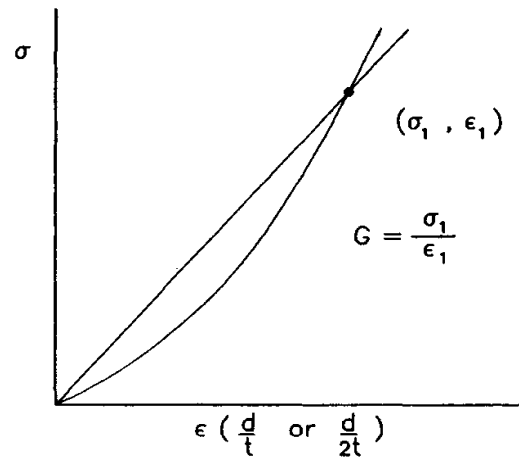
(a) Bi-Linear – Metal Tensile



(b) Non Linear Strain Hardening – Metal Tensile



(c) ASTM 412 Elastomer Tensile Curve



(d) Dual or Quad-lap Elastomer Shear Curve

Resim 1: Stress-strain grafikleri. Kyn: Engineering with Rubber 2nd Ed.

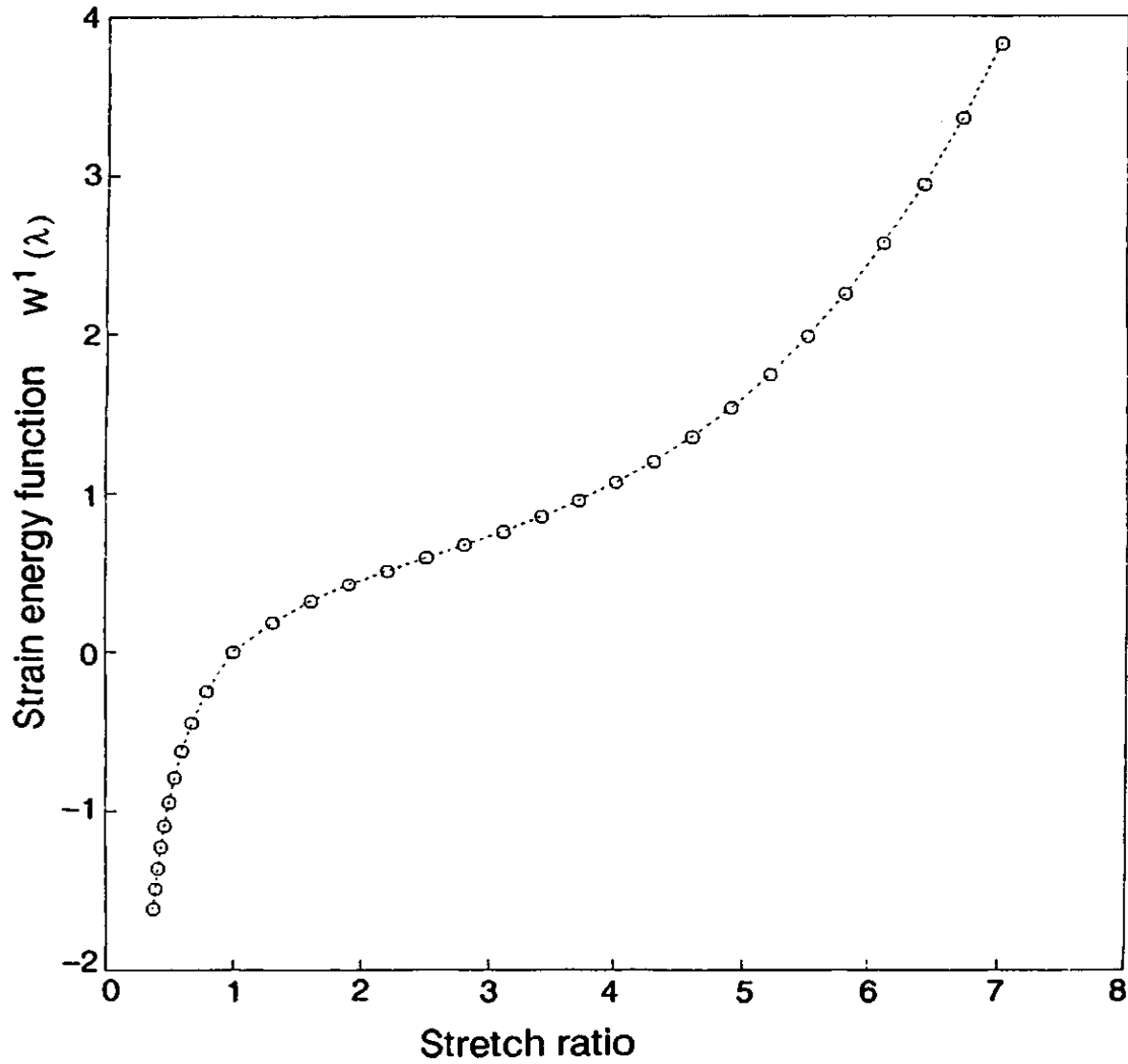
$$K = \frac{(E)}{(3(1 - 2\nu))}$$

$$G = \frac{(E)}{(2(1 + \nu))}$$

Yukarıdaki denklemden de anlaşılacağı üzere poisson's oranı 0.5 olduğunda Bulk modulus sonsuz olmaktadır. Bu aynı zamanda Young's Modulus, shear modulusun 3 katı, $E=3G$, anlamına gelmektedir. Bu durum aslında elastomerlerin mühendisliği için doğru değildir, ama analitik çözümleri mümkün kılmaktadır.

Mühendislerin en önemli kurallarından olan yay oranının sehim ile çarpımı kuvvete eşit olmasıdır. Bu denklem sadece parça doğrusal olarak elastik olduğunda geçerlidir. Eğer parçada akma olursa veya büyük sehim meydana gelirse bir başka durumda malzemenin stress-strain curve doğrusal değilse, doğrusal olmayan bir problem ortaya çıkmış olabilir.

Elastomerler için doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin tanımlanması oldukça zordur. Hyperelastik malzemeler için strain enerji yoğunluğu referans alınarak büyük elastik deformasyonları tanımlayan teoriler geliştirilmiştir.



Resim 2: Peng Grafiği

Bu teoriler tasarımcılar tarafından yüksek deformasyonun olduğu analiz ve tasarımlarda rahatlıkla kullanılabilir.

Temel denklemler iki ana katagoridedir, bunlardan strain energy yoğunluğu principal enerji aralığında polinomial denklem olarak, buda sıkışmayan malzemeler için Rivlin malzemeler olarak tanımlanır. Eğer sadece birinci dereceden terimler kullanılır ise genellikle Mooney-Rivlin malzeme olarak tanımlanır. İkinci katagoride ise strain enerji yoğunluğu 3 ana dal olarak ayrılabilir ve bunlara örnek olarak Ogden, Peng, ve Peng-Landel verilebilir.

Bu modellerden hangisi uygun sorusuna ise Gent ve Yeoh, yüksek derecede strain enerji fonksiyonlarının biraz daha uygun olduklarını belirtir. Fazla sayıda katsayı kauçuk malzemelerin analiz sonuçları ile test sonuçlarının uyuşmasına yardımcı olur. En çok kullanılan Mooney-Rivlin malzeme modeli, kolay olması ve sağlıklı sonuç vermesinden dolayı sıklıkla kullanılan modeldir ama bilinen bazı handikapları vardır.

Neo-Hookeana göre, Mooney-Rivlin modeli birinci katsayısı shear modulus yarısı, ikinci katsayısı ise sıfırdır. Bu malzeme modeli test sonuçları ile oldukça doğru sonuçlar vermektedir ancak % 40 kadar strain uni-axial tensionda ve % 90 a kadar da simple shear da geçerlidir.

İki katsayılı Mooney-Rivlin modeli ise tensile testlerde %100 strainde doğru sonuç vermektedir. Ama bunun yanında baskı durumlarında ise yanlış deformasyon sonucu vermektedir. Aynı zamanda yüksek strainlerde stiffness özelliğini yanlış değerlendirmektedir.

3 veya daha fazla katsayılı Mooney-Rivlin modeli hesaplamalara sabit olmayan shear modulus olarak katmaktadır. Ama bunun yanında dikkat edilmesi gereken yüksek derecede dataların fit edilmesi sorununun olmasıdır ve bundan dolayı da kararlı olmayan yüksek enerji fonksiyonlarına sebep olur ve gerçek üstü sonuçların çıkması söz konusudur.

Yeoh modeli ise diğer yüksek dereceden olan modellerden farklıdır. Bu model uni-axial test datalarının farklı modellerin deformasyonları fit etmesini sağlar. Bu da malzeme testi için gereksinimin azalmasını sağlar ama düşük strainlerde bu modelin kullanılmasına dikkat edilmelidir.

Ogden malzeme modeli ise test dataları ile %700 tensiona kadar oldukça iyi uyum sağlamaktadır. O-rings, sızdırmaz parçalar ve diğer endüstriyel ürünlerin tasarımlarında başarı ile uygulanmaktadır.

Genelde parçanın şekline bağlı olarak analiz için FEA programlarında dört farklı model kullanılmaktadır. En çok kullanılan 2D olan parçanın kesiti ve simetri eksenine şekline olanıdır. Genelde axi-symmetric olarak adlandırılır. İkinci model ise plane straindir ve bu da model kesiti kullanılmaktadır. Bu modelde düzlemsel simetri bulunmamaktadır. Genelleştirilmiş plane strain problemleri düzlem dışındaki bütün sehimin model boyunca aynı olduğunu kabul eder.

Üçüncü tip ise plane stress modeldir ve plane strain gibi aynıdır, sadece düzlemsel olarak stress sabit kabul edilir. Bu model belli bir kalınlığa sahip olmalıdır. Eğer uzun sızdırmaz kauçuk parçanın analizi yapılacak ise ve eşit sehim araştırılıyor ise bu model uygun olacaktır. Son tip model ise 3D modeldir ve genelde ne sabit düzlemsel kesite nede simetriye sahip olan parçalarda uygulanır. Son model ile çalışmak zordur ve tecrübe gerektirir. Bazen son modelle çalışılması gereken parçalarda da düzlemsel simetri ve dairesel simetri olabilir ve bu da çalışmayı kolaylaştırır ve tüm modele ihtiyaç duyulmasını engeller.

Meshlemenin oluşturulması analiz modelinin oluşturulmasında en kritik aşamalardan biridir. Malzeme modeli ve malzeme bilgileri tanımlaması yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri de analiz tipine göre(doğrusal veya doğrusal olmayan) uygun olup olmadığıdır. Yüksek strain değişimlerinin olduğu noktalarda ağ yapısının iyi olması gerekir. Bu bölgeleri tecrübeli kişiler rahatlıkla analizden önce ayırabilmektedir, eğer bu bölgelerin kestirilmesi zor ise ilk önce mesh boyutu büyük iken analiz yapılarak en çok değişim olan bölgeler çıkarılabilir veya kullanıcı tarafından "adaptive mesh" özelliği kullanılarak bu bölgelerin otomatik olarak program tarafından düzenlenmesi sağlanabilir.

FEA modeller oluşturulurken genelde dörtgensel elemanlar kullanılmalıdır ve üçgensel elemanlardan kaçınılmalıdır. Üçgensel elemanlar dörtgensel elemanlardan daha sert(stiff) ve eleman boyunca sabit strain oluşturduğundan kaçınılmalıdır. Eğer yeteri kadar üçgensel eleman oluşturulur ise dörtgensel elemandan oluşan model sonucuna ulaşılabilir. Eğer üçgensel ve kötü dörtgensel elemanlardan kaçınılamıyorsa kritik olmayan bölgelere yerleştirilmesi gerekir. Kauçuk malzemelerin analizlerinde kullanılan elemanların hemen hemen sıkıştırılmaz olmasını destekleyen formülleri desteklemek zorundadır. Bu da "mixed method" yolu ile çözülen ve hemen hemen sıkıştırılmaz isotropic malzemedir. Aynı zamanda doğrusal olmayan analizler için modelleme için tecrübe ile oluşturulmuş bir bilgi birikimi kullanılmalıdır.

Mesh oluşturulduktan sonra sınır koşullarının belirlenmesi çok önemlidir ve özellikle de elastomer malzemelerin doğasından dolayı daha büyük önem kazanmaktadır. Genellikle parçanın bir başka yüzeye teması şeklinde olan sınır koşulları pratikte karşımıza çıkmaktadır. Bütün yüzeyi sabitlemek ise nodelerin bütün yönlerde hareket etmesini engeller. Eğer parça yüzey üzerinde duruyor ise o zaman tanımlanan sınır koşulları yanlış olacaktır çünkü parça sadece yüzey dikine olacak şekilde hareket edemez ama düzlemsel olarak hareket serbestliğine sahiptir. Parçalar üzerine genelde basınç veya kuvvet olarak yükleme şeklindedir. Bazen de belli bir sehim değeri olduğunda oluşan stress dağılımı önemli olmaktadır ve genelde parça tasarımı için pratik olan yoldur.

FEA programları ne kadar da otomatikleştirilmiş olarak lanse edilse de aslında kullanıcıya bağlı bir çok parametre analiz sonuçları ve analizin sağlıklı çalışması için çok önemlidir. Bunlardan dolayı doğrusal olmayan analizlerin FEA programları ile yapılmasına yarı otomatik demek daha doğru olacaktır.

Deformasyon analizlerinde artan yükleme ile sehım arasındaki ilişki teğetsel stiffness olarak adlandırılır. Bu stiffness 3 bileşenden oluşmaktadır. Elastik stiffness, parçadaki ilk stress stiffness ve geometrik stiffnessdır. Elastik stiffness FEAdaki doğrusal analiz ile aynıdır. İkinci terim ise sehım ile oluşan iç stressin yüke karşı direncinde çıkan stressden oluşmaktadır. Son terim ise ilave stiffness değeri doğrusal-olmayan strain-sehım ilişkiden dolayıdır.

Bu tip problemleri çözmek için yük artırıldıkça sehımdaki artış bulunur ve bir sonraki stiffness değeri hesaplanır ve bu şekilde devam eder . Bu tip problemleri çözmek için 3 farklı yaklaşım vardır; bunlar:

1. Total Lagrangian Method
2. In the Updated Lagrangian Method
3. In the Eulerian Method

Popüleritesi artan metotlar olan full Newton-Raphson ve Modified Newton-Raphson doğrusal olmayan denge denklemlerini çözmek için kullanılır.

Stress değerleri doğrusal elastik aralığın dışına çıktığında malzeme davranışı iki sınıfa ayrılır. Bunlar: Zamandan bağımsız özellik sergileyenler (yumuşak metaller gelede lastiklik özelliği genelde, doğrusal olmayan elastiklik ise kauçuklar için uygundur.) İkincisi de zamana bağlı özellik sergileyenlerdir (creep ve viscoelasticity yüksek sıcaklık uygulamaları için, elastomer ve plastikler için viscoelasticity uygundur.) Viscoelasticity genelde yay ve amortisörün paralel çalışması olarak sembolize edilir. Kauçuk, zamana ve sıcaklığa bağlı oran-bağımlılık özelliği sergiler. Rahatlama oranı anlık stress ile doğru orantılı olarak doğrusal visco-elasticty doğrusal superposition kuralına uygun hareket eder. Doğrusal olmayan viscoelasticity özellik, strain değeri büyük olması sonucudur.