

T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALİK MALZEMELERDE ÇENTİK DERİNLİĞİ VE AÇISININ KIRILMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

CANKUT SALMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 1999

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84879

METALİK MALZEMELERDE ÇENTİK DERİNLİĞİ VE AÇISININ

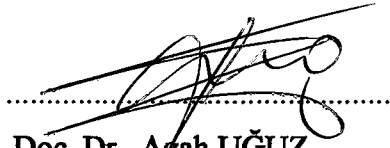
KIRILMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

CANKUT SALMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

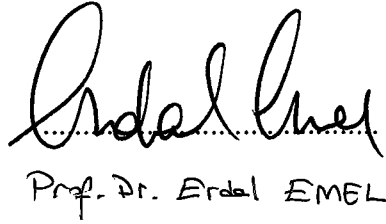
BURSA 1999

Bu tez 7 / 7 / 1999 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

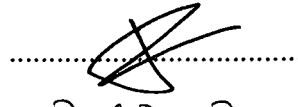


Doç. Dr. Agah UĞUZ

(Danışman)



Prof. Dr. Erdal EMEL



Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

ÖZET

Bu çalışmada, Al-Zn-Mg-Cu alaşımı silindirik ve çevresel çentikli bir numune kullanılmıştır. Burada yapılan, metalik malzemelerde çentik derinliği ve açısının kırılma özelliklerine etkisinin bilgisayar ortamında incelenmesidir. Numunede 1mm. ve 2mm. çentik derinliğinde ve 45°, 60°, 75° çentik açılarında meydana gelen değişiklikler ve kırılma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numunenin modellenmesi ve analizi ANSYS 5.4 adlı analiz programında yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile bilgisayar ortamında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorum yapılmıştır.

Bilgisayar ortamında modelleme ve analiz yapmanın avantajları; numunenin boyutlarını, etkiyen yükleri, malzeme özelliklerini ve daha birçok kriterini değiştirerek kısa zamanda birçok olayı aynı anda inceleme imkanımızın olmasıdır. Böylece malzemeler için harcanan para ve zamandan tasarruf edilir. Dezavantajları ise; malzemenin iç yapısındaki düzensizlikleri, gözle görülmeyen döküm boşluklarını ve çatlakları bilgisayar ortamında tam olarak detaylandıramadığımız için elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile farklılıklar göstermesidir.

Yapılan analizlerde kırılma tokluğu, çentik mukavemeti ve kırılma yükü gibi değerlerin en yüksek ve en düşük, hangi çentik açısı ve çentik derinliğinde olduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT

In this study, circumferentially notched round specimen of Al-Zn-Mg-Cu alloy was used. The effect of notch depth and angle in metallic materials on fracture properties was analysed by the help of Computer Aided Analysis Software. The changes of fracture properties were examined when the notch depths of the specimens were 1 and 2 mm., and the notch angles were 45°, 60°, 75°. Modelling and analysing of the specimen was realised by the analysis programme called ANSYS 5.4. Experimentally measured values were compared with the numerical values calculated by the software and the results were discussed.

The advantages of modelling and analysing in computer are to make possible to examine the different criteria and conditions by changing the specimen sizes, forces, material properties in a short time. Therefore, money and time that was spent for the materials were saved. On the other hand, as we can not observe the cracks, the failure of inside structures of material and microstructures of void cast in detail, the differences between the results obtained by the software and experimental results are occurred. These are the disadvantages of using the computer in this study.

As a result, the upper and the lower values of fracture toughness, notch strength and fracture load depending on the notch angle and depth were determined.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
Simgeler Dizini.....	iv
Şekiller Dizini.....	vi
Çizelgeler Dizini.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Kırılma.....	2
2.1.1. Malzemelerde Hasar.....	2
2.1.2. Metallerde Kırılma Türleri.....	2
2.1.2.1. Gevrek Kırılma.....	3
2.1.2.2. Sünek Kırılma.....	3
2.1.2.3. Sürünme Kırılması.....	4
2.1.2.4. Yorulma Kırılması.....	4
2.1.3. Oluşum Mekanizmasına Göre Kırılma Tipleri.....	5
2.1.3.1. Klivaj Kırılması.....	5
2.1.3.2. Kayma Kırılması.....	6
2.1.4. İdeal Kırılma Mukavemeti.....	8
2.2. Kırılma Mekanizmasının İncelenmesi.....	10
2.2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanizması.....	18
2.2.1.1. Elastik Gerilme Alanı.....	18
2.2.1.2. Gerilme Yoğunluk Faktörü.....	19
2.2.2. Gerilme ve Germe Arasındaki İlişkiler.....	20
2.2.2.1. Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değiştirme (Germe).....	20
2.2.2.2. Elastik Gerilme-Germe İlişkileri.....	20
2.2.2.3. Asal Düzlemler ve Asal Gerilmeler.....	23
2.2.2.4. Bir Noktadaki Gerilmeler.....	24
2.3. Kırılma Tokluğu.....	25
2.4. Kırılma Mekanizmasında Mikroyapının Önemi.....	26
2.4.1. Metalik Malzemelerin Mikroyapıları.....	27
2.4.2. Çatlak İlerleme Mekanizmaları.....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	30
3.1. Çekme Deneyleri.....	30
3.2. Analiz Yöntemleri.....	31
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	33
4.1. Çentikli Çekme ve Çentik Hassasiyeti.....	33
4.2. Kırılma Tokluğu.....	35
4.3. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafiklerin Yorumları.....	37
4.4. ANSYS Analiz Programı Hakkında Açıklamalar.....	93
4.4.1. Nonlineer Davranış.....	93
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	99
6. KAYNAKÇA.....	100
7. ÖZGEÇMİŞ.....	101

Simgeler Dizini

X_0	Atomlar arasındaki denge konumu uzaklığı
σ	Gerilme
σ_T	Teorik kırılma mukavemeti
X_m	Atom merkezleri arasındaki uzaklık
E	Elastisite (Young) modülü
ε	Şekil değiştirme (germe)
γ	Birim alandaki yüzey enerjisi
σ_{max}	Maksimum gerilme
σ_0	Ortalama gerilme
a	İç çatlakın yarı boyu
ρ	Çatlak ucu eğrilik yarıçapı
γ_e	Elastik yüzey enerjisi
P	Çekme kuvveti
F_0	Enine kesit
σ_n	Nominal gerilme
σ_v	Mukayese gerilmesi
K_C	Kritik gerilme yoğunluğu (Kırılma tokluğu)
G_C	Kritik enerji değeri
K	Gerilme yoğunluk faktörü
a/W	Numunenin ve çatlakın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametre
ν	Poisson oranı
τ	Kayma gerilmesi
σ_F	Kritik gerilme değeri
K_{IC}	Kritik gerilme değerinde ölçülen gerilme yoğunluğu
α	Demir karbon diyagramındaki ferrit fazının kısaca gösterimi
β	Mikroyapıdaki partikül şeklindeki ikinci faz
D	Numune çapı
d	Çentik kesiti çapı
σ_{YS}	Akma mukavemeti
σ_{UTS}	Çekme mukavemeti

NSR	Çentik hassasiyeti
P_F	Kırılma yükü
u	Yer değiştirme
K	Orantı sabiti
$[K^T]$	Rijitlik matrisi
$\{\Delta u\}$	Yer değişim artışı
$\{F^{app}\}$	Uygulanan yük vektörü
$\{F^{nr}\}$	Yenilenen Newton-Raphson kuvveti
$\{\epsilon_n^{pl}\}$	Bir önceki adımdaki plastik gerilme
$\{\Delta \epsilon_n^{pl}\}$	Plastik gerilme artışı
$\{\epsilon_i^{tot}\}$	Toplam gerilme

Kısaltmalar

HMK	Hacim merkezli kübik yapı
SPH	Sıkı paket hegzagonal yapı
COD	Çatlak ucu açılması
EPKM	Elastik-plastik kırılma mekaniği
LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
NSR	Çentik hassasiyeti

Şekiller Dizini

Şekil 2.1.	a) Sünek tek-kristallerde kayma kırılması, b) Gevrek kırılma, c) Çok kristallerde sünek kırılma (kap-koni tipi), d) Çok kristallerde tam sünek kırılma.....	4
Şekil 2.2.	a) Tane içi ve b) Taneler arası kırılmanın şematik olarak gösterilişi.....	6
Şekil 2.3.	Bir Al-Zn Mg alaışımının kırılma yüzeyinin tarama elektron mikroskobu mikroskopi. Bir tanenin hem transgranüler hem de intergranüler kırılmış görüntüsü.....	7
Şekil 2.4.	Bir kristalde atomlar arası kuvvetlerin etkileşimleri.....	8
Şekil 2.5.	Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak gerilme.....	9
Şekil 2.6.	Bir çentik ve çatlağın ucunda gerilme yığılması.....	11
Şekil 2.7.	Aynı malzemeden imal edilmiş ve eşit enine kesitli düz ve keskin çentikli deney çubukları.....	13
Şekil 2.8.	Çentik tokluğunun sıcaklıkla değişimi.....	14
Şekil 2.9.	Çentik tokluğu-sıcaklık eğrisine deney parçası şeklinin etkisi a) Charpy-Keskin çentikli deney parçası b) DVM deney parçası.....	15
Şekil 2.10.	a) Çeliklerde ve b) Alüminyum alaşımlarında kırılma enerjisinin sıcaklıkla değişimi.....	17
Şekil 2.11.	Yüklemenin a) Çekme (açılma) modu (Mod I), b) Kayma modu (Mod II) c) Makaslama modu (Mod III).....	18
Şekil 2.12.	Çatlak ucunda bir noktadaki gerilme.....	19
Şekil 2.13.	Bir noktadaki gerilmeler.....	25
Şekil 2.14.	Bir malzemenin numune kalınlığı K_c ' ye etkisinin şematik gösterilişi.....	26
Şekil 2.15.	Metalik malzemelerin bazı tip mikroyapıları.....	27
Şekil 2.16.	Çatlak ilerleme mekanizmaları.....	29
Şekil 3.1.	Çevresel çentikli silindirik çekme numunesi.....	30
Şekil 4.1.	σ - ϵ diyagramları a) Deney sonucu bulunan b) Bilgisayarda hesaplanan.....	35
Şekil 4.2.	Kırılma tokluğu değerinin, çentik açısı ve derinliği ile ilişkisi.....	36
Şekil 4.3.	Çentik mukavemetinin, çentik açısı ve derinliği ile ilişkisi.....	36
Şekil 4.4.	Numunenin 3 boyutlu görünüşü.....	38
Şekil 4.5.	Numunenin mesh yapılmış 3 boyutlu görünüşü.....	39
Şekil 4.6.	Numunenin mesh yapılmış 2 boyutlu görünüşü.....	40
Şekil 4.7.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von- Mises gerilmeleri.....	41
Şekil 4.8.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	42
Şekil 4.9.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	43
Şekil 4.10.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (29. saniye).....	44
Şekil 4.11.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (30. saniye).....	45
Şekil 4.12.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (31. saniye).....	46
Şekil 4.13.	45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (32. saniye).....	47

Şekil 4.14. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (33. saniye).....	48
Şekil 4.15. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (34. saniye).....	49
Şekil 4.16. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	50
Şekil 4.17. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	51
Şekil 4.18. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.....	52
Şekil 4.19. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	53
Şekil 4.20. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	54
Şekil 4.21. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	55
Şekil 4.22. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	56
Şekil 4.23. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.....	57
Şekil 4.24. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	58
Şekil 4.25. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	59
Şekil 4.26. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	60
Şekil 4.27. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	61
Şekil 4.28. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.....	62
Şekil 4.29. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	63
Şekil 4.30. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	64
Şekil 4.31. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	65
Şekil 4.32. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	66
Şekil 4.33. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.....	67
Şekil 4.34. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	68
Şekil 4.35. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	69
Şekil 4.36. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	70

Şekil 4.37. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	71
Şekil 4.38. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.....	72
Şekil 4.39. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).....	73
Şekil 4.40. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.....	74
Şekil 4.41. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	75
Şekil 4.42. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).....	76
Şekil 4.43. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.....	77
Şekil 4.44. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.....	78
Şekil 4.45. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).....	79
Şekil 4.46. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	81
Şekil 4.47. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	82
Şekil 4.48. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	83
Şekil 4.49. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	84
Şekil 4.50. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	85
Şekil 4.51. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.....	86
Şekil 4.52. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	87
Şekil 4.53. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	88
Şekil 4.54. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	89
Şekil 4.55. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	90
Şekil 4.56. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	91
Şekil 4.57. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.....	92
Şekil 4.58. Lineer Davranış Özellikleri.....	93
Şekil 4.59. Nonlinear Davranış Eğrisi.....	94
Şekil 4.60. Elemanların Serbestlik Dereceleri.....	94
Şekil 4.61. Von-Mises Akma Kriteri.....	95
Şekil 4.62. Newton-Raphson Şeması.....	96
Şekil 4.63. İki Boyutlu Plane42 Katı Elemanı.....	97

Çizelgeler Dizini

Çizelge 2.1. Üç Eksende Gerilme Durumunda Şekil Değişirmelerin Büyüklükleri.....	21
Çizelge 2.2. Asal Gerilmelerin Büyüklüklerine Göre Gerilme Durumları.....	24
Çizelge 3.1. Deneyde Kullanılan Alüminyum Alaşımın Kimyasal Bileşimi.....	30
Çizelge 4.1. Malzemenin mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 4.2. ANSYS analiz programından elde edilen sonuçlar.....	33
Çizelge 4.3. Deney yoluyla elde edilen sonuçlar.....	33



1. GİRİŞ

Bugüne kadar çentik açısı ve derinliğinin, yaşlandırılmış ticari 7075 alaşımının bazı mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Numunenin geometrisinin tokluğa çok az veya etkisi yok gibi görünmesine rağmen gerilme özelliklerinde çentik etkisi vardır ve bu, çentik derinliği arttıkça daha da çok belirginleşir (Uğuz ve Bayram 1999).

7XXX alüminyum alaşım serileri, birçok uygulama alanının olduğu, özellikle de ulaşım, kullanıldığı aracı hafifleterek enerji verimini arttıran maksimum yaşlandırılarak sertleştirilebilen alaşımlardır. Yüksek mukavemetli alaşımlara genellikle Zn, Mg ve Cu eklenmiştir. Al-Zn-Mg alaşımlarına %2'ye kadar Cu eklenmesi çökeltme mekanizmalarında önemli bir değişiklik meydana getirmez (Smith 1993). 7075, %5,6 Zn, %2,5 Mg ve %1,6 Cu ile benzer bileşimlerle en çok kullanılan alaşımlı 7XXX serisidir ve bu alaşımın uçak yapılarında ve hidrolik ekipmanlarda birçok uygulaması bulunur (Smith 1993).

Bu çalışmada, Al-Zn-Mg-Cu alaşımı kullanılmıştır. Çevresel çentikli bir numunede çentik açısı ve derinliğine bağlı olarak kırılma özellikleri, bilgisayarda analiz yöntemi ile incelenmiştir. Bilgisayar destekli modelleme ve analiz gittikçe yaygınlaşmaktadır. Dünyada ve ülkemizde birçok firma, tasarımlarını bilgisayar yardımıyla yapmaktadır. Bunun sebepleri arasında; zamandan tasarruf, değişiklikleri kolayca uygulayabilme ve üretim aşamasından önce üretim esnasında meydana gelebilecek olayları önceden görme gibi nedenler bulunmaktadır. Üretim ve işletim sırasında meydana gelebilecek olumsuzluklar bazen kötü sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle tasarım aşamasındayken koşullar çok iyi bir şekilde analiz edilerek üretime geçilmelidir. Bilgisayar destekli modelleme ve üretim (CAD-CAM) uygulamalarının amacı da budur.

İncelediğimiz konunun amacı da, deneysel olarak elde edilen sonuçların, bilgisayarda analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak aralarındaki farkları görmektir. Elde edilen sonuçlardan gerçek ortam ile sanal ortamın birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları saptanmıştır. Çentik açısı ve çentik derinliğine bağlı olarak numunede meydana gelen değişiklikler gözlenmiş, kırılma özellikleri açısından irdelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kırılma

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir (Uğuz 1996).

2.1.1. Malzemelerde Hasar

Yük taşıyan yapılarda hasar , en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir fakat aralarında önemli farklar vardır.

Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır. Bu hatalara örnekler; arayer ve farklı büyüklükteki yeralan atomları, tane sınırları, uyumlu çökeltiler ve dislokasyon ağlarıdır.

Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olarak lokal (yerel) gerilme-şekil değiştirme (germe) alanları söz konusudur. Makroskobik hatalara örnek olarak, malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları verilebilir. Plastik akma karşı direnci kontrol eden çok küçük kafesle ilgili hatalar burada doğrudan etkin değildir, ancak malzemenin kırılmaya olan eğilimi, plastik deformasyon direnciyle ilgili olduğundan önemlidirler.

2.1.2. Metallerde Kırılma Türleri

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikrodeformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık (özellikle hacim merkezli kübik, HMK sisteminde),

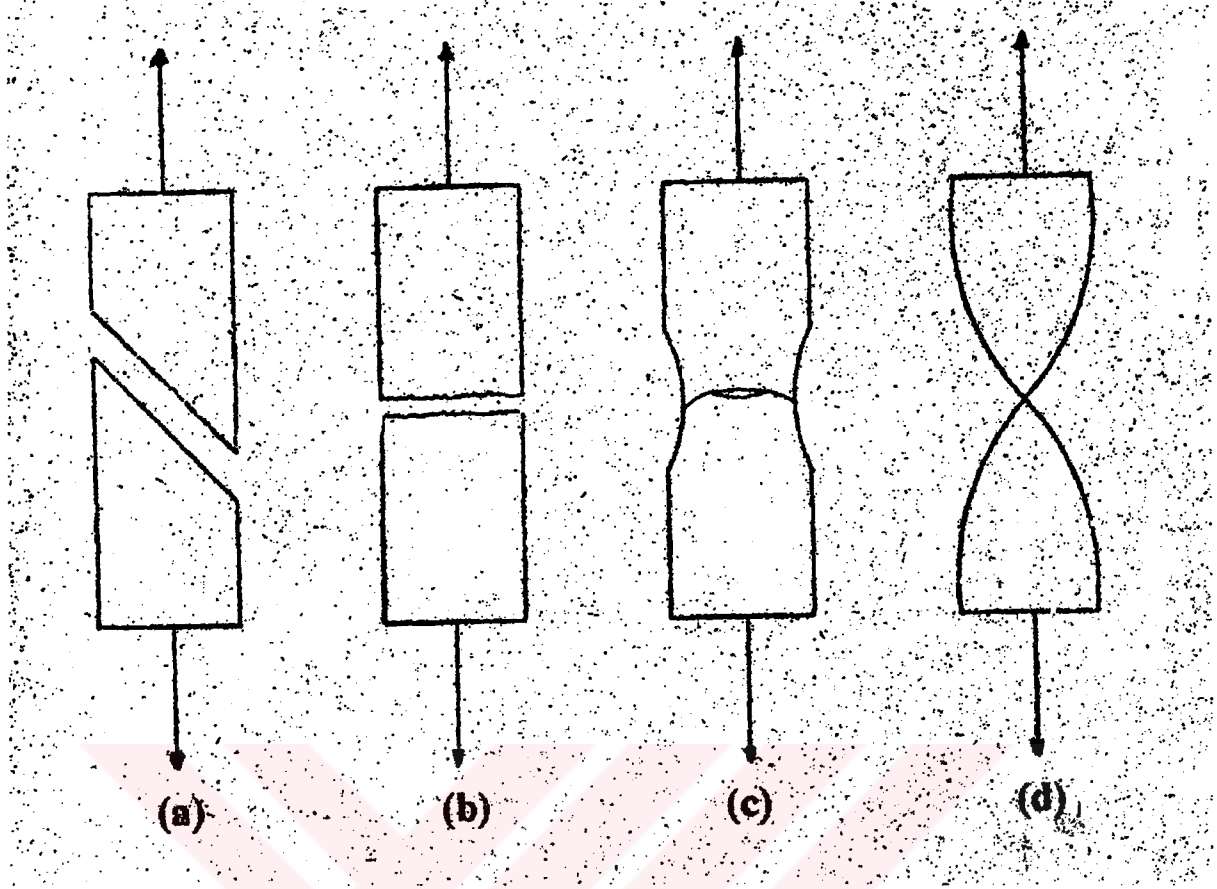
artan deformasyon hızı ve üç eksenli gerilme (genellikle bir çentiğin yol açtığı) durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür (Uğuz 1996) .

2.1.2.1. Gevrek Kırılma

Çok az veya hiçbir plastik deformasyon bırakmadan malzemenin kırılmasına gevrek kırılma denir. Gevrek kırılma (Şekil 2.1b), çekme gerilmesine dik bir ayrılma şeklinde karakterize edilir. Dıştan bakıldığında hiçbir deformasyon belirtisi yoktur ancak çeşitli yöntemlerle kırılma yüzeyi incelendiğinde ince bir tabaka deformasyon saptamak mümkündür. Gevrek kırılma çoğunlukla HMK ve sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapısına sahip metallerde gözlenir. Bir çok hallerde gevrek olarak kırılan malzemelerde, yalnız kırık yüzeyi civarında az miktarda plastik deformasyon meydana gelir (Hertzberg 1989).

2.1.2.2. Sünek Kırılma

Kırılma öncesi malzemede plastik deformasyon meydana gelirse bu tip kırılmaya sünek kırılma denir. Sünek kırılmanın meydana gelebilmesi için cisimde belirli bir miktarda plastik deformasyonunda meydana gelmesi gerekir, çünkü sünek kırılmayı oluşturmak için plastik deformasyon gereklidir. Bu sebeple de sünek kırılmayı meydana getirmek için uygulanan gerilmenin, malzemede plastik deformasyonu sağlayacak seviyede olması gerekir (Brown ve Srawley 1967). Sünek kırılma birkaç şekilde olabilir. SPH yapıya sahip tek kristallerde bazı ana düzlemlerde kayma sonucu kristal kayarak ayrılır (Şekil 2.1a). Altın ve kurşun gibi bazı yüksek süneklığe sahip çok kristalli metaller kırılmadan önce bir nokta kadar incelirler (Şekil 2.1d). Orta derecede sünek metallerin çekme kırılmasında plastik deformasyon, sonuç olarak bir boyun vermiş bölge oluşturur. Kırılma, numunenin merkezinden başlar ve kayma ayrılmasıyla gelişerek numunenin kopmasına yol açar (Şekil 2.1c) (Uğuz 1996).



Şekil 2.1. a) Sünek tek-kristallerde kayma kırılması, b) Gevrek kırılma, c) Çok kristallerde sünek kırılma (kap-koni tipi), d) Çok kristallerde tam sünek kırılma (Uğuz 1996).

2.1.2.3. Sürünme Kırılması

Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılmasına, sürünme kırılması denir (Brown ve Srawley 1967). Makroskobik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur. Bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskobik açıdan ise, sürünme kırılması, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklıdır.

2.1.2.4. Yorulma Kırılması

Malzemelerin elastik limit ve çekme dayanımı altındaki alternatif yükler altında kaldıklarında zamanla kırılma gösterirler, bu olaya yorulma kırılması adı verilir

(Brown ve Srawley 1967). Yorulma kırılmaları genel olarak plastik deformasyon meydana gelmeden de olabilir. Bazen yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerse de yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklı olup, çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerler.

2.1.3. Oluşum Mekanizmasına Göre Kırılma Tipleri

Mikroskobik açıdan incelendiğinde, malzemeyi meydana getiren bir tanenin kırılması, kristallografik düzlemler üzerinde veya kristallografik düzlemleri kesen atomlar arası bağın kopması yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonunda olur. Malzemelerin kırılması mikroskobik açıdan farklı şekilde, aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Smith 1978).

2.1.3.1. Klivaj Kırılması

Kırılma, klivaj düzlemleri diye bilinen belirli kristallografik düzlemler boyunca meydana gelirse, buna klivaj kırılması denir. Klivaj düzlemleri en düşük yüzey enerjisine sahip düzlemlerdir. Bu tip kırılma, klivaj düzlemine dik normal gerilmelerin kiritik bir değeri aşması ile klivaj düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucunda olur. Tek eksenli gerilme halinde çatlak yönüne dik olarak ilerleme eğilimi gösterir, bu sebeple de klivaj kırılmaları düz bir görünüm gösterir. Çok taneli malzemelerde, klivaj düzlemlerinin oryantasyonu her tanede farklı olup, bir taneden diğer taneye geçildikçe çekme doğrultusuna dik olmayacaktır. Dolayısıyla bir tane boyutundan daha büyük mesafelerdeki klivaj kırılması düz görünüm göstermeyecektir, tane değiştikçe yön değiştirecektir (Ewalds ve Wanhill 1985).

Malzemelerin gevrek kırılması, genellikle klivaj kırılması şeklinde olur. Klivaj kırılması granüler veya kristalin bir görünüme sahiptir, çünkü bu tip kırılma her bir tane içerisindeki bir düzlemde meydana gelir. Klivaj kırılmasında genellikle tanelerin şekli bozulmaz ve yüzeyin görünüşü düzdür, kırılma yüzeyi ışığı çok iyi yansıtır ve parlak olarak görünür (Smith 1978).

2.1.3.2. Kayma Kırılması

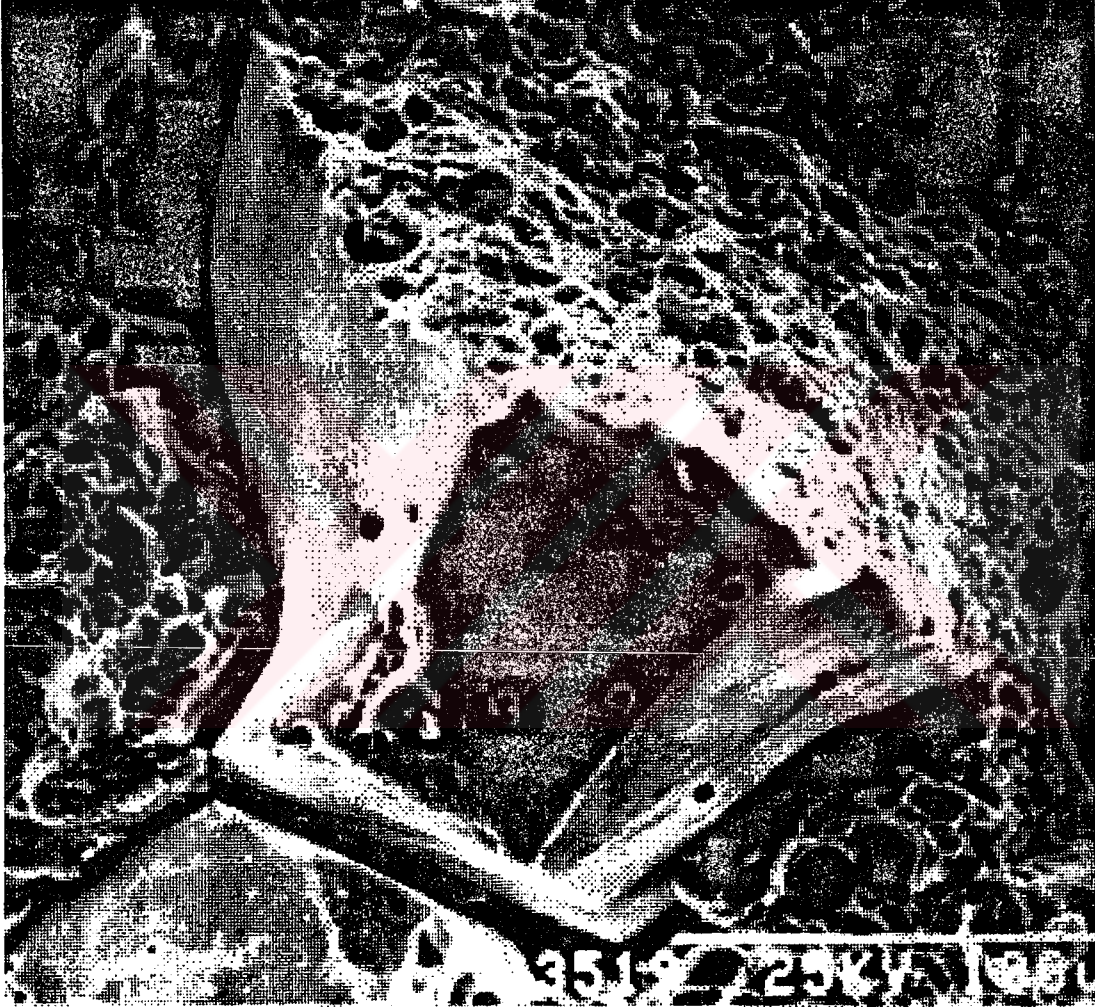
Kayma kırılması, kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ile atom düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması suretiyle meydana gelir. Atom bağlarının kayma ile kopması sonucunda meydana gelen bu kırılma, bölgesel homojen olmayan plastik deformasyon işleminden ibarettir. Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Metalik malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir. Çatlağın takip ettiği yol yükleme şekline, iç gerilmeler meydana getiren faktörlere ve matriks yapısına bağlıdır. Bu tip kopma, çatlak ilerleyişi mikroskobik olarak çekme yönüne dik olduğundan normal kopma veya kırık yüzeyi görünüşü lifli olduğundan lifli kırılma adını alır. Mikroskobik olarak, çatlak çekme eksenine 45° lik açı yapan düzlemlerde ilerleyerek kayma kırılmasını meydana getirmiştir (Ewalds ve Wanhill 1985). Kayma nedeniyle oluşmuş bir kırılma yüzeyi optik mikroskopta düşük büyütmelemlerde gri ve lifli görünürken, düz klivaj yüzeylerinden ışığın yansımaları nedeniyle klivaj kırılma yüzeyleri parlak veya taneli görünür. Kırılma yüzeyleri birçok durumda lifli ve taneli kırılmanın karışımı şeklinde görünür. Bu durumda bu kategorideki kırılma türlerinin yüzey alanlarının belirlenmesi gerekir (Smith 1993).

Çok kristalli malzemelerde kırılma transgranüler (tane içi) ve intergranüler (taneler arası) olmak üzere iki gruba ayrılır (Şekil 2.2). Çatlak, taneleri keserek ilerliyorsa tane içi, tane sınırlarını izleyerek ilerliyorsa taneler arası kırılma söz konusudur. Pratikte çoğu zaman bu iki tip kırılma birlikte görülür (Şekil 2.3) (Uğuz 1996).



Şekil 2.2. a) Tane içi ve b) Taneler arası kırılmanın şematik olarak gösterilişi (Uğuz 1996).

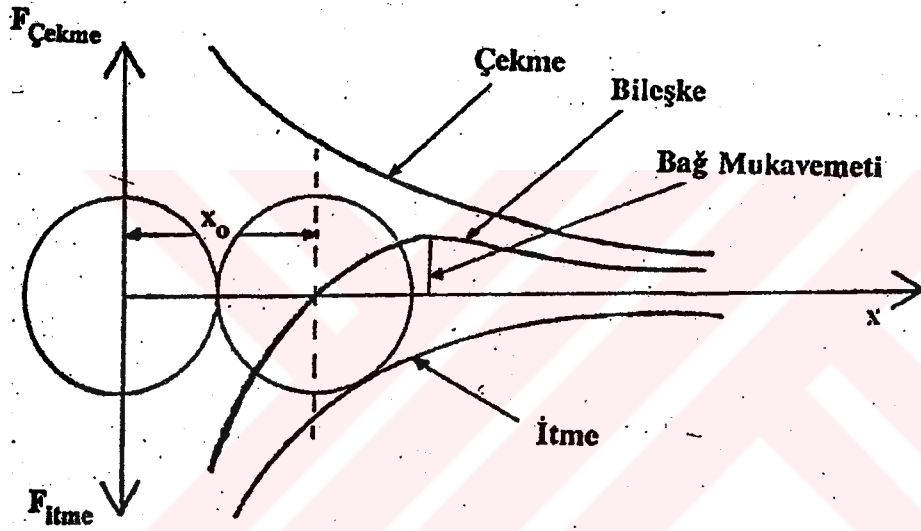
Sünek ve gevrek gerilmə kırılma arasındaki sınır, ele alınan duruma göre izafidir. Örneğin, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demirle karşılaştırıldığında sünek, ancak düşük karbonlu çelikle karşılaştırıldığında gevrek.



Şekil 2.3. Bir Al-Zn-Mg alaşımlarının kırılma yüzeyinin tarama elektron mikroskobu mikrofrafı. Bir tanenin hem transgranüler hem de intergranüler kırılmış görüntüsü (Uğuz 1996).

2.1.4. İdeal Kırılma Mukavemeti

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir (Uğuz 1996). Şekil 2.4 'de iki atom arasındaki kuvvetlerin, atomlar arasındaki X_0 denge konumu uzaklığı, atomlar arası itme ve çekme kuvvetlerinin dengede olduğu durumda sağlanır. Bir kristal malzemede çekme gerilmesi altında bütün bağlar aynı miktarda gerilirler. Gerilme değeri, bir bağ üzerindeki kuvvetin, gerilme yönüne dik birim alandaki bağ sayısı ile çarpımı şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2.4. Bir kristalde atomlar arası kuvvetlerin etkileşimleri (Uğuz 1996).

Komşu atomlar arasında bir etkileşim olmadığını kabul edersek, iki atomu birbirinden ayırmak için gerekli gerilme değeri yarısinüzoidal bir fonksiyon şeklinde basitleştirilebilir (Şekil 2.5).

$$\sigma = \sigma_T \sin (2\pi X_m / \lambda) \quad (2.1)$$

Burada σ_T teorik kırılma mukavemeti, X_m atom merkezleri arasındaki uzaklık ile X_0 denge konumu uzaklığı arasındaki farktır. $(X - X_0)$, ve $\lambda/2$ atomları arası kuvvetlerin menzilini belirleyen yaklaşık ifadedir.

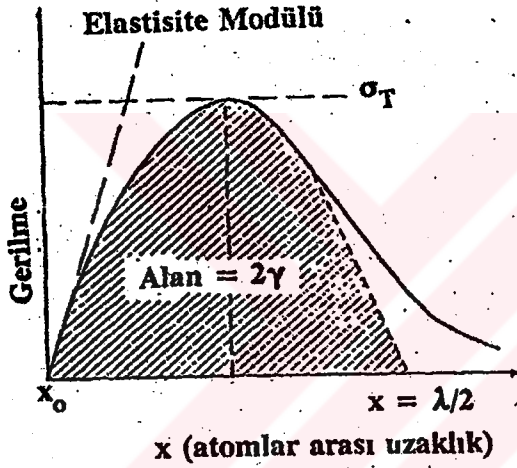
Çok küçük yer değiştirmeler için Hook kanunu geçerlidir (Şekil 2.5'de $X_m = 0$ noktasındaki eğim malzemenin elastisite modülünü verir). E elastisite modülü, ϵ şekil değiştirme olmak üzere;

$$\sigma = E\epsilon = E \frac{x_m}{x_0} = \sigma_T \frac{2\pi x_m}{\lambda} \quad (2.2)$$

elde edilir. Kristali kırmak için gerekli enerji, yeni oluşacak yüzeylerin enerjisi eşittir yaklaşımıyla;

$$\int_0^{\lambda/2} \sigma dx_m = 2\gamma \quad (2.3)$$

yazılabilir. Burada γ birim alandaki yüzey enerjisini ifade etmektedir. Dolayısıyla 2γ Şekil 2.5'deki eğrinin altında kalan alana eşittir.



Şekil 2.5. Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak gerilme (Uğuz 1996).

2.3'deki formülü yeniden düzenlersek;

$$\int_0^{\lambda/2} \sin(2\pi \frac{x_m}{\lambda}) dx_m = 2\gamma \quad \Rightarrow \quad 2\gamma = \frac{\sigma_T \lambda}{\pi} \quad (2.4)$$

λ yerine 2.2 eşitliğinden λ 'yı çekersek;

$$\sigma_T = (\gamma E / X_0)^{1/2} \quad (2.5)$$

elde edilir. Yaklaşık olarak $\lambda/2 \approx X_0$ kabul edersek;

$$\sigma_T = E / \pi \quad (2.6)$$

bulunur. Daha doğru bir ifade olarak;

$$\sigma_T = E / 10 \quad (2.7)$$

kabul edilmiştir. Ancak görüldüğü gibi malzemelerin gerçek mukavemetleri bu teorik mukavemetin yüzde birinden azdır. Aralarında bu kadar fark olmasının sebebi gerçekte malzemelerin gerilmeleri lokal olarak arttıran ve çok eksenli gerilmeler yaratan hatalar içermeleridir. Kırılma mekaniğinin amacı, çatlaklar, çentikler ve delikler gibi gerilme yoğunluğunu arttıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözümler aramaktır.

2.2. Kırılma Mekaniğinin İncelenmesi

Kırılma Mekaniği, hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk başarılı analizi 1920’de Griffith (1920) tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith (1920), sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlağın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith (1920) basit bir enerji dengesi öngörmüştür; gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur, ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjidir. Bu teori, gevrek katılarda teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemetiyle hata boyutu arasındaki ilişkiyi de verir.

Griffith (1920), cam üzerinde yaptığı çalışmaların sonucu, cam yüzeyinde mevcut gözle görülmeyen mikroçatlakların camın mukavemetini azalttığını saptamıştır.

Yüzeyinde veya içinde eliptik bir çatlak içeren malzemede (Şekil 2.6), çatlak ucunda yüksek gerilme yığılmaları oluşur. Çatlak ucundaki maksimum gerilme $\sigma_{\max}$, ortalama σ_0 gerilmesinden çok daha büyüktür. $\sigma_{\max}$ aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

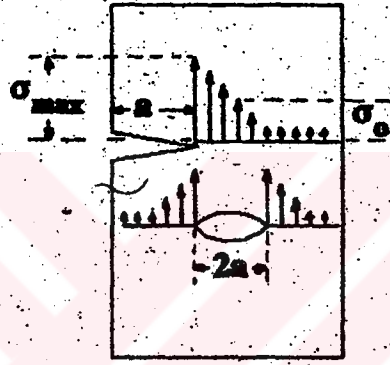
$$\sigma_{\max} = 2\sigma_0 \sqrt{(a/\rho)} \quad (2.8)$$

Burada a iç çatlağın yarı boyu ve ρ çatlak ucu eğrilik yarıçapıdır.

Griffith'in (1920) önerdiği teoriye göre, gerilmelerin çatlak civarında oluşturacağı elastik enerji, yeni oluşacak çatlak yüzeylerinin yüzey enerjisine eşit olunca çatlak ilerlemeye başlar. Birim kalınlıkta ve sonsuz genişlikte bir levha için bu koşulu sağlayan gerilmenin;

$$\sigma = \sqrt{(2\gamma_e E) / (\pi a)} \quad (2.9)$$

olduğu gösterilmiştir. Burada a , çatlak yarı boyu, E , malzemenin elastisite modülü ve γ_e , elastik yüzey enerjisidir.



Şekil 2.6. Bir çentik ve çatlağın ucunda gerilme yığılması (Uğuz 1996).

Griffith'in (1920) çatlak ilerlemesi için ileri sürdüğü bu enerji yaklaşımı tüm gevrek malzemeler için oldukça iyi sonuçlar verir. Bu tür malzemelerin kırılmasına elastik kırılma denir. Ancak görünüşte gevrek olarak kırılan kristal malzemelerde de çoğunlukla kırılma yüzeyi civarında bir miktar yerel plastik deformasyon oluşur. Bu tür malzemelerde sadece yeni çatlak yüzeyleri oluşması için gerekli enerjiyi değil, aynı zamanda çatlak etrafında oluşacak plastik şekil değiştirme enerjisini de göz önüne almak gerekmektedir.

Normal statik çekme deneyinde, yüksek bir plastik şekil değiştirme özelliği gösteren çeliklerde hangi şartlar altında bu gibi gevrek kırılmalar gözlenebilir? En önemli nedenler şu şekilde sıralanabilir;

- a) Çok eksenli gerilm  hali
- b) Yüksek zorlanma hızı
- c) Düşük sıcaklık
- d) Nötron bombardımanı ile gevrekle me
- e) Uygun olmayan malzeme nedeniyle gevrekle me (Kimyasal bileşim, tane büyüklüğü, ya lanma, soğuk  ekil verme gibi)

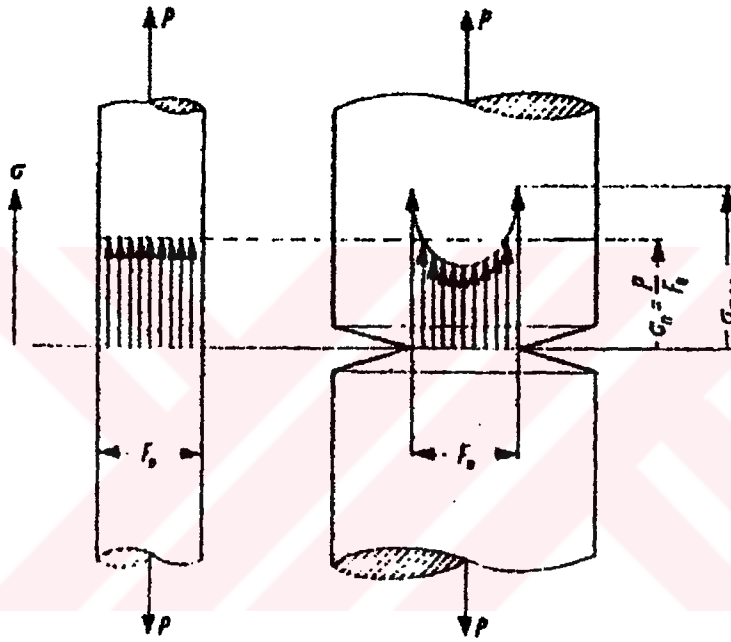
Çok eksenli gerilme halinde plastik  ekil de i tirmenin engelleni ine ait bir örnek olarak çekme zorlaması altındaki bir çeliğin davranışı göz önüne alınsın. Aynı malzemeden yapılmış ( rne in; düşük karbonlu tavlanmış  elik) biri düz ve diğeri çevresel çentik açılmış olan iki yuvarlak çubuk hazırlansın ve her ikisine de aynı F_0 enine kesitleri  zerine P  ekme kuvveti uygulansın ( ekil 2.7). Düz  ubuk, orantı sınırının a ılmasıyla, bütün uzunluğu ve enine kesiti boyunca üniform olarak plastik  ekil de i tirir. Sonuçta  ubuk zayıf bir yerinden daralır ve buradan kırılır. Düz  ubukta düzgün bir genleme ve daralan yerde de daha yüksek şiddetle yerel bir genleme yani büyük bir kalıcı  ekil değiştirme görülür (Sünek kırılma hali) (Srawley ve Brown 1965).

Çevresel  entikli yuvarlak çubukta, çentik dibinde eksenel bir (σ_{max}) maksimum gerilmeli çok eksenli gerilme hali oluşur. Bu maksimum gerilme, henüz orantı sınırının altında bulunan düşük σ_n nominal gerilmesinde, çentik ucunda orantı sınırının yerel olarak açılmasına neden olur. Ayrıca çok eksenli gerilme durumu nedeniyle çentik civarında plastik  ekil değişimi de zorlaşır. Orantı sınırının yerel olarak açılması sonucu oluşan yerel plastik  ekil değişimi nedeniyle çekme çubuğu tamamen elastik  ekil de i tiriyormu  gibi görünür (Yarı-elastik). Nominal gerilmenin daha fazla artırılmasıyla içinde akma olayı oluşan çubuk hacmi artar, bunun haricinde hacim en dar kesit civarında aslında sınırlı kalır. Eğer  entik yeri haricinde kesit yeteri kadar büyük olursa, çubuğun tümü kırılma sırasında sadece elastik zorlanır. Akma bölgesinin yerel sınırlandırılmasından dolayı, çentikli çubuk büyüyen çentik ağzı ile birlikte, yani artan çok eksenli gerilme durumu ile kırılma gevrek olmuş olur.

 eliklerde, çok eksenli gerilme durumunda, akma kriteri olarak, bir eksenli çekme deneyine karşılık gelen ve asal gerilmelerden oluşan σ_v mukayese gerilmesiyle belirlenen,  ekil De i tirme Hipotezi kullanılacaktır. Bu mukayese gerilmesi aşağıdaki şekilde verilir;

$$\sigma_v = (1/\sqrt{2}) [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

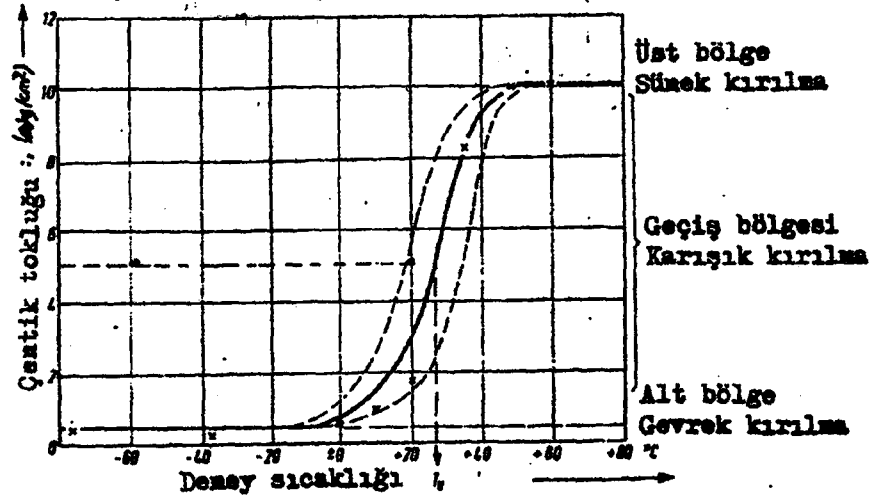
Çentiksiz (düz) çubuğun deney sonucunda daralan kırılma kesitine kıyasla yukarıda açıklanan gevrek çentikli yuvarlak çubuk kırılma öncesinde şekil değiştirmez ve kırılma sonrasında da hemen hemen ilk kesit değerine sahiptir. Çentikli çubuğun kırılma kesiti çentiksiz çubuğa karşılık daha fazla yük taşıyabilir. Yani çentikli çubuğun F_0 esas kesitine bağlı P_{max} / F_0 çekme mukavemeti, düz çubuğun çekme mukavemetinden daha yüksektir.



Şekil 2.7. Aynı malzemeden imal edilmiş ve eşit enine kesitli düz ve keskin çentikli deney çubukları (Srawley ve Brown 1965).

Çentiğin yüksek bir genleme engeli nedeniyle çentikli çubukta ölçülebilir bir kırılma büzülmesi tespit edilemez, bu ise malzemenin daha önce verilen tanıma uygun olarak gevrek davrandığını belirtir. Bu örnek, bir malzemenin geometrisine bağlı olarak sünek veya gevrek kırılma davranışı gösterebileceğini açıklar.

Belirli cinsten bir malzeme için sıcaklığa bağlı olarak çentik tokluğu ölçülürse, örnek olarak Şekil 2.8’de görülen bir Ferritik çelik (kübik kristalli) için hazırlanmış olan eğri elde edilir.



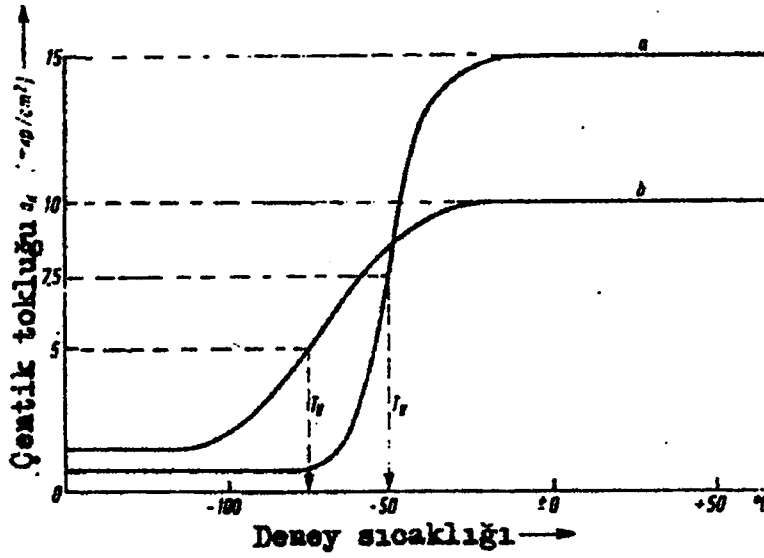
Şekil 2.8. Çentik tokluğunun sıcaklıkla değişimi (Srawley ve Brown 1965).

Büyük miktardaki plastik şekil değiştirmiş kırılma yüzeyi oranına sahip olan kırılma, eğrinin üst bölgesinde görülür (Sünek kırılma). Bu oran deney sonuçlarının fazlaca dağılım gösterdiği geçiş bölgesinde azalır (Karışık kırılma) ve eğrinin alt bölgesinde de tamamen yok olur. Burada pratik olarak % 100 gevrek kırılma görülür. Şekil 2.9, çentik darbe deneyinde -76°C 'den 60° 'ye kadar bir sıcaklık aralığında incelenerek elde edilen kırılma yüzeylerini göstermektedir. Artan sıcaklıkla birlikte kırılma yüzeyinin büyüyen plastik şekil değiştirme oranı açık olarak görülmektedir.

Yeterli sayıda deney yapılarak geçiş bölgesini belirten ortalama değer tayin edilebilir ve sıcaklığın neden olduğu gevrekleşme için karakteristik büyüklük olarak belirli bir çentik tokluk değerine karşılık gelen sıcaklık, geçiş sıcaklığı olarak tarif edilebilir.

Şekil 2.9'da aynı malzemeden imal edilmiş DVM-Deney Parçası ve Charpy-Keskin çentikli deney parçası ile elde edilen iki çentik tokluğu-sıcaklık eğrisi gösterilmiştir.

Geçiş sıcaklığı olarak, maksimum çentik tokluk değerinin yarısına tekabül eden sıcaklık esas alınmıştır.



Şekil 2.9. Çentik tokluğu-sıcaklık eğrisine deney parçası şeklinin etkisi

a) Charpy-Keskin çentikli deney parçası b) DVM deney parçası (Srawley ve Brown 1965).

K.Rühl (1959) tarafından, çeşitli ülkelerde standartlaştırılmış olan 17 farklı çentik deneyi birbiriyle karşılaştırılmış ve deney şartlarının deney sonuçları üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmaların sonuçlarına göre bütün deney yöntemleri, mevcut olan sıcaklık bölgesinde alt ve üst tokluk seviyeleri göstermektedir. Bununla beraber bu tokluk değerleri deney yöntemlerine bağlı olarak değişiktir ve bu nedenle tokluk değerleri bir malzeme sabiti olarak alınamaz (Rühl 1959).

Daha da öte, genel olarak aşağıdaki durumlarda geçiş sıcaklığının daha yüksek sıcaklıklara ötelendiği söylenebilir;

Çentik yarıçapının daha küçük olması

Parça genişliğinin daha büyük olması

Çekme hızının artması

Çentik deneyi sonuçlarından yapı elemanlarının gevrek kırılma davranışı hakkında hüküm vermeye çalışmanın zorlukları şunlardır; hiçbir deney parçası formunda muayene kesitinde gerilme durumunu tam yeterli belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle, çentik deneyinden elde edilen tokluk değerlerinin bir yapı elemanında mevcut olan gerilme durumunu ifade etmesi de mümkün değildir. Özellikle,

yüksek mukavemetli çeliklerden yapılmış yapı elemanlarında keskin çentiklerde ve hatalı yerlerde mevcut olan gerilme gevrekleşmesinden doğabilen hasarlar çentik deneyi sonuçları ile değerlendirilemez. Koşullar, yapı çeliklerinin sıcaklıkla gevrekleşmesinin tayini için daha uygun görünmektedir (Ewalds ve Wanhill 1985).

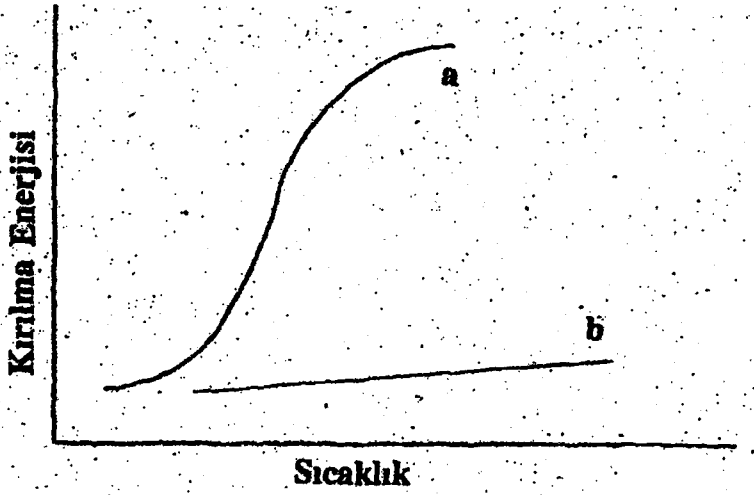
Gevrek kırılma davranışının araştırılması için gerçekleştirilen değişik deney yöntemlerinde de benzer zorluklar mevcuttur. Bunlara örnek olarak; Darbeli çekme deneyi, Darbeli bükme deneyi ve Düşme deneyi verilebilir.

1950'lerin ortalarında Irwin, kırılma mekaniğinde yeni bir çığır açmıştır: "Enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğerdir ". Buna göre, çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme yoğunluğu K_C veya enerji terimiyle G_C kritik değeri, bir malzeme özelliğidir.

G ve K 'nin eşdeğerliği, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) gelişmesine temel oluşturmuştur. Çünkü, bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman (tüm malzemeler için) aynıdır. Dolayısıyla, belirli standart numunelerle K_C 'yi belirlemek için yapılan deneyler sonucunda, gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlaması gibi kritik-altı çatlamaya olan hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM de , 1961'de Wells'in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar.

19. yüzyılda Endüstri Devrimi'nden sonra, başta demir ve çelik olmak üzere yapılarda metal kullanımında büyük ölçüde artış olmuştur. Ancak bununla beraber bu yapılarda oluşan hasarlardan dolayı büyük can kayıplarına yol açan kazalarda görülmüştür. Bu kazaların bir kısmından tasarım hataları sorumludur. Fakat zamanla gözlenmiştir ki malzeme içinde üretimden gelen hatalar çatlamayı başlatmakta ve yapı elemanları kırılmaktadır. Daha iyi üretim yöntemleri kullanılarak malzemelerin iç yapılarındaki bu hataların önlenmesi, oluşan hasarların sayısını kabul edilebilir düzeylere indirmiştir (Uğuz 1996).



Şekil 2.10. a) Çeliklerde ve b) Alüminyum alaşımlarında kırılma enerjisinin sıcaklıkla değişimi (Uğuz 1996).

Yeni bir kazaya yatkın yapılar devri kaynaklı tasarımların ortaya çıkmasıyla başlamıştır. Özellikle de II.Dünya Savaşı'nda müttefiklerin gemi ve tankerlerinde çok sayıda hasarlarla karşılaşmıştır. 2500 müttefik gemisinden 150'ye yakını ortadan ikiye bölünürken 700 tanesi de ciddi hasarlara uğramıştır. Bu arada birçok köprü ve diğer yapılarda hasar görmüştür. Bu hasarlar genellikle çok düşük gerilmeler altında ve hatta gemiler limanda demirlemişken oluştuğundan, bu konuda geniş araştırmalar yapılmış ve sonuç olarak kırılmaların gevrek ve bundan da malzemedeki hataların ve gerilme yığılmalarının sorumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca kullanılan çeliklerin gevrek kırılmaya, düşük sıcaklıklarda daha yatkın olduğu farkedilmiştir. Şekil 2.10'da şematik olarak görüldüğü gibi belirli bir geçiş sıcaklığının altında çelikler gevrek davranış göstermekte ve kırılma için gerekli enerji büyük ölçüde azalmaktadır (Uğuz 1996).

Günümüz üretim ve tasarım işlemleriyle, malzemenin uygun bir düşük geçiş sıcaklığına sahip olması ve kaynağın bu sıcaklığı yükseltmemesi sağlanarak gevrek kırılma olayı kaynaklı çelik yapılarda önlenmiştir.

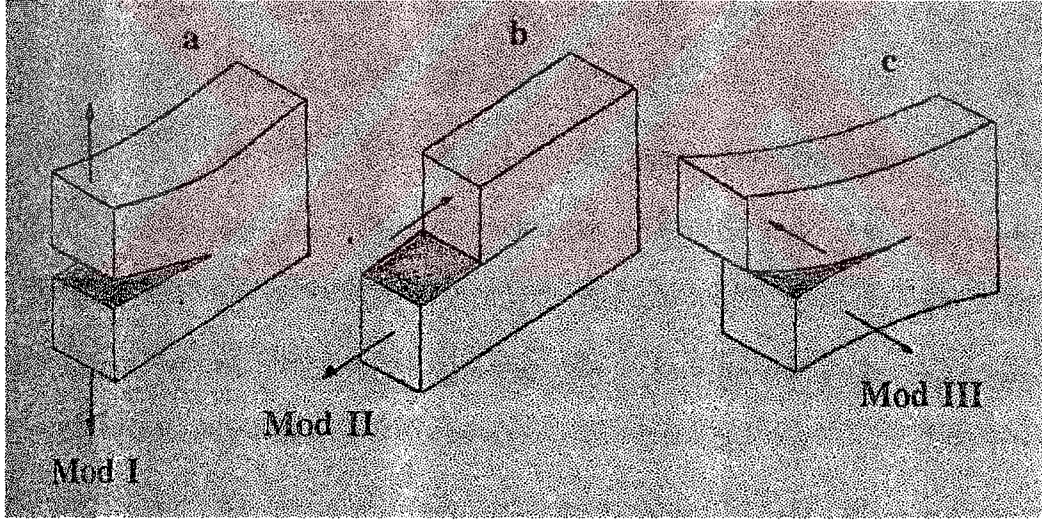
Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımlarının tarihçesine bakarsak; 1953'lerde kaynaklı çelik yapılar, 1944'den sonra yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, 1948'den sonra yüksek mukavemetli çelikler ve 1954'de titanyum alaşımları kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler çoğunlukla, uçaklarda olduğu gibi ağırlıktan kazanç sağlamak amacıyla tercih edilmişlerdir. Ağırlık kazancı ayrıca, gerilme analizi konusundaki gelişmeler sonucu tasarım iyileştirmeleriyle de sağlanmıştır. Gerçekte

gevrek olmayan bu yüksek mukavemetli malzemelerin kırılma enerjilerinin nispeten düşük olduğu ancak 1950'lerin sonlarına doğru farkedilmiştir. Yüksek mukavemetli malzemelerin kırılma enerjilerinin düşük olması modern kırılma mekaniğinin gelişmesi için bir teşvik niteliği taşımıştır.

2.2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

2.2.1.1. Elastik Gerilme Alanı

Çatlak ucu yakınındaki bütün gerilme sistemleri yüklemenin üç modundan çıkarılabilir. Birçok pratik durumlarda üstün gelen gerilme durumu Mod I olduğundan, elastik gerilme alanı denklemlerinin çıkarılması Mod I ile sınırlanmıştır. Şekil 2.11'de yüklemenin üç modu görülmektedir.



Şekil 2.11. Yüklemenin a) Çekme (açılma) modu (Mod I), b) Kayma modu (Mod II) c) Makaslama modu (Mod III) (Uğuz 1996).

Bu üç tip yükleme şekline uyan Gerilme Şiddet faktörleri I, II ve III indileriyle karakterize edilir. I nolu yükleme şekli, diğerlerinden fazla olan teknik öneminden dolayı en çok araştırılan zorlanma şeklidir. II nolu yükleme şekli çatlak düzlemine

paralel makaslama zorlanması halidir. III nolu yükleme şekli ise ince saçların çekme zorlanmasında (yırtilmasında) önemli rol oynar. II ve III nolu yükleme şekillerinde ise kırılma yüzeyleri birbirinden uzaklaşır ve bu nedenle ayrıca korozif bir ortamın mevcut olması halinde etkisi de kolaylaşır.

Çatlak bölgesindeki gerilme durumu, akma kriteri vasıtasıyla dikkate alınır. Gerilme durumları I, II ve III nolu yükleme şekillerinde (Şekil 2.11) değişik olduğundan, bu üç olayda gerilme şiddet faktörleri de değişik elde edilir. Pratik uygulamalar için karar vermeye yarayan en küçük K_C değeri şimdiye kadar daima I nolu yükleme şeklinde gözlenmiştir (Dieter 1988).

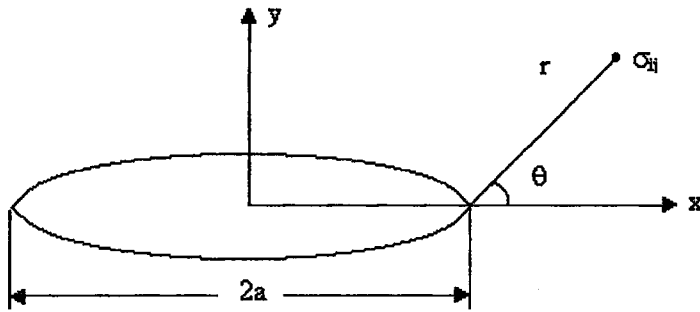
2.2.1.2. Gerilme Yoğunluk Faktörü

Gerilme yoğunluk faktörü K , çatlak ucun elastik alanının büyüklüğünü tanımlar. K ayrıca, çatlak ucu gerilme alanının elastik olması şartıyla, malzemelerde çatlak ilerleyişi ile kırılma davranışları arasındaki ilişkiyi belirler.

Irwin, bir çatlak civarındaki gerilmelerin;

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} f(\theta) + \dots \quad (2.11)$$

şeklinde verilebileceğini göstermiştir. Burada r ve θ , çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatlarını göstermektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Çatlak ucunda bir noktadaki gerilme.

K , elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve gerilme yoğunluk faktörü olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K 'nın gerilmeyle doğrusal olarak,

karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.12)$$

Şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$, numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Pratikte en çok Mod I gerilme durumu ile karşılaşıldığından gerilme yoğunluk faktörü çözümleri de genellikle Mod I için verilir ve K_I olarak ifade edilir (Uğuz 1996).

2.2.2. Gerilme ve Germe Arasındaki İlişkiler

2.2.2.1. Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değiştirme (Germe)

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z = 0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur (Uğuz 1996).

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içinde ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenini boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\epsilon_z = 0$). Bu durumda da düzlem germe hali söz konusudur.

Buraya kadar türetilen eşitlikler, düzlem gerilme ($\sigma_z = 0$) gözönüne alınarak yapılmıştır. Düzlem germe için σ_z elastik gerilmesi $\nu(\sigma_x + \sigma_y)$ 'ye eşittir (ν , Poisson oranı). $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ eşitliği, elastik gerilme-germe ilişkilerinden çıkarılabilir.

2.2.2.2. Elastik Gerilme-Germe İlişkileri

x yönündeki bir çekme kuvveti, bu eksen boyunca bir uzamaya sebep olurken y ve z yönünde bir kısaltmaya (büzülme) yol açar. Bu enine şekil değiştirmenin deneysel

olarak, boyunun şekil değiştirmenin sabit bir oranı kadar olduğu bulunmuştur ve buna da ν , Poisson oranı denir (Uğuz 1996).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{Hook kanunu}) \quad (2.13)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \epsilon_x = -\frac{\nu \sigma_x}{E} \quad (2.14)$$

ν 'nün bazı malzemeler için değerleri aşağıda verilmiştir:

Malzeme	ν (poisson oranı)
Tungsten	0,27
18-8 Paslanmaz çelik	0,28
Alüminyum	0,31
Basit karbonlu ve az alaşımlı Çelikler	0,33

Şekil değiştirmeleri üç eksen de gerilmeler yardımıyla Çizelge 2.1'deki gibi gösterebiliriz.

Çizelge 2.1. Üç Eksen de Gerilme Durumunda Şekil Değiştirmelerin Büyüklükleri.

Gerilme	x-yönünde Germe	y-yönünde germe	z-yönünde germe
σ_x	$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$	$\epsilon_y = -\frac{\nu \sigma_x}{E}$	$\epsilon_z = -\frac{\nu \sigma_x}{E}$
σ_y	$\epsilon_x = -\frac{\nu \sigma_y}{E}$	$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$	$\epsilon_z = -\frac{\nu \sigma_y}{E}$
σ_z	$\epsilon_x = -\frac{\nu \sigma_z}{E}$	$\epsilon_y = -\frac{\nu \sigma_z}{E}$	$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$

Bu tablo yardımıyla düzlem gerilmede:

$$\varepsilon_x = (1/E) [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = (1/E) [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_z = (1/E) [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

Düzlem şekil değiştirmede (germe) $\varepsilon_z = 0$ olduğundan;

$$\varepsilon_z = (1/E) [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.16)$$

ε_x ve ε_y (2.15.) eşitlikleri düzlem germe için;

$$\varepsilon_x = (1/E) [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \nu(\sigma_x + \sigma_y))]$$

$$\varepsilon_y = (1/E) [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \nu(\sigma_x + \sigma_y))]$$

ve tekrar düzenlenerek;

$$\varepsilon_x = (1/E) [(1-\nu^2)\sigma_x - \nu(1+\nu)\sigma_y]$$

$$\varepsilon_y = (1/E) [(1-\nu^2)\sigma_y - \nu(1+\nu)\sigma_x] \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_z = 0$$

elde edilir.

Düzlem gerilme durumunda $\sigma_z = 0$ olduğundan;

$$\sigma_x = E\varepsilon_x + \nu\sigma_y$$

$$\sigma_y = E\varepsilon_y + \nu\sigma_x$$

$$\sigma_x = E\varepsilon_x + \nu(E\varepsilon_y + \nu\sigma_x)$$

$$\sigma_y = E\varepsilon_x + \nu E\varepsilon_y + \nu^2\sigma_x$$

$$(1 - \nu^2)\sigma_x = E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$$

$$\sigma_x = (E/(1-\nu^2)) (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.18)$$

Aynı şekilde:

$$\sigma_y = E\varepsilon_y + \nu(E\varepsilon_x + \nu\sigma_y)$$

$$\sigma_x = (E/(1-\nu^2)) (\nu\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (2.19)$$

2.2.2.3. Asal Düzlemler ve Asal Gerilmeler

Herhangi bir gerilme durumunda, maksimum gerilmelerin olduğu ve hiç kayma gerilmelerinin oluşmadığı düzlemlere dik eksenleri olan yeni koordinat sistemleri tanımlamak mümkündür. Bu düzlemlere asal düzlemler, bu düzlemlere dik etkiyen gerilmelere de asal gerilmeler denir (Uğuz 1996).

İki eksenli, düzlem gerilme durumunda birbiriyle 90°'lik açı yapan iki asal gerilme vardır; σ_1 ve σ_2 . Üç eksenli gerilmenin genel durumunda σ_1 , σ_2 ve σ_3 olmak üzere üç tane asal gerilme vardır. Genelde σ_1 , cebirsel olarak en büyük asal gerilme, σ_3 ise en küçük asal gerilme olarak kabul edilir. Asal gerilmelerin yönleri 1, 2 ve 3 ile gösterilen eksenlerdir. Genelde asal eksenler, x, y ve z kartezyen koordinatlarıyla çakışmazlar ancak, pratikte karşılaşılan birçok durumda yükleme ve deformasyonun

simetrik olması nedeniyle bu iki sistemin $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ olduğu görülür. Asal gerilmelerin ve yönlerinin belirlenmesi, bir noktadaki gerilmenin durumunu tanımlamaya yarar.

Çizelge 2.2. Asal Gerilmelerin Büyüklüklerine Göre Gerilme Durumları.

Asal Gerilmeler	Gerilme Durumu
$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$	Üç eksenli (triaxial)
$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$	Hidrostatik
$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$, veya $\sigma_2 = \sigma_3 \neq \sigma_1 \neq 0$, veya $\sigma_1 = \sigma_3 \neq \sigma_2 \neq 0$	Silindirik
$\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ve $\sigma_3 \neq 0$, veya $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ve $\sigma_1 \neq 0$, veya $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ ve $\sigma_2 \neq 0$	Tek eksenli (uniaxial)
$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq 0$ ve $\sigma_3 = 0$, veya $\sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$ ve $\sigma_1 = 0$, veya $\sigma_1 \neq \sigma_3 \neq 0$ ve $\sigma_2 = 0$	İki eksenli (biaxial) Düzlem Gerilme

Genel olarak, eğer üç asal gerilme birbirinden farklı büyüklükteyse, gerilme durumu üç eksenli (triaxial) olarak adlandırılır. Eğer asal gerilmelerin üçü de birbirine eşitse hidrostatik gerilme söz konusudur. Eğer ikisi birbirine eşit üçüncüsü sıfırdan farklıysa silindirik, ikisi sıfırda tek eksenli (uniaxial), biri sıfırda iki eksenli (biaxial) gerilme durumu (daha genel anlamda düzlem gerilme) söz konusudur. Bu gerilme durumlarını Çizelge 2.2'deki gibi özetleyebiliriz.

2.2.2.4. Bir Noktadaki Gerilmeler

$\sigma_x = x$ yönünde etkiyen dik gerilme,

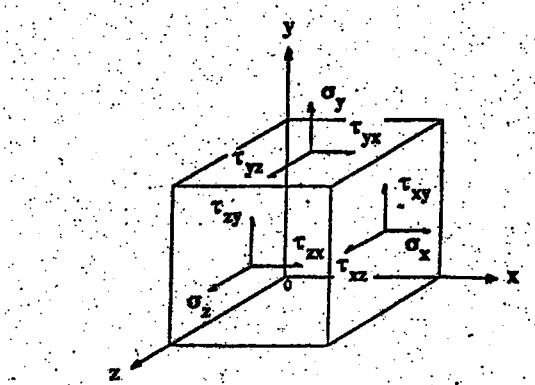
$\sigma_y = y$ yönünde etkiyen dik gerilme,

$\sigma_z = z$ yönünde etkiyen dik gerilme,

ve örneğin,

$\tau_{xy} = x$ eksenine dik düzlem üzerinde ve y yönünde etkiyen kayma gerilmesi,

τ_{yz} = y eksenine dik düzlem üzerinde ve z yönünde etkiyen kayma gerilmesi, olmak üzere, bir noktadaki gerilmeleri Şekil 2.13'deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 2.13 Bir noktadaki gerilmeler (Uğuz 1996).

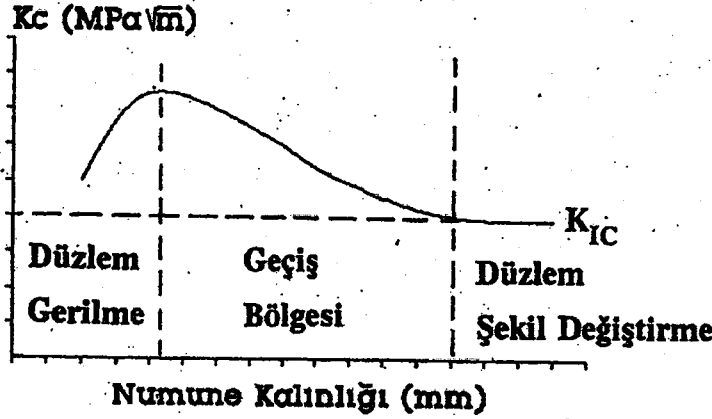
Görüldüğü gibi bir noktadaki gerilmeyi belirtmek için 9 değerin tanımlanması gerekir. Bunlar; σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} ve τ_{zy} 'dir. Birim kübün yüzeylerini çok küçük olarak kabul edersek bir yüzeydeki gerilmenin değişimi de ihmal edilebilir olacağından;

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Böylece bir noktadaki gerilmenin durumu 6 elemanla tanımlanabilir; 3 normal gerilme (σ_x , σ_y , σ_z) ve üç kayma gerilmesi (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz}).

2.3. Kırılma Tokluğu

Mod I gerilme yoğunluk faktörü (K_I) belirli geometrideki herhangi bir malzeme için belirli bir gerilme değerinde (veya yüklemde) sabittir, yani bir malzeme özelliği değildir. Ancak her malzeme belirli bir kritik gerilme değerinde (σ_c veya σ_f) kırılır. Malzemenin kırıldığı bu kritik gerilme değerinde ölçülen gerilme yoğunluğu o malzemenin kırılma tokluğu değerini verir ve düzlem germe durumunda K_{IC} ile gösterilir. Bu kırılma tokluğu değeri o malzemenin bir özelliğidir ve kullanılan hesaplama yöntemine bağlı olarak bir sabittir; ancak sıcaklığa, yükleme hızına ve numune kalınlığına bağlı olarak değişebilir (Uğuz 1996).



Şekil 2.14. Bir malzemenin numune kalınlığı K_C 'ye etkisinin şematik gösterilişi (Uğuz 1996).

Şekil 2.14' de K_C 'nin numune kalınlığına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Belirli bir numune kalınlığının altında, yani numunede düzlem gerilme durumu üstün olduğunda K_C sabit değildir ve numune kalınlığı ile değişim gösterir. Belirli bir kalınlığın üzerinde ise, yani düzlem gerilmenin üstün olduğu durumda, K_C sabit bir alt limite varır. Bu alt limit K_{IC} 'dir ve malzemenin düzlem germe kırılma tokluğu olarak adlandırılır.

Şekil 2.14'de görüldüğü gibi K_{IC} sabit bir minimum değer göstermektedir ve bu değer de bir malzeme özelliğidir. Böylece birçok yapısal malzeme için, akma ve çekme gerilmesi, sertlik, vb. mekanik özelliklerin saptandığı gibi, bir K_{IC} değerinin de saptanabileceği görülmüştür.

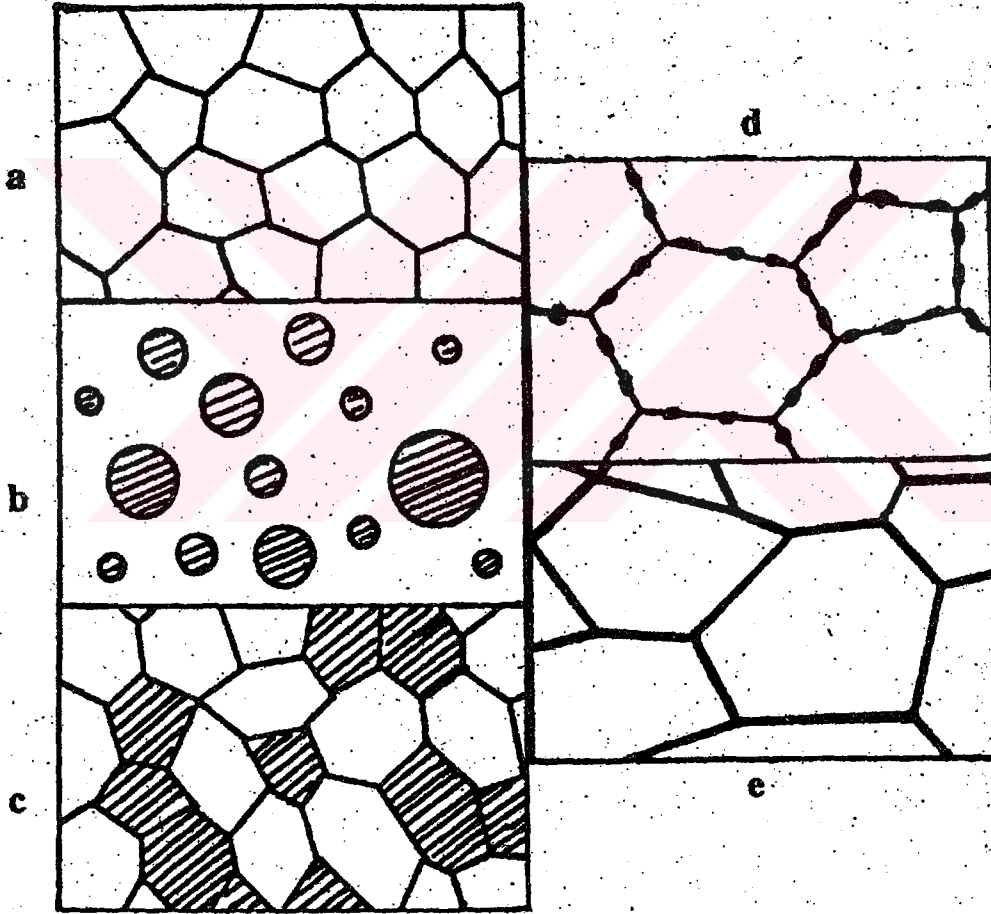
2.4. Kırılma Mekaniğinde Mikroyapının Önemi

Metalik malzemelerin çok çeşitli mikroyapılara sahip olmaları nedeniyle, mikroyapının çatlak ilerlemesi ve kırılmaya etkisini belirten sistematik ve genel olarak kabul edilmiş bir yöntem yoktur. Ancak, çatlak ilerlemesine mikroyapının etkisini irdeleyen birçok deneysel sonuçlar mevcuttur (Uğuz 1996).

2.4.1. Metalik Malzemelerin Mikroyapıları

Çok kristalli metalik malzemelerin en çok rastlanan mikroyapıları Şekil 2.15'deki gibidir. Beş ana mikroyapı aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- i) Tek fazlı çok – kristalli malzeme.
- ii) İki fazlı malzeme : α içinde β .
- iii) İki fazlı malzeme : α içinde yaklaşık aynı hacimsel orana sahip β .
- iv) Birinci fazın tane sınırlarında ikinci faz partikülleri.
- v) Birinci fazın tane sınırlarında ikinci fazın sürekli (film) oluşumu.



Şekil 2.15 Metalik malzemelerin bazı tip mikroyapıları; a) Tek fazlı çok – kristalli malzeme, b) İki fazlı malzeme : α içinde β , c) İki fazlı malzeme : α içinde yaklaşık aynı hacimsel orana sahip β , d) Birinci fazın tane sınırlarında ikinci faz partikülleri, e) Birinci fazın tane sınırlarında ikinci fazın sürekli oluşumu (Uğuz 1996).

2.4.2. Çatlak İlerleme Mekanizmaları

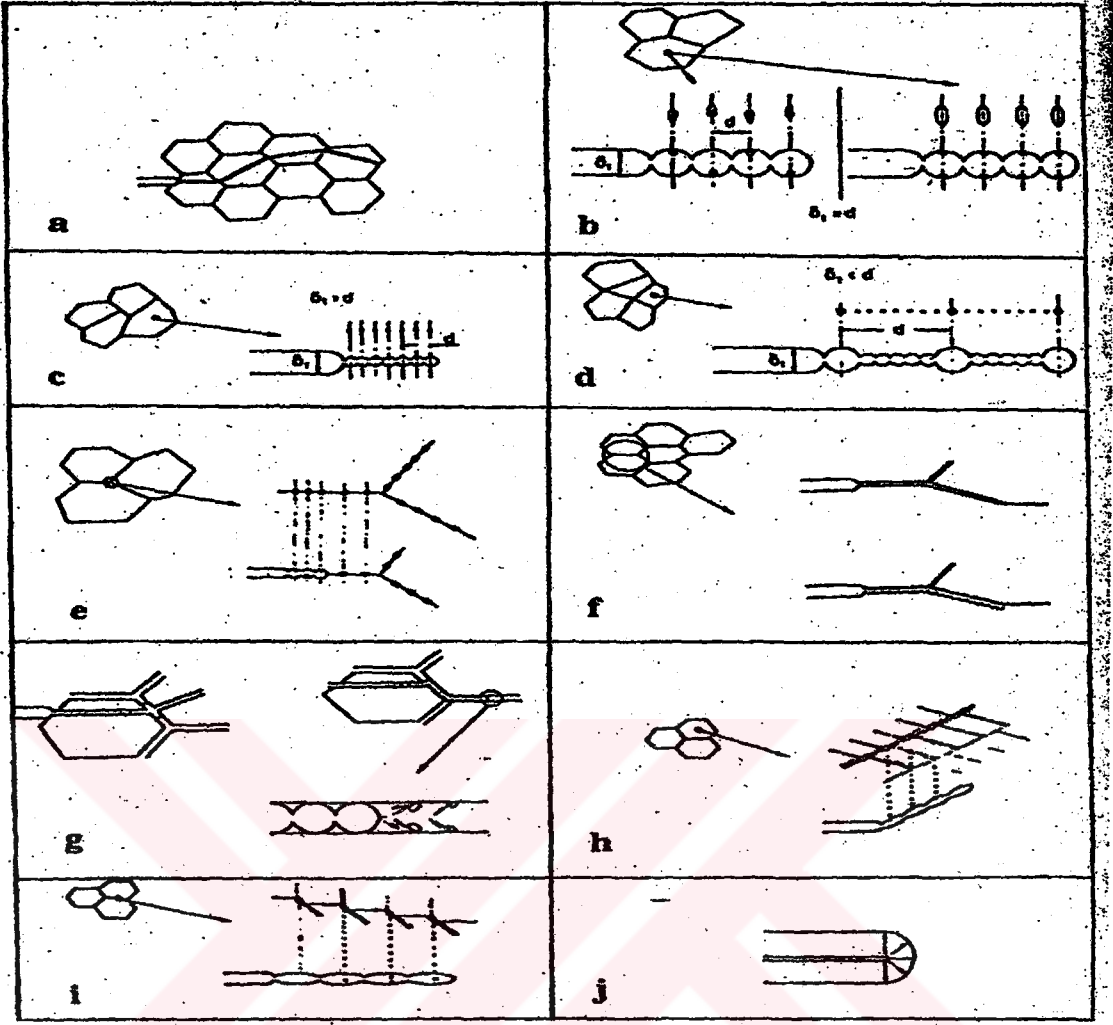
Bölüm 2.3.1 'de verilen mikroyapılar için çatlak ilerleme mekanizmaları Şekil 2.16 'da görüldüğü gibidir;

- i) Klivaj çatlak ilerlemesi.
- ii) Kaba partiküller nedeniyle mikroboşluk oluşumuyla kırılma.
- iii) İnce partiküller nedeniyle mikroboşluk oluşumuyla kırılma.
- iv) İnce ve kaba partiküller nedeniyle mikroboşluk oluşumuyla kırılma.
- v) Tane sınırı çökelti partikülleri nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi.
- vi) Tane sınırı sert faz filmi nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi.
- vii) Tane sınırı yumuşak faz filmi nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi.
- viii) Kayma düzlemi – kayma düzlemi etkileşimiyle çatlak ilerlemesi.
- ix) Kayma düzlem – tane sınırı etkileşimiyle çatlak ilerlemesi.
- x) Sadece plastik kütleşmeye bağlı çatlak ilerlemesi.

Bu kadar çok mekanizma, çatlak ilerlemesini modellemenin zorluğunu göstermektedir. Ayrıca her bir mekanizma lokal bir takım faktörlerle değişik bir mekanizmaya dönüşebilir. Bununda ötesinde bir malzeme içerisinde bu mekanizmalardan bir kaçının aynı anda etkin olmaya çalışması da olasıdır (Uğuz 1996).

Tüm bu zorluklara karşın belirli malzemeler için bazı sonuçlara varmak mümkündür;

- a) Düşük sıcaklık, yüksek deformasyon hızı ve üç eksenli gerilmeler, özellikle çeliklerde kırılmanın düşük enerjili klivaj mekanizmasıyla oluşmasına yol açarlar
- b) Taneler arası kırılmaya olan eğilim, tane sınırlarındaki sert partiküllerin adediyle artar.
- c) Yapı içerisinde niklüzyonların bulunması kırılma enerjisini azaltır.
- d) Özellikle alüminyum alaşımlarında tane sınırlarındaki yumuşak (çökelti bulunmayan) belge taneler arası kırılmanın sünekliğini etkiler.
- e) Yapı içerisindeki uyumsuz dispersoit partikülleri dislokasyonları tutarak slip homojenizasyonunu sağlar ve tokluğu artırır.
- f) Tane boyutunun küçülmesi tokluğu artırır.



Şekil 2.16. Çatlak ilerleme mekanizmaları (Uğuz 1996). a) Klivaj, b) Kaba partiküllerin mikroboşluk oluşturmaları, c) İnce partiküllerin mikroboşluk oluşturmaları, d) İnce ve kaba partiküllerin mikroboşluk oluşturmaları, e) Tane sınırı çökelti partikülleri nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi, f) Tane sınırı sert faz filmi nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi, g) Tane sınırı yumuşak faz filmi nedeniyle intergranüler çatlak ilerlemesi, h) Kayma düzlemi - kayma düzlemi etkileşimi, i) Kayma düzlemi - tane sınırı etkileşimi, j) Sadece plastik kütleşmeye bağlı çatlak ilerlemesi.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

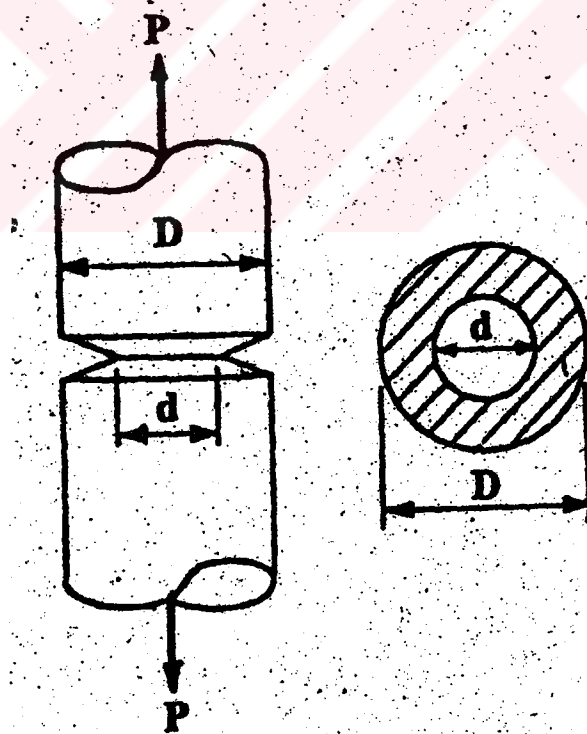
Deneyisel çalışmalarda kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Deneyde Kullanılan Alüminyum Alaşımın Kimyasal Bileşimi

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Ti	Al
5,68	2,56	1,72	0,32	0,29	0,25	0,21	0,14	Kalan

3.1. Çekme Deneyleri

Çentikli çekme deneyinde kullanılan deney numunesi Şekil 3.1 ’de verilmiştir. Bu çalışmada, çentik açıları 45° , 60° , 75° , çentik dibi derinliği 1 ve 2 mm, numune çapı (D) 7 mm şeklinde seçilmiştir.



Şekil 3.1. Çevresel çentikli silindirik çekme numunesi (Uğuz 1996).

3.2. Analiz Yöntemi

Bu çalışmada, numunenin modellenmesi ve analiz kısımları ANSYS 5.4 adlı programda yapılmıştır. Numune, malzemenin gerçek özellikleri ile tasarlanarak kırılma sonrası ölçüm değerleri alınmıştır ve deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

ANSYS analiz programda izlenen yollar şu şekilde anlatılabilir;

Prefences => Structural (Analiz tipi seçilir)
 Preprocessor => Element Type => Add/Edit/Delete => Add => Solid 42
 => Axisymmetric
 Material Props => Constant => Isotropic => EX (Elastisite Modülü)
 => NUXY (Poisson oranı)
 Preprocessor => Modelling => Create => Keypoints => In Active CS
 => Lines => Straight Line
 => Areas => Arbitrary => By Lines (Modelleme)
 Mesh Tool => Lines Set => Mesh (Sonlu elemanlarına ayırma)
 Solution => Loads => Apply => Displacement => Symmetric B.C => On Lines
 => Pressure => On lines (Kısıtlamalar ve yüklerin verilmesi)
 Analysis Type => New Analysis => Transient (Analiz tipi belirlenir)
 Analysis Options => Full
 Load Step Opts => Output Ctrls => Solu Printout => All items, Every Substep
 => DB Results File => Every Substep (Kontrol)
 => Nonlinear => Convergence Crit => Replace
 => Equilibrium Iter (iterasyon sayısı)
 => Time/Frequec => Time-Time Step
 => Time and Substeps (Kuvvetin uygulanma zamanı)
 Preprocessor => Material Props => Data Tables => Define/Active => BKIN
 => Edit Active (Akma gerilmesi)
 Solution => Solve => Current LS

Bu işlemlerden sonra bilgisayar, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapar ve sonuçları bulur. Sonuçlara bakarken de şu yollar izlenir;

General Postproc => First Set (İlk aşamada olan değişimleri gösterir)
 => Plot Results => Nodal Solu => Stress => VonMises (VonMises gerilmelerini gösterir).

=> Strain Plastic => Eqv Plastic ($\epsilon_{\text{plastik}}$ değerlerini verir).

=> Stress => PlasEqvStrs (Akma'nın başlayıp başlamadığını gösterir).

=> Stress => Stress Ratio (Gerilmelerin, nominal gerilmeye oranını verir).

Boyutlar "mm" cinsinden, gerilmeler ise "N/mm²" cinsindendir.

Numuneler; 45°, 60°, 75° çentik açısı ve 1mm.-2mm. çentik derinliğinde modellenmiştir. Bu numunelere, zamana bağlı olarak yük verilmiş ve çekme deneyi uygulanmıştır.

Numuneye, zamana bağlı bir kuvvet uygulanmıştır. 60 sn. içinde, malzemenin kritik zamanları tespit edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Parçayı üç boyutlu yerine iki boyutlu modellememizin amacı, gerilmeleri daha iyi bir şekilde görebilmek ve bilgisayarda daha hızlı çözüm yapabilmek içindir. Bu nedenle numuneyi, iki boyuta indirgeyerek yerine geçen eş bir sistemle de kolayca analiz edebiliriz. Axisymmetric ve symmetry boundary conditions komutlarını bu amaç için kullandık. Gerekli veriler girildikten sonra parça, "mesh" denilen işlem yapılarak sonlu elemanlara ayrıldı, çözüm yapıldı ve gerilme değerleri bulundu. Von Mises gerilmeleri, Plastik Şekil Değiştirme Gerilmeleri ve Gerilme oranları grafikleri elde edilmiştir edilerek incelendi.

4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Çentikli Çekme ve Çentik Hassasiyeti

Alaşımın çekme gerilmesinin 594 MPa olduğu yapılan deneylerle belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Bununla birlikte çevresel çentikli numunenin çentiğin enine kesitinde maksimum yük dağılımı ile sağlanan mukavemeti çentiksiz çekme numunelerinden daha yüksektir (Çizelge 4.2). Deneysel olarak bulunan sonuçlar ise Çizelge 4.3 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Malzemenin mekanik özellikleri (Uğuz ve Bayram 1999)

Sertlik (R_B)	σ_{ys} (Mpa)	σ_{UTS} (Mpa)	% Uzama
82	520	594	10,5

Çizelge 4.2. ANSYS analiz programından elde edilen sonuçlar

Çentik Açısı°	45		60		75	
Çentik Derinliği (mm)	1	2	1	2	1	2
Çentik Muk. (MPa)	710	916	636	914	842	1145
NSR	1,36	1,76	1,22	1,75	1,61	2,2
K_C (MPa $\sqrt{m}$)	27,1	30,3	24,3	30,2	32,1	37,9

Çizelge 4.3. Deney yoluyla elde edilen sonuçlar (Uğuz ve Bayram 1999)

Çentik Açısı°	45		60		75	
Çentik Derinliği (mm)	1	2	1	2	1	2
Çentik Muk. (MPa)	638	748	741	845	685	858
NSR	1,07	1,26	1,25	1,42	1,15	1,44
K_C (MPa $\sqrt{m}$)	24,4	24,9	28,3	28,0	26,1	27,8

Malzeme sünekliğe sahip olduğundan çentikte plastik zorlama meydana gelir. Numunede belirli miktarda plastik deformasyon meydana geldiğinde üç eksenli gerilme durumunun sonucu olarak çekme çubuğunun boyun bölgesinde plastik zorlama olduğu görülmüştür. Numunenin boyun vermemiş bölgeleri boyun veren bölgeden daha düşük gerçek gerilme sağlarlar ve buna göre boyundaki malzemenin yan büzülmesini kısıtlar. Çentikli kesitteki gerilme akma mukavemetine ulaştığında daralmış kesitteki malzeme yükleme eksenine paralel olarak plastik gerilmeye zorlanır. Fakat numunenin diğer kısmını elastik gerilme etkilediğinde daha kuvvetlenir. Diğer önemli iki açıklamada çekme gerilmesinin artması, plastik deformasyonu başlatmak için gerekli eksenel gerilmeyi sağlar. Bu, çentik örneklerindeki yüksek çekme mukavemetinin nedenidir. Çentik ne kadar derin olursa plastik zorlama ve numunenin deformasyonu o kadar büyük ve eksenel gerilme yüksek olur. Çentik dibi bir çatlak etkisi yapmakta olup bu bölgede lokal bir deformasyon söz konusudur. Gerilme esnasında çentik dibinde hasar başlayacaktır ve malzeme kırılmaya gidecektir. Bu nedenle sünek bir malzeme daha az sünek olan malzemeye göre deformasyona daha fazla cevap verecektir.

Çentik hassasiyeti, çentik gerilmesi oranı (NSR) olarak belirlenebilir (Dieter 1988).

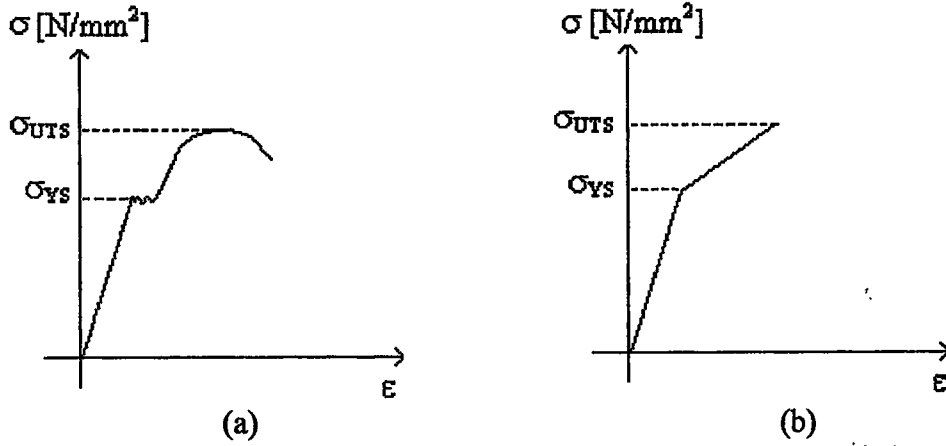
$$NSR = \frac{\sigma_{NS}}{\sigma_{UTS}} \quad (NSR = \text{Notch-strength ratio}) \quad (4.1)$$

Çentik hassasiyetinin değerleri 1'den daha büyük ise malzeme önemli ölçüde plastik özellik gösterir ve 1'den küçük ise malzeme kırılındır. Bizim sonuçlarımızda da NSR değerleri 1'den büyük çıkmıştır, bu da malzemenin sünek olduğunu gösterir.

Deneysel sonuçlar ile analiz sonucu elde edilen sonuçların benzerlik gösterdiği Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de görülmüştür. Ancak oluşan farklar çok çeşitli sebeplerden meydana gelmektedir. Bunların en önemlilerinden biri σ - ϵ diyagramlarının farklılık göstermesidir. ANSYS programında parabolik fonksiyonlar ifade edilemediği için gerçekte aralarında farklar oluşmaktadır. Şekil 4.1'de gerçek diyagram (a) ile ANSYS'in çözüm yaparken kullandığı diyagram (b) arasındaki fark açıkça görülmektedir.

Akma sınırı aşıldıktan sonra gerilme değerlerinde hafif düşüşler ve tekrar yükselmeler görülebilir. Bu olaya malzemenin "pekleşmesi" denir (Akkurt 1990). Buna

örnek olarak da, analiz sonucunda 45° çentik açısı ve 1mm çentik derinliğinde, 30-31-32-33 ve 34'üncü saniyelerde elde edilen gerilme dağılımı grafikleri gösterilebilir.



Şekil 4.1. σ - ϵ diyagramları a) Deney sonucu bulunan b) Bilgisayarda hesaplanan

4.2. Kırılma Tokluğu

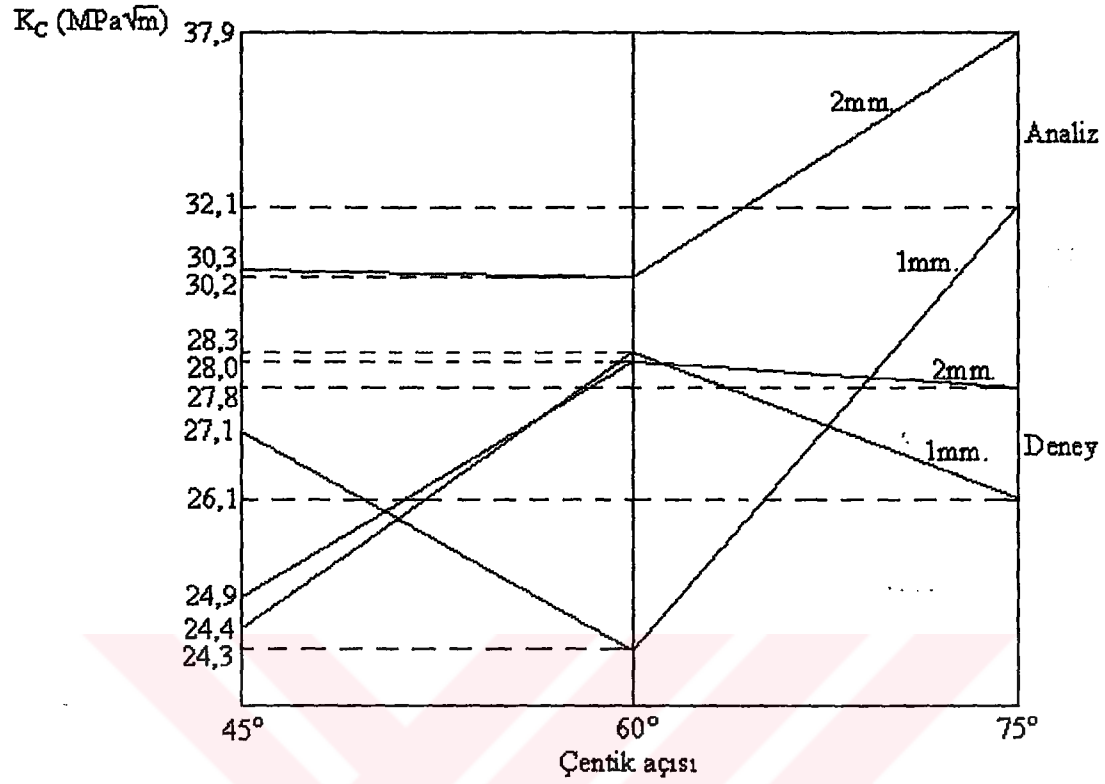
Alaşımların kırılma tokluğu değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (Dieter 1988).

$$K_C = \frac{P_F}{D^{3/2}} [1,72(D/d) - 1,27] \quad (4.2)$$

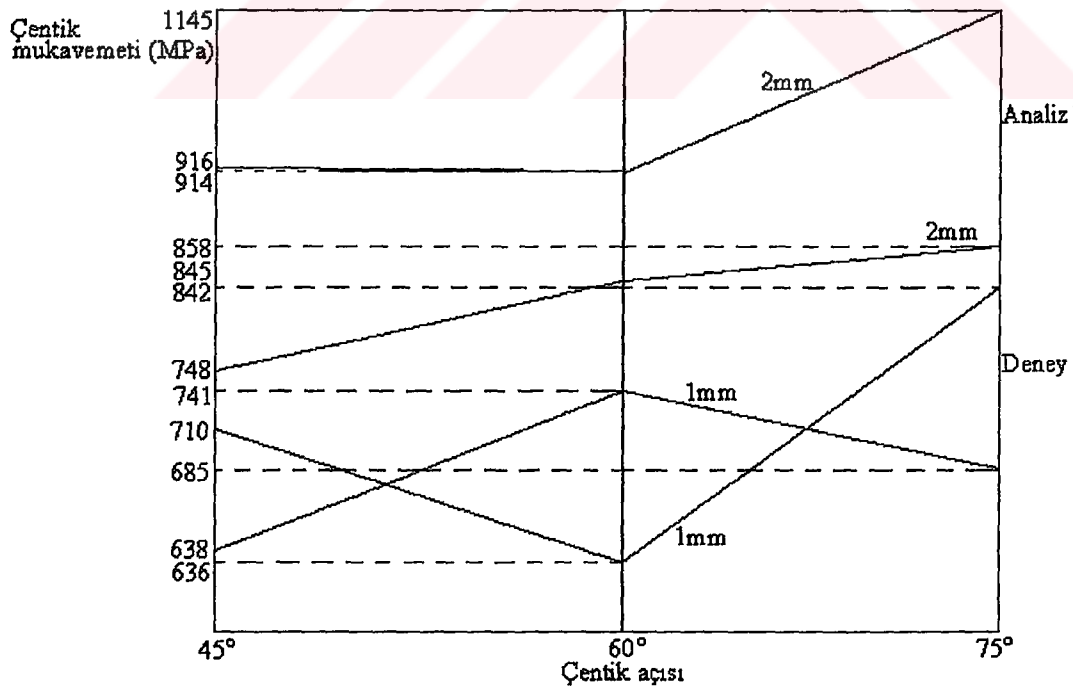
Burada D numune çapı, d çentik kesitinin çapı, P_F ise kırılma yüküdür. Analiz sonucu ve deneyler sonucu bulunan kırılma tokluğu değerleri Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmişti.

Çentik derinliği arttıkça kırılma tokluğunun artması ince numunelerde yüksek plastik sınırlama nedeniyledir. Çentik açısının artmasıyla kırılma tokluğu değerlerinin artması izahı şu şekilde ifade edilebilir: Çentik açısı küçüldükçe çentik ucu daha sivri oluyor. Bu sivri uç daha küçük bir plastik bölge anlamındadır. Bu da daha küçük kırılma tokluğu demektir (Ewalds ve Wanhill 1985).

Çentik derinliği ve çentik açısına bağlı olarak, kırılma tokluğu ve çentik mukavemeti grafikleri şu şekildedir:



Şekil 4.2. Kırılma tokluğu değerinin, çentik açısı ve derinliği ile ilişkisi.



Şekil 4.3. Çentik mukavemetinin, çentik açısı ve derinliği ile ilişkisi.

4.3. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafiklerin Yorumları

a) 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.7-4.17 arası);

Numuneye uygulanan çekme sırasında, 28. saniyeye kadar plastik şekil değiştirme gözükmemektedir. 28. saniyede akma sınırının aşılmasıyla plastik şekil değişimi başlamıştır. Ayrıca burada, akma sınırı aşıldıktan sonra gerilme değerinde hafif düşüşler ve yükselmeler de görülmektedir (28.-34. saniyeler arası). 50. saniyede de kritik bölge oluşmuş ve bu değerler maksimum gerilme değerleri kabul edilmiştir.

b) 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.18-4.22 arası);

27. saniyede akma sınırının aşılmasıyla birlikte, plastik şekil değiştirme 28. saniyede başlamaktadır. 49. saniyede de kritik değere ulaşılmıştır.

c) 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.23-4.27 arası);

Burada 22. saniyede plastik değişimi başlamıştır. 51. saniyede de kritik değere ulaşılmıştır.

d) 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.28-4.32 arası);

Burada, 45° açısı ve 1mm. çentik derinliğindeki numuneye göre akma daha erken başlamaktadır (10.saniye). Gerilme de daha yüksektir. 26. saniyede de kritik noktaya gelmiştir.

e) 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.33-4.37 arası);

Akma, 10. saniyede başlamaktadır, 26. saniyede de kritik değerler aşılmıştır.

f) 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.38-4.45 arası);

Akma ve kritik değerlerin haricinde stress ratio'lar da verilmiştir. Akma öncesi hepsi 1'den küçük, fakat akmanın başladığı 11.saniyede çentik ucunda stress ratio değeri 1'i aşmıştır (Stress Ratio: gerilmelerin, nominal gerilmeye oranı şeklinde tanımlanabilir).

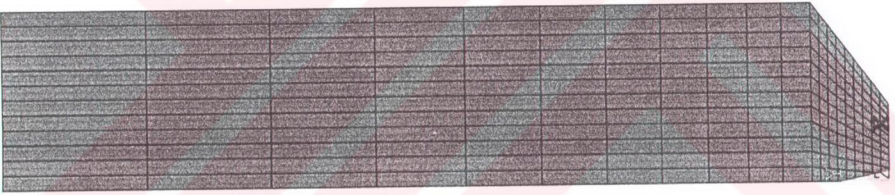
Şekil 4.4'te numunenin üç boyutlu görünüşü, Şekil 4.5'te numunenin mesh yapılmış üç boyutlu görünüşü, Şekil 4.6'da numunenin iki boyutlu mesh yapılmış görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.4. Numunenin 3 boyutlu görünüşü.

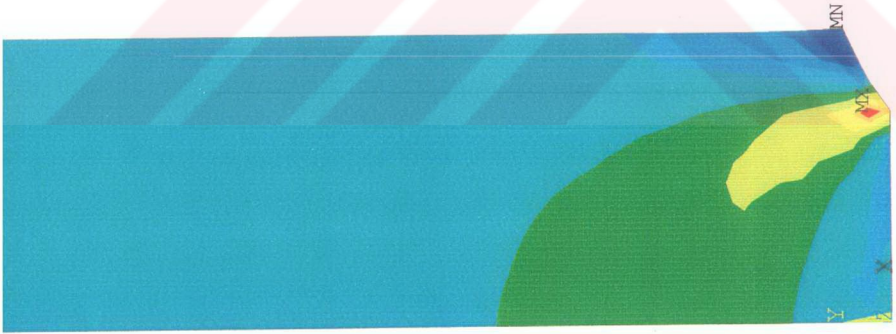


Şekil 4.5. Numunenin mesh yapılmış 3 boyutlu görünüşü.



Şekil 4.6. Numunenin mesh yapılmış 2 boyutlu görünüşü.

JUN 20 1999
 00:13:19
 NODAL SOLUTION
 TIME=27
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.059342
 SMN =45.355
 SMX =512.067
 45.355
 97.212
 149.069
 200.926
 252.783
 304.64
 356.497
 408.353
 460.21
 512.067



Şekil 4.7. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 11:33
 00:18:13
 NODAL SOLUTION
 TIME=28
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.061541
 SMN =47.044
 SMX =515.24
 47.044
 99.065
 151.087
 203.109
 255.131
 307.152
 359.174
 411.196
 463.218
 515.24



Şekil 4.8. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 00:22:18
 NODAL SOLUTION
 TIME=28
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.061541
 SMN =520
 SMX =522.641
 520
 520.293
 520.587
 520.88
 521.174
 521.467
 521.761
 522.054
 522.348
 522.641



Şekil 4.9. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 00:27:01
 NODAL SOLUTION
 TIME=29
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.063741
 SMN =48.732
 SMX =518.488
 48.732
 100.927
 153.122
 205.317
 257.512
 309.708
 361.903
 414.098
 466.293
 518.488



Şekil 4.10. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (29. saniye).

JUN 20 1999
 00:32:00
 NODAL SOLUTION
 TIME=30
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.06594
 SMN =50.42
 SMX =521.811
 50.42
 102.797
 155.174
 207.551
 259.927
 312.304
 364.681
 417.058
 469.435
 521.811



Şekil 4.11. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (30. saniye).

JUN 20 1999
 00:36:41
 NODAL SOLUTION
 TIME=31
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.068147
 SMN =52.206
 SMX =518.195
 52.206
 103.983
 155.759
 207.536
 259.312
 311.089
 362.865
 414.642
 466.418
 518.195



Şekil 4.12. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (31. saniye).

JUN 20 1999
 00:41:26
 NODAL SOLUTION
 TIME=32
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.070354
 SMN =53.993
 SMX =514.619
 53.993
 105.174
 156.354
 207.535
 258.716
 309.896
 361.077
 412.257
 463.438
 514.619



Şekil 4.13. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (32. saniye).

JUN 20 1999
 00:45:39
 NODAL SOLUTION
 TIME=33
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.07256
 SMN =55.78
 SMX =511.085
 55.78
 106.37
 156.959
 207.548
 258.138
 308.727
 359.317
 409.906
 460.495
 511.085



Şekil 4.14. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (33. saniye).

ANSYS 5.4
 JUN 20 1999
 00:55:55
 NODAL SOLUTION
 TIME=34
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.074769
 SMN =57.653
 SMX =521.984
 57.653
 109.245
 160.837
 212.43
 264.022
 315.614
 367.207
 418.799
 470.391
 521.984



Şekil 4.15. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, Von-Mises gerilmeleri (34. saniye).

JUN 20 1999
 00:58:27
 NODAL SOLUTION
 TIME=50
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.110867
 SMN =94.979
 SMX =710.582
 94.979
 163.379
 231.78
 300.18
 368.58
 436.981
 505.381
 573.781
 642.182
 710.582



Şekil 4.16. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 00:58:57
 NODAL SOLUTION
 TIME=50
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.110867
 SMN =520
 SMX =754.677
 520
 546.075
 572.15
 598.226
 624.301
 650.376
 676.451
 702.526
 728.601
 754.677



Şekil 4.17. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 01:20:24
 NODAL SOLUTION
 TIME=27
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.059404
 SMN =35.595
 SMX =386.886
 35.595
 74.627
 113.66
 152.692
 191.724
 230.757
 269.789
 308.821
 347.854
 386.886



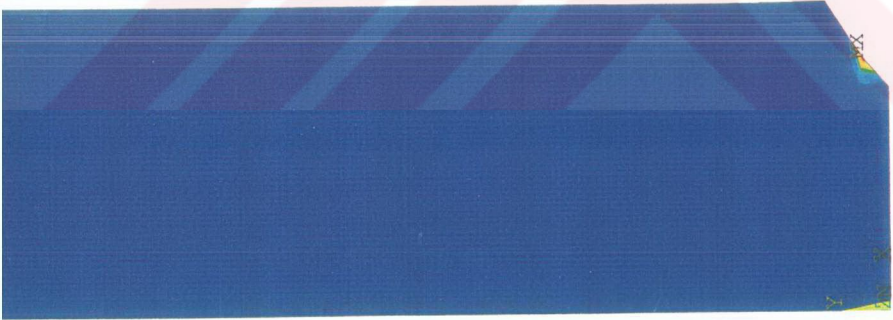
Şekil 4.18. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 01:24:38
 NODAL SOLUTION
 TIME=28
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.061606
 SMN =36.981
 SMX =401.027
 36.981
 77.43
 117.88
 158.329
 198.779
 239.229
 279.678
 320.128
 360.577
 401.027



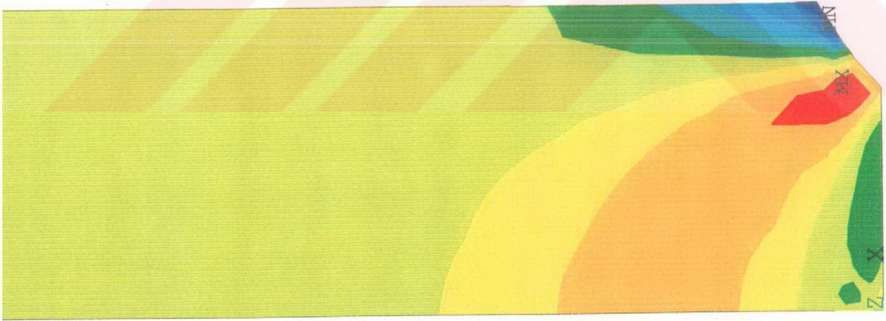
Şekil 4.19. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 01:25:37
 NODAL SOLUTION
 TIME=28
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.061606
 SMN =520
 SMX =524.38
 520
 520.487
 520.973
 521.46
 521.947
 522.434
 522.92
 523.407
 523.894
 524.38



Şekil 4.20. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 01:29:12
 NODAL SOLUTION
 TIME=49
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.108652
 SMN =79.207
 SMX =636.302
 79.207
 141.106
 203.006
 264.905
 326.805
 388.704
 450.604
 512.503
 574.403
 636.302



Şekil 4.21. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 01:29:33
 NODAL SOLUTION
 TIME=49
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.108652
 SMN =520
 SMX =669.523
 520
 536.614
 553.227
 569.841
 586.455
 603.068
 619.682
 636.296
 652.909
 669.523



Şekil 4.22. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 02:15:10
 NODAL SOLUTION
 TIME=21
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.046341
 SMN =41.639
 SMX =439.617
 41.639
 85.859
 130.079
 174.299
 218.518
 262.738
 306.958
 351.178
 395.398
 439.617



Şekil 4.23. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 02:15:34
 NODAL SOLUTION
 TIME=22
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.048553
 SMN =43.623
 SMX =435.555
 43.623
 87.171
 130.719
 174.267
 217.815
 261.363
 304.911
 348.459
 392.007
 435.555



Şekil 4.24. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

ANSYS 5.4
 JUN 20 1999
 02:15:49
 NODAL SOLUTION
 TIME=22
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.048553
 SMN =520
 SMX =527.349
 520
 520.817
 521.633
 522.45
 523.266
 524.083
 524.899
 525.716
 526.532
 527.349



Şekil 4.25. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 02:13:57
 NODAL SOLUTION
 TIME=51
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.113954
 SMN =113.651
 SMX =842.376
 113.651
 194.621
 275.59
 356.56
 437.529
 518.498
 599.468
 680.437
 761.407
 842.376



Şekil 4.26. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 02:14:35
 NODAL SOLUTION
 TIME=51
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.113954
 SMN =520
 SMX =852.631



Şekil 4.27. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 02:45:52
 NODAL SOLUTION
 TIME=9
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.024244
 SMN =5.349
 SMX =424.152



Şekil 4.28. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 02:50:20
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.026953
 SMN =6.049
 SMX =437.395
 6.049
 53.976
 101.903
 149.831
 197.758
 245.685
 293.613
 341.54
 389.467
 437.395



Şekil 4.29. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 02:50:49
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.026953
 SMN =520
 SMX =537.139
 520
 521.904
 523.809
 525.713
 527.617
 529.521
 531.426
 533.33
 535.234
 537.139



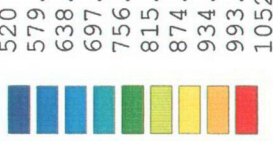
Şekil 4.30. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 02:58:58
 NODAL SOLUTION
 TIME=26
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.071711
 SMN =33.748
 SMX =916.186
 33.748
 131.797
 229.845
 327.894
 425.943
 523.991
 622.04
 720.088
 818.137
 916.186



Şekil 4.31. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 02:59:21
 NODAL SOLUTION
 TIME=26
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.071711
 SMN =520
 SMX =1052



Şekil 4.32. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 03:16:18
 NODAL SOLUTION
 TIME=9
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.024285
 SMN =18.48
 SMX =412.159
 18.48
 62.222
 105.964
 149.706
 193.448
 237.191
 280.933
 324.675
 368.417
 412.159



Şekil 4.33. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 03:27:07
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.027001
 SMN =20.541
 SMX =438.718
 20.541
 67.005
 113.469
 159.933
 206.397
 252.862
 299.326
 345.79
 392.254
 438.718



Şekil 4.34. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 03:18:36
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.027001
 SMN =520
 SMX =535.172



Şekil 4.35. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999

03:31:40

NODAL SOLUTION

TIME=26

SEQV (AVG)

PowerGraphics

EFACET=1

AVRES=Mat

DMX =.071881

SMN =59.76

SMX =914.603

59.76

154.743

249.725

344.708

439.69

534.673

629.655

724.638

819.62

914.603



Şekil 4.36. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 03:32:22
 NODAL SOLUTION
 TIME=26
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.071881
 SMN =520
 SMX =962.878
 520
 569.209
 618.417
 667.626
 716.835
 766.043
 815.252
 864.461
 913.669
 962.878



Şekil 4.37. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

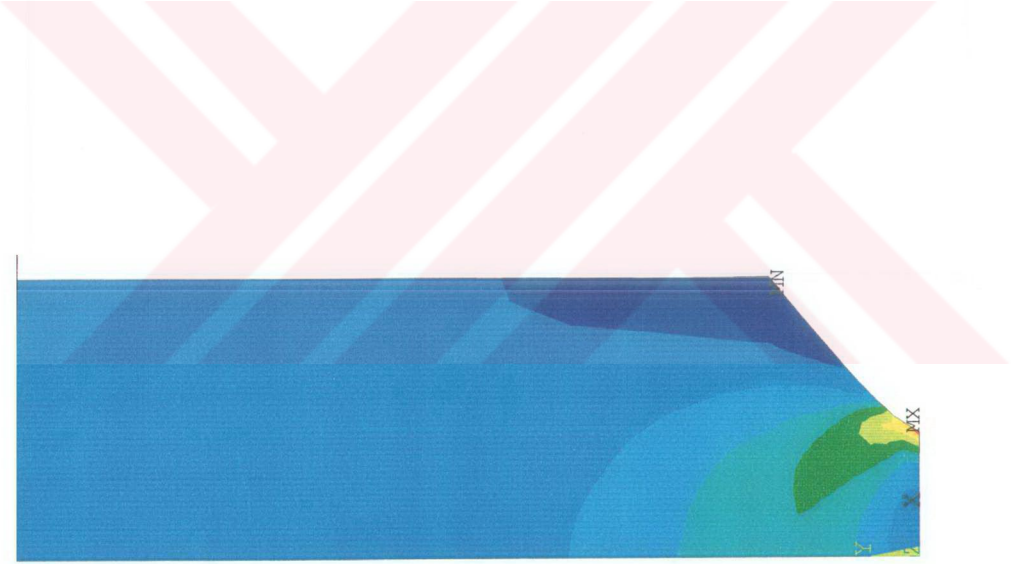
JUN 20 1999
 03:51:39
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.027075
 SMN =27.906
 SMX =495.777

27.906
79.892
131.877
183.863
235.849
287.835
339.82
391.806
443.792
495.777



Şekil 4.38. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 04:12:45
 NODAL SOLUTION
 TIME=10
 NLSRAT (AVG)
 DMX =.027075
 SMN =.058404
 SMX =.914559
 .058404
 .153533
 .248661
 .343789
 .438918
 .534046
 .629174
 .724303
 .819431
 .914559



Şekil 4.39. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, akma başlamadan önceki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).

JUN 20 1999
 04:13:57
 NODAL SOLUTION
 TIME=11
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.029784
 SMN =30.697
 SMX =522.93
 30.697
 85.39
 140.082
 194.775
 249.467
 304.16
 358.852
 413.545
 468.238
 522.93



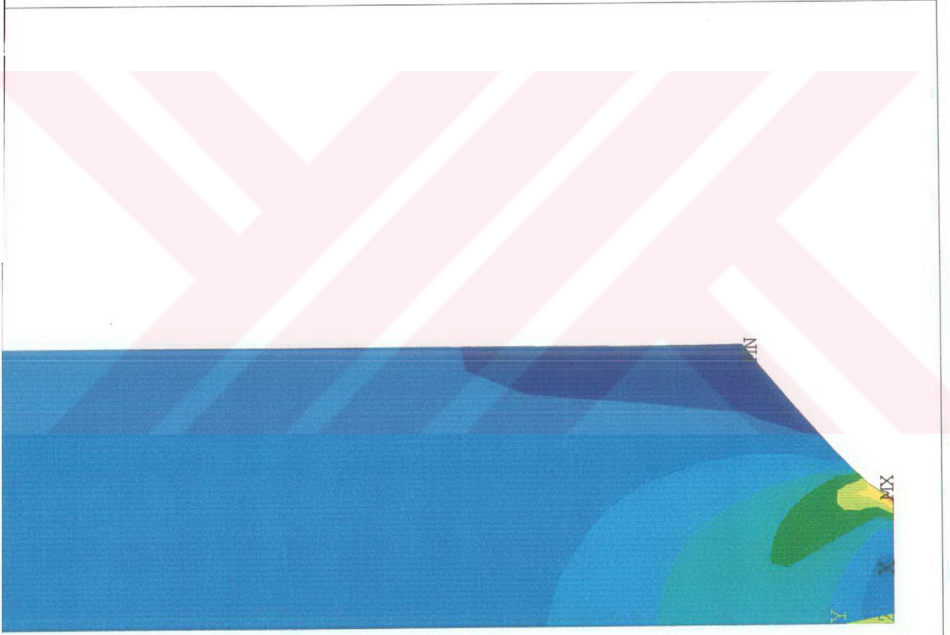
Şekil 4.40. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 04:14:12
 NODAL SOLUTION
 TIME=11
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.029784
 SMN =520
 SMX =540.78



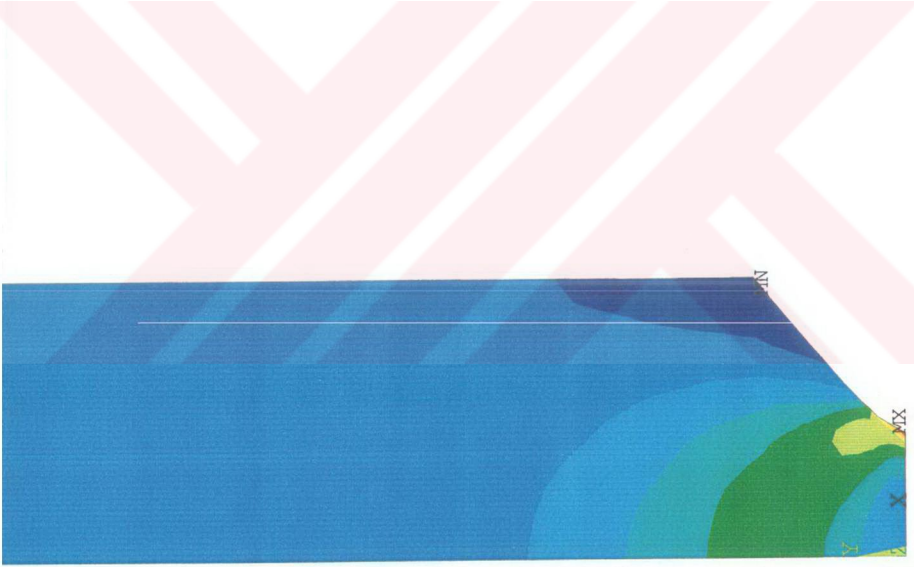
Şekil 4.41. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 04:14:27
 NODAL SOLUTION
 TIME=11
 NLSRAT (AVG)
 DMX =.029784
 SMN =.064245
 SMX =1.018
 .064245
 .170228
 .276211
 .382194
 .488177
 .594161
 .700144
 .806127
 .91211
 1.018



Şekil 4.42. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, akma başladığı andaki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).

JUN 20 1999
 04:29:44
 NODAL SOLUTION
 TIME=27
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.075071
 SMN =82.798
 SMX =1145
 82.798
 200.876
 318.953
 437.03
 555.107
 673.184
 791.262
 909.339
 1027
 1145



Şekil 4.43. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Von-Mises gerilmeleri.

JUN 20 1999
 04:30:11
 NODAL SOLUTION
 TIME=27
 NLSEPL (AVG)
 DMX =.075071
 SMN =520
 SMX =1146
 520
 589.552
 659.105
 728.657
 798.21
 867.762
 937.315
 1007
 1076
 1146



Şekil 4.44. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki plastik şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri.

JUN 20 1999
 04:30:27
 NODAL SOLUTION
 TIME=27
 NLSRAT (AVG)
 DMX =.075071
 SMN =.172711
 SMX =1.527
 .172711
 .323241
 .47377
 .6243
 .774829
 .925359
 1.076
 1.226
 1.377
 1.527



Şekil 4.45. 75° çentik açısı ve 2 mm. çentik derinliğinde, kırılma anındaki Stress-Ratio değerleri (gerilmelerin nominal gerilmeye oranı).

Yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlara göre zamana bağlı olarak maksimum gerilmelerin diyagramları ile σ - ϵ diyagramları çizilmiştir. Burada;

a) 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.46);

Zamana bağlı olarak maksimum çentik gerilmesi ve kritik bölge gerilmesi verilmiştir. Gerilmeler N/mm^2 , zaman ise saniye cinsindendir.

b) 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.47);

Burada da görüldüğü gibi kritik bölgedeki gerilmeler, çentik ucundaki gerilmelerden daha yüksektir.

c) 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.48);

Zamana bağlı maksimum gerilmeler verilmiştir.

d) 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.49);

Çentik ucu gerilmesi ve kritik bölge gerilmesi verilmiştir.

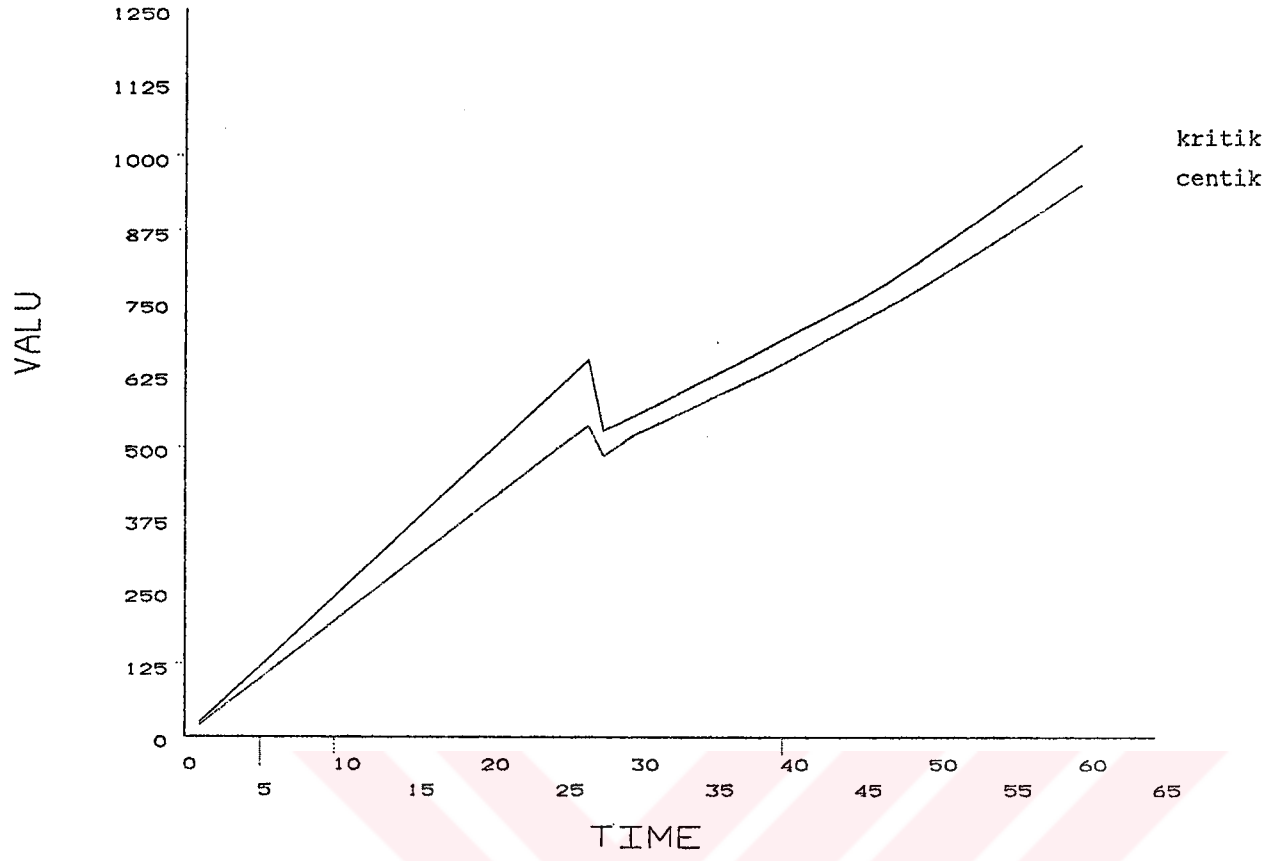
e) 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.50);

Zamana bağlı olarak maksimum çentik ucu gerilmesi ve kritik bölge gerilmesi verilmiştir.

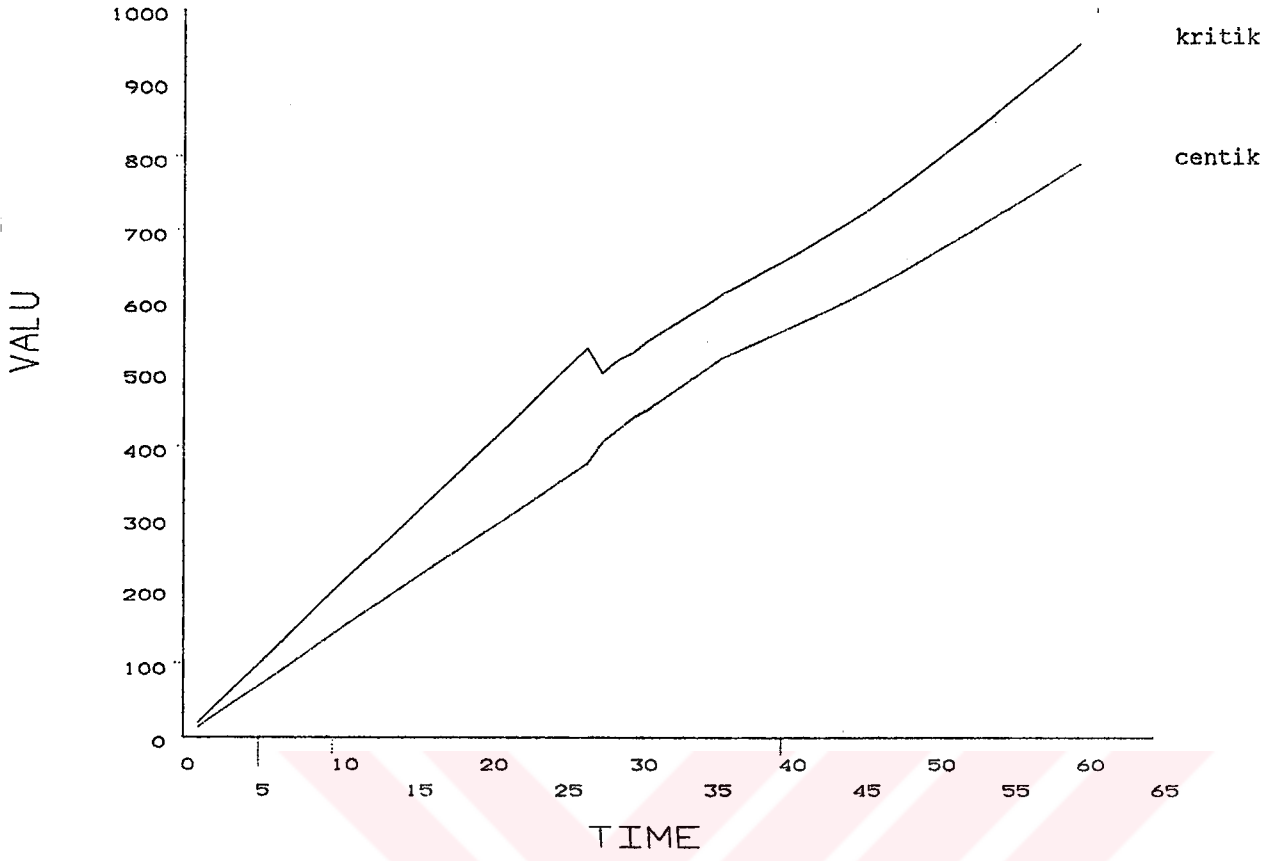
f) 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde (Şekil 4.51);

Burada da çentik ucu ile kritik bölge aynı yerde olduğu için grafikler çakışmıştır. Kritik bölge çentik ucunda oluşmuştur.

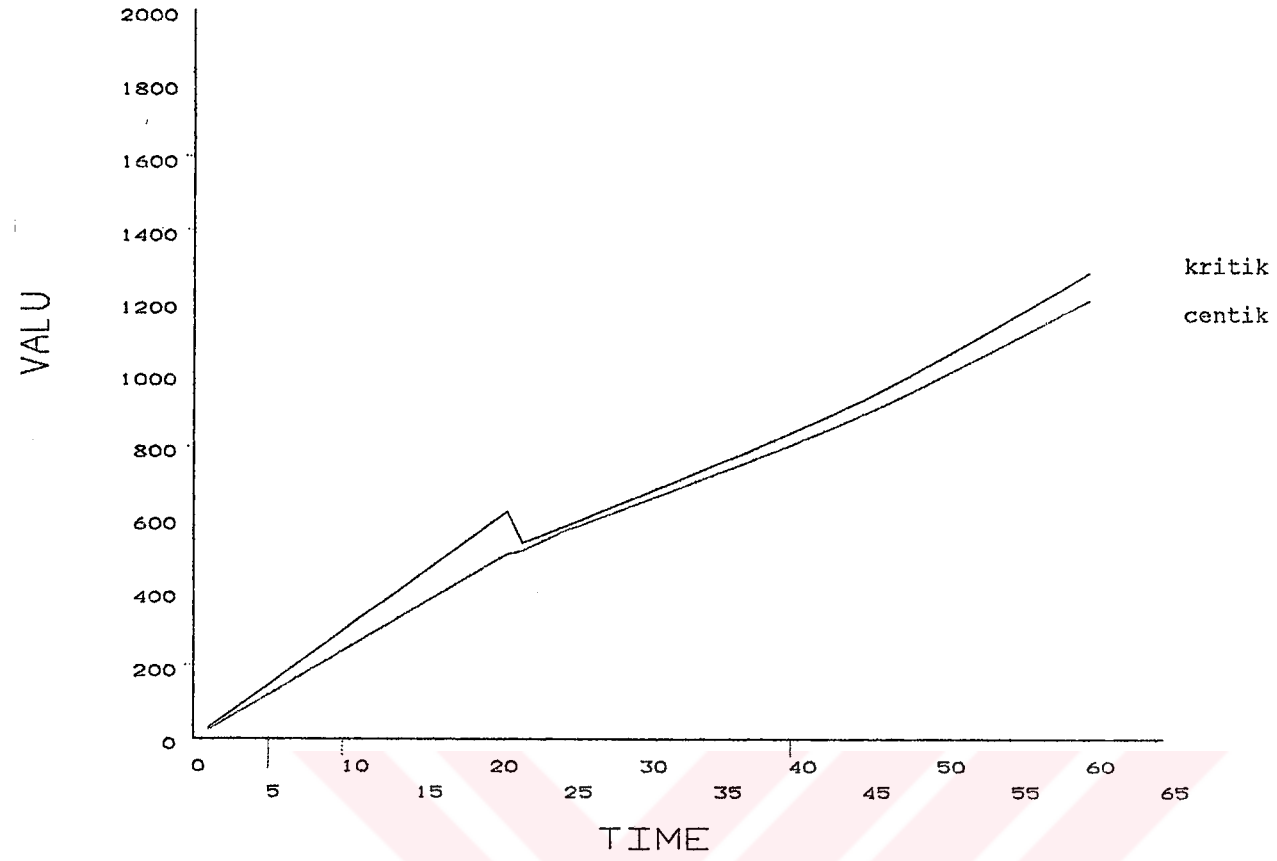
σ - ϵ diyagramları da Şekil 4.52 ile 4.57 arasında verilmiştir.



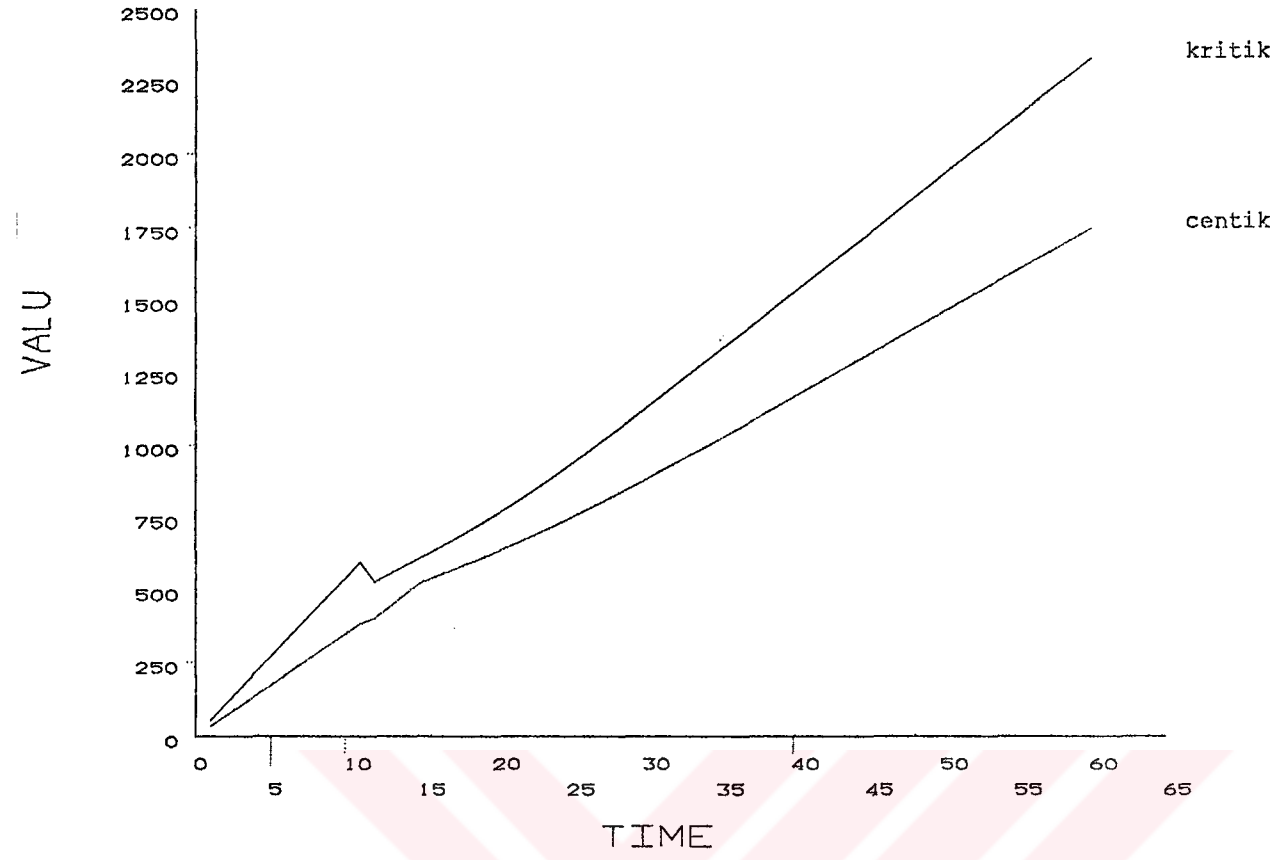
Şekil 4.46. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



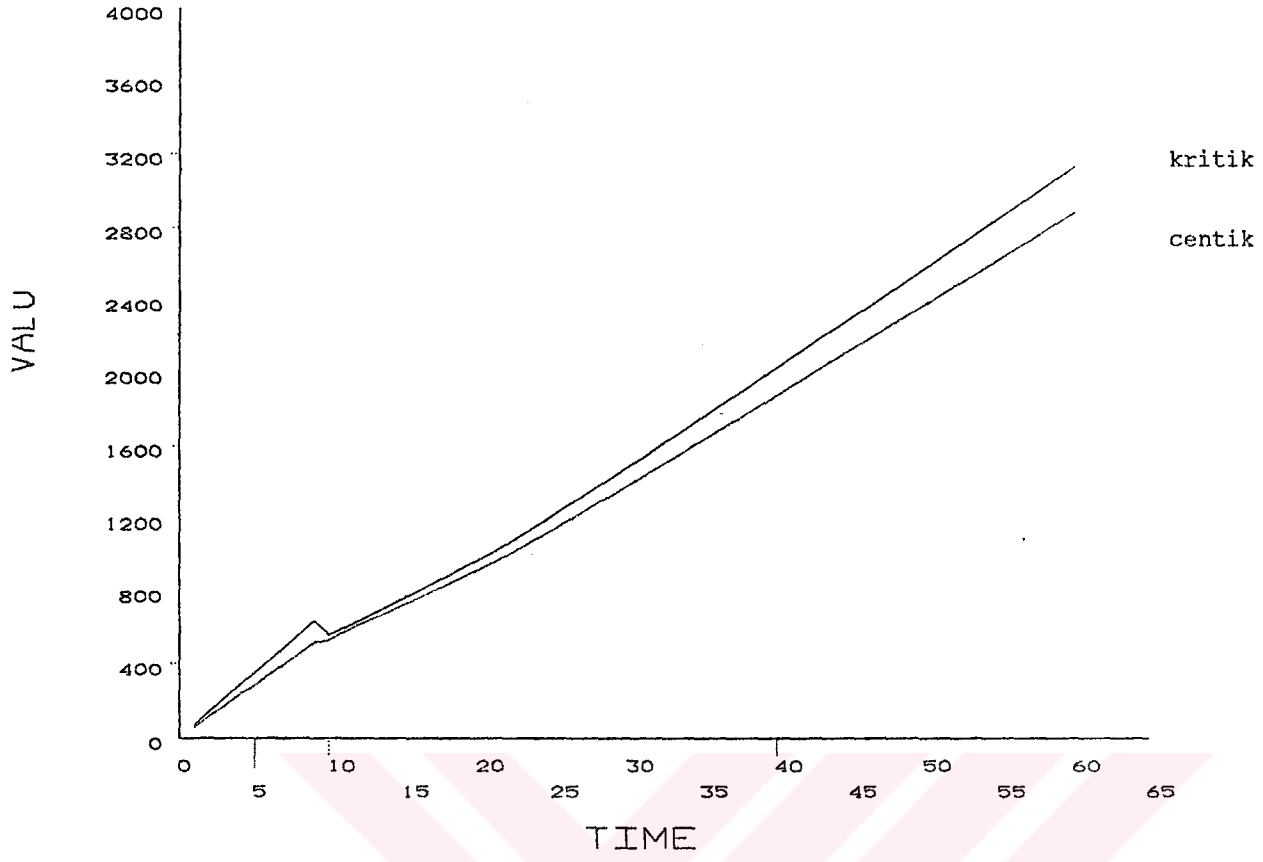
Şekil 4.47. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



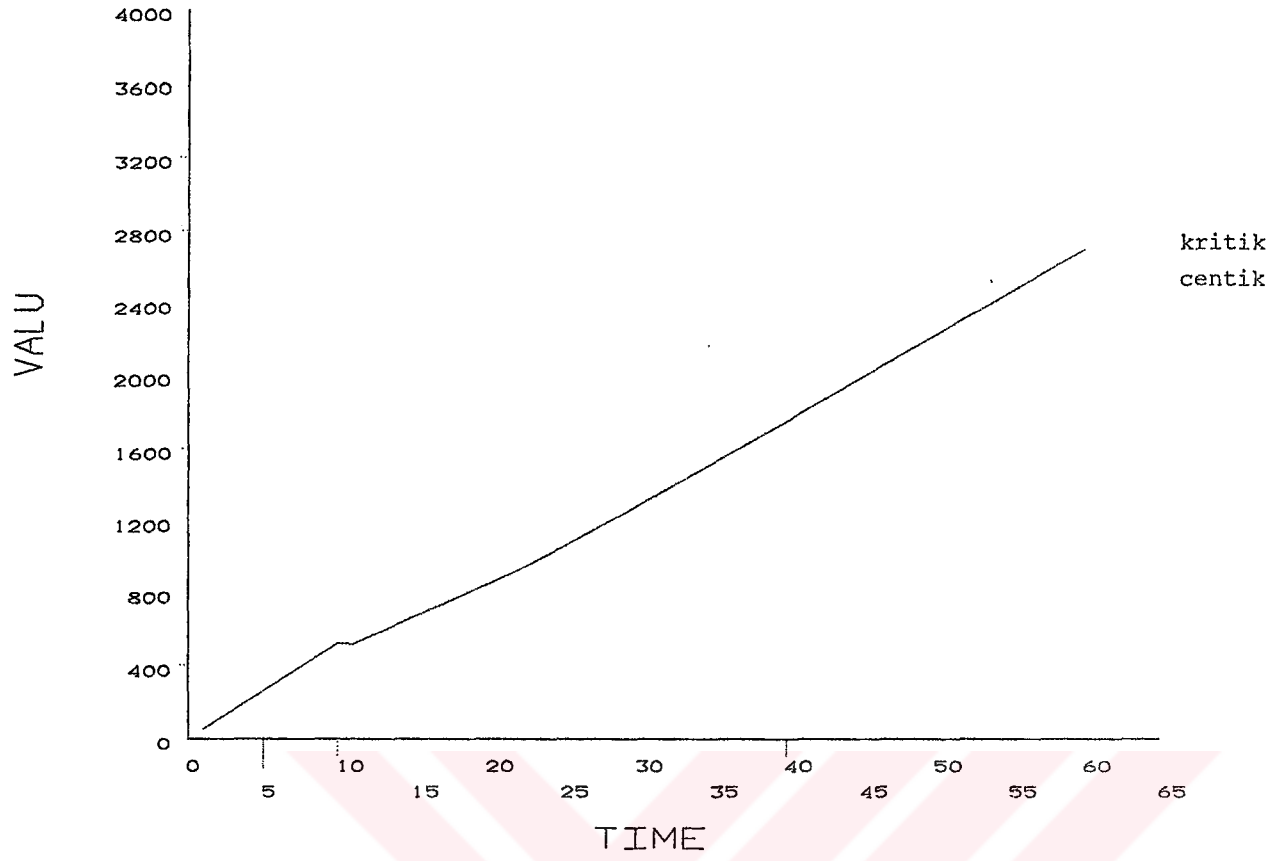
Şekil 4.48. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



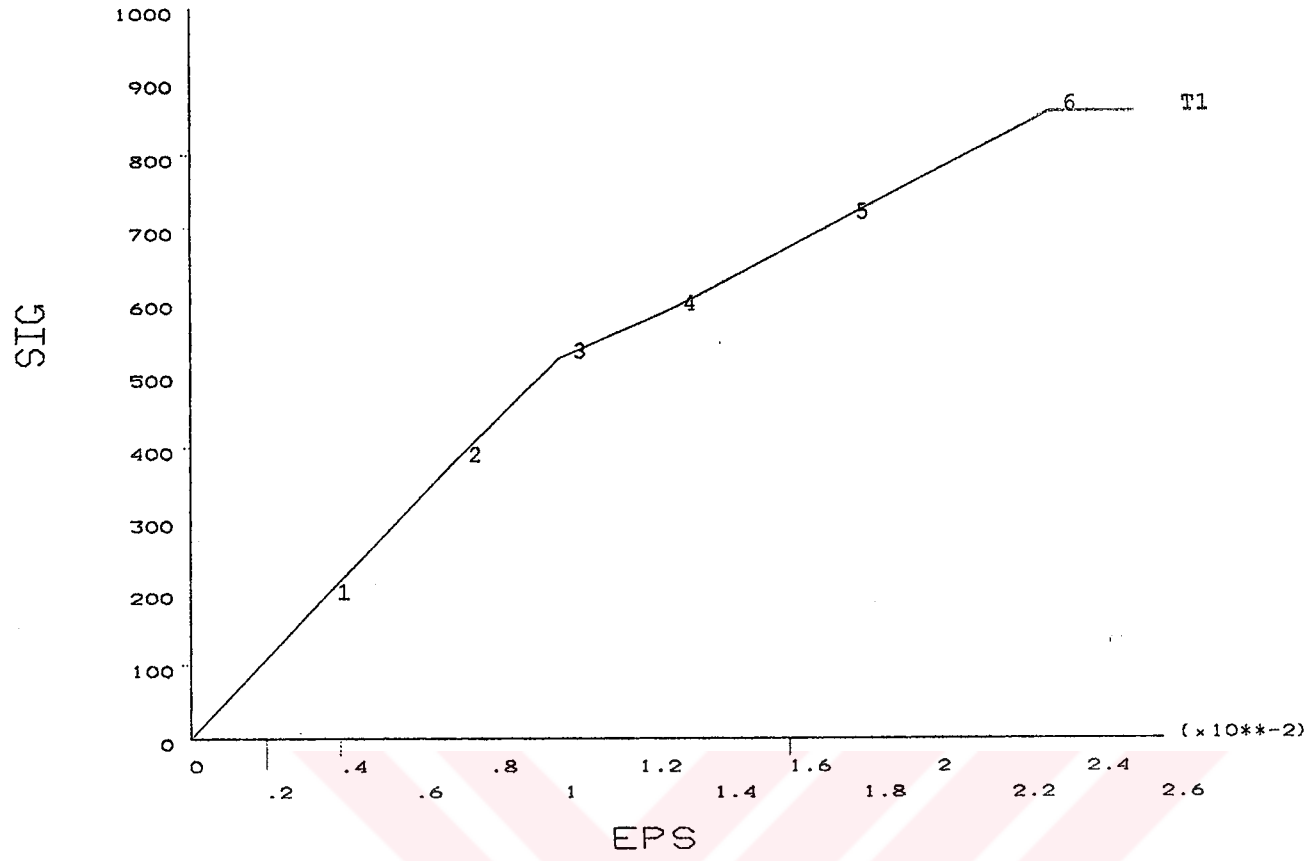
Şekil 4.49. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



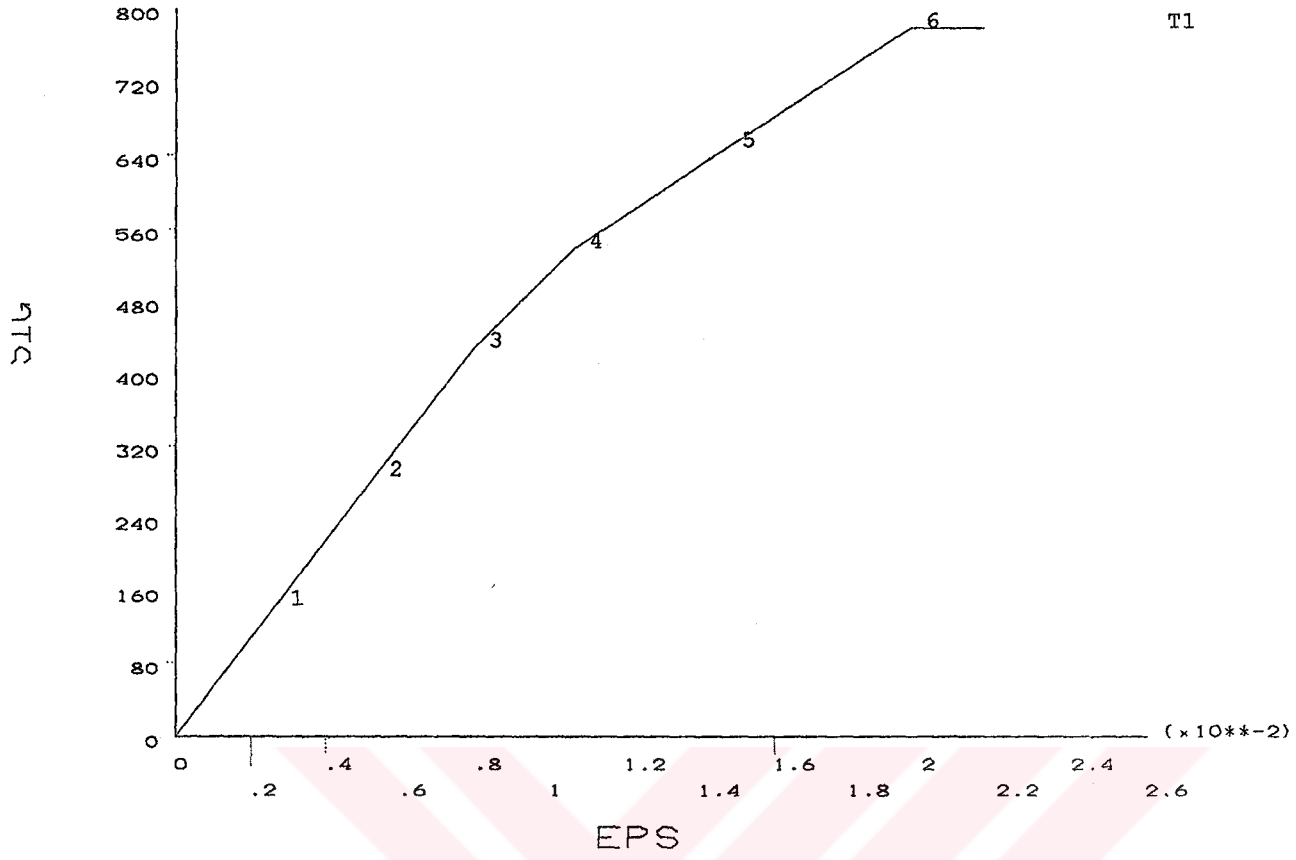
Şekil 4.50. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



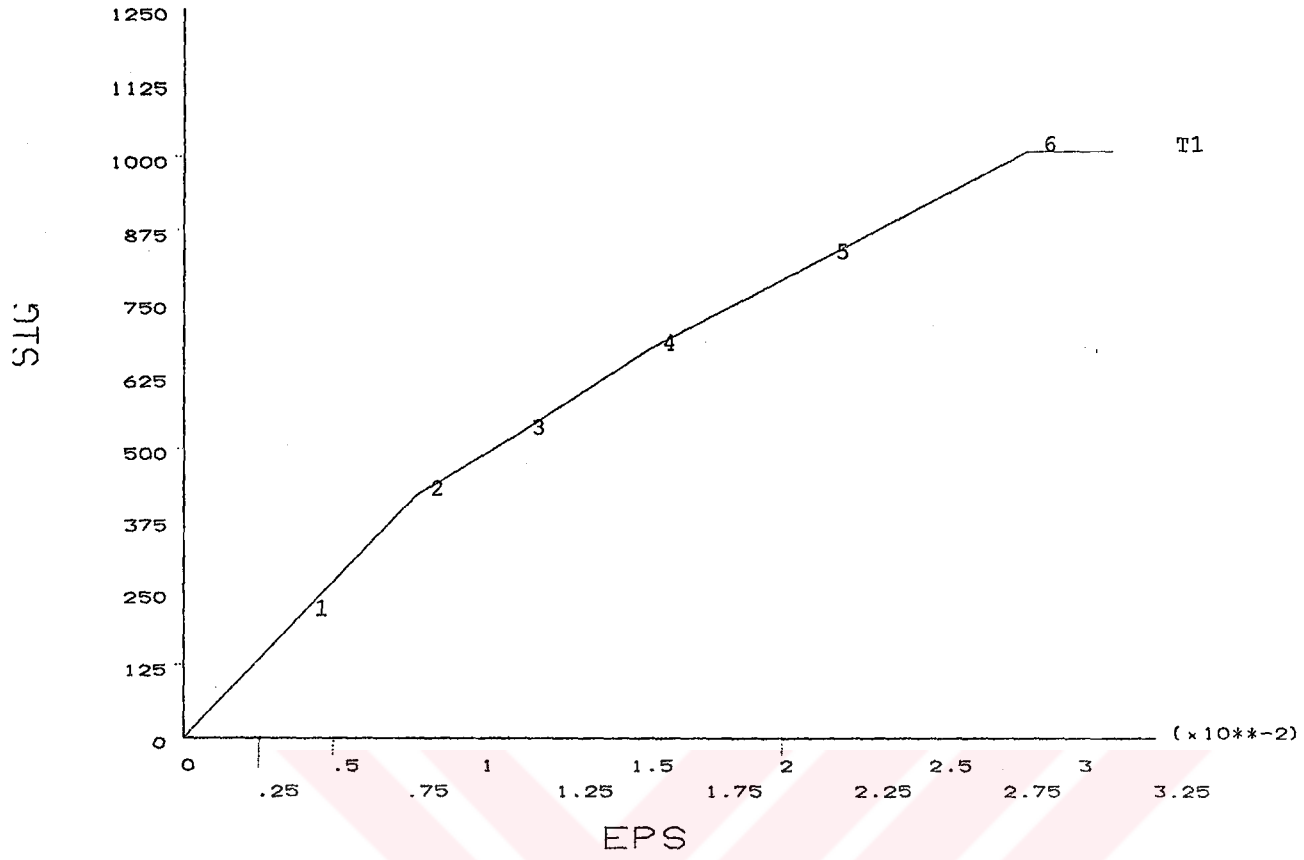
Şekil 4.51. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde maksimum gerilmelerin zamana bağlı diyagramı.



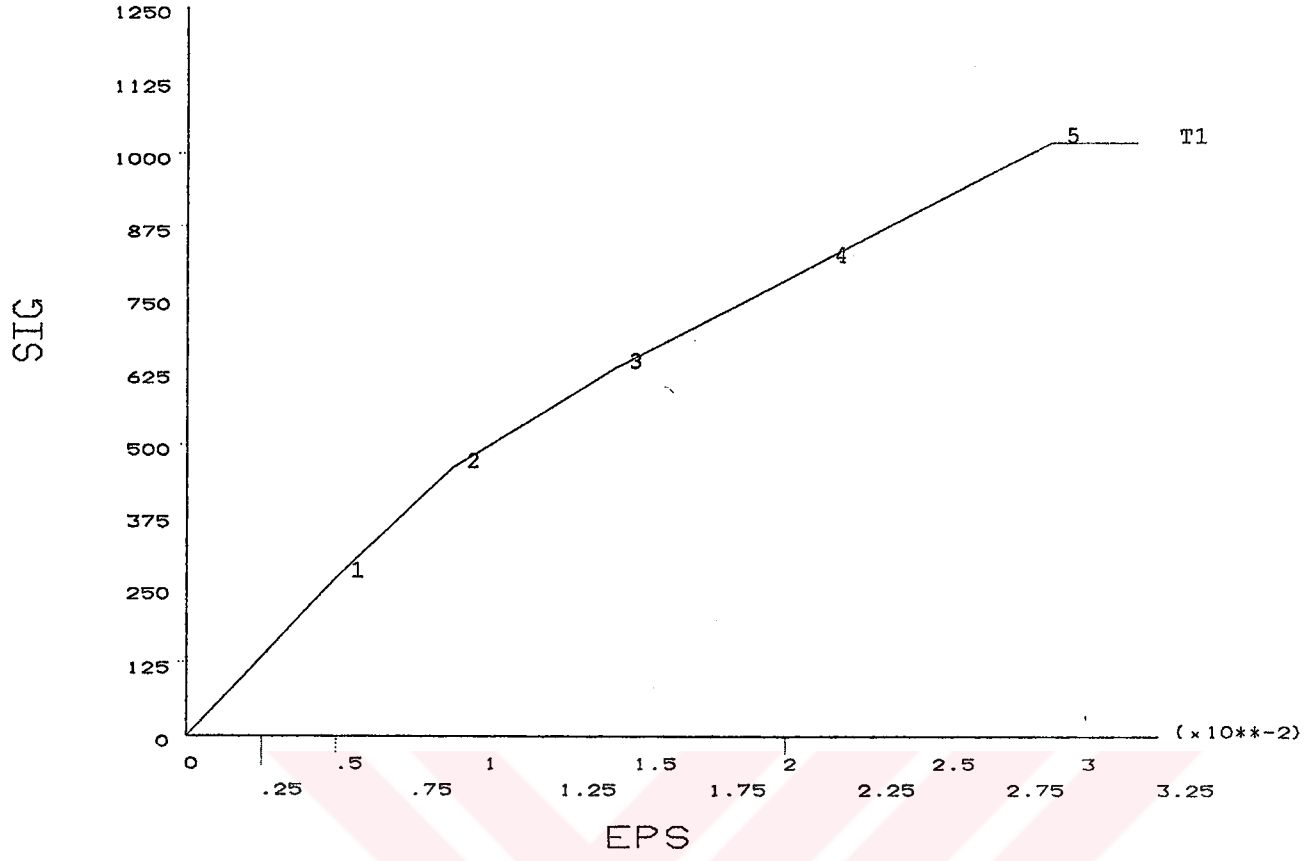
Şekil 4.52. 45° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.



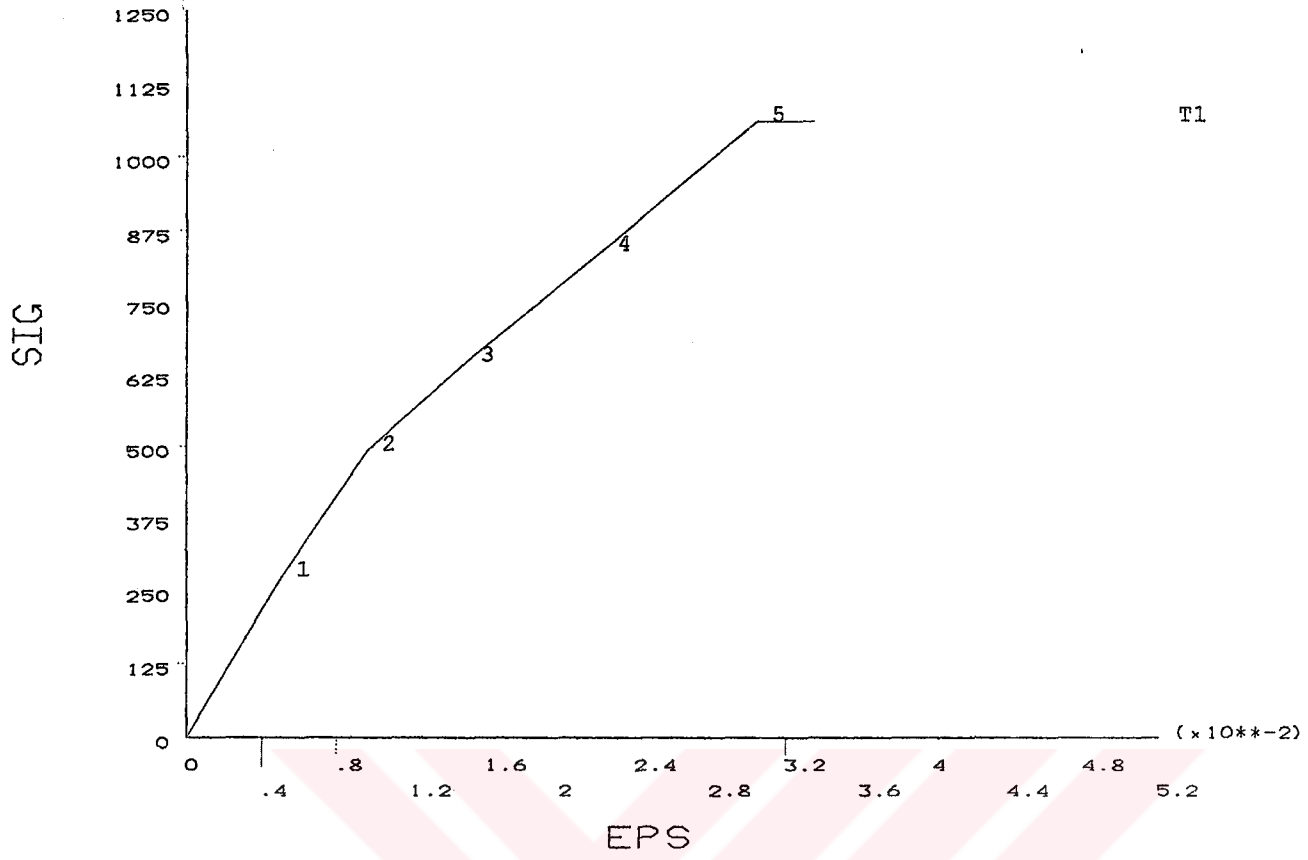
Şekil 4.53. 60° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.



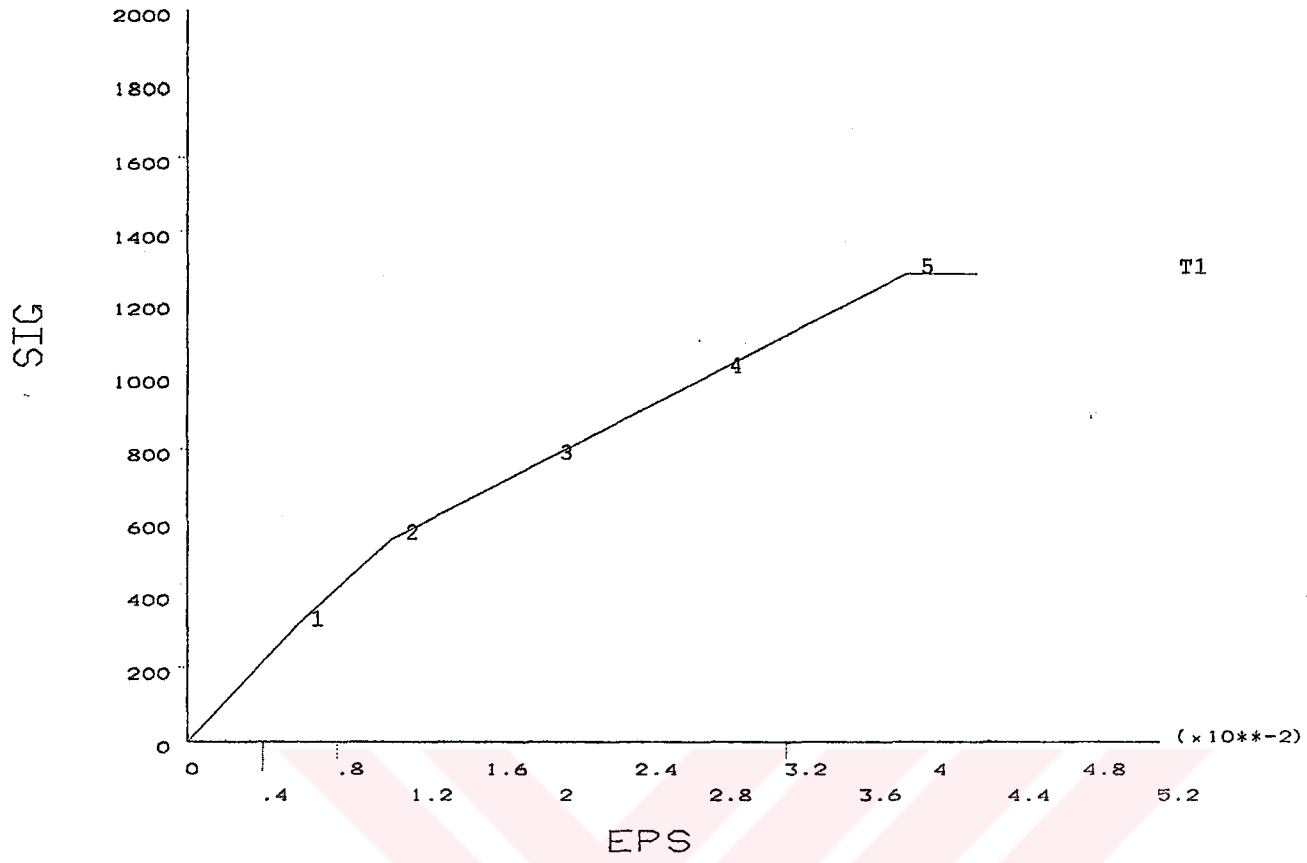
Şekil 4.54. 75° çentik açısı ve 1mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.



Şekil 4.55. 45° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ-ε diyagramı.



Şekil 4.56. 60° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ-ε diyagramı.



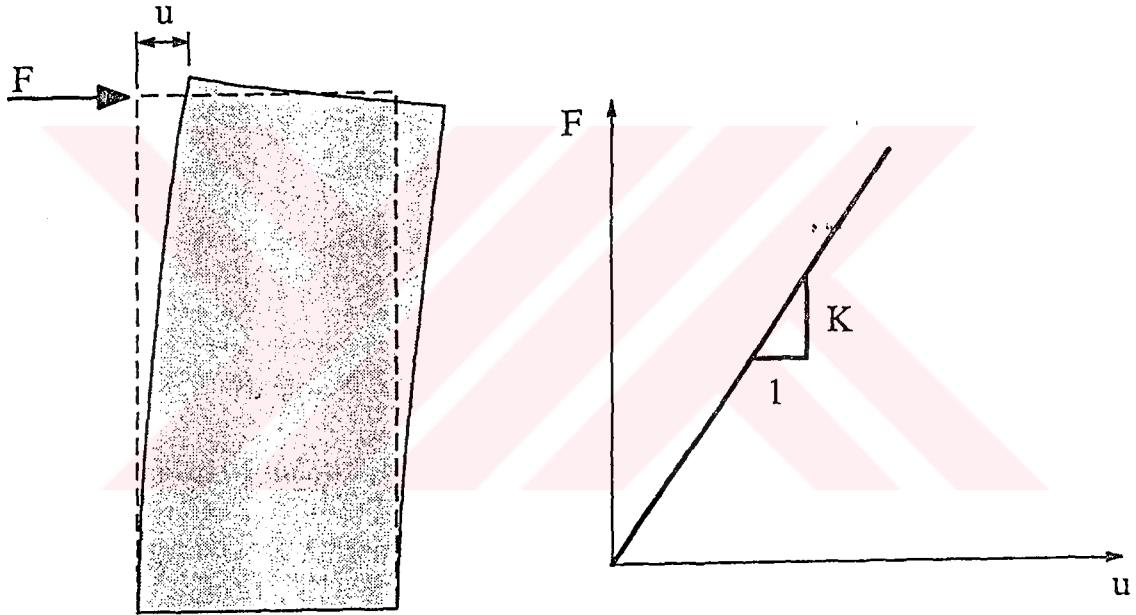
Şekil 4.57. 75° çentik açısı ve 2mm. çentik derinliğinde σ - ϵ diyagramı.

4.4. ANSYS Analiz Programı Hakkında Açıklamalar

4.4.1. Nonlinear Davranış

F kuvveti yapısal sisteme uygulanınca bu sistem uygun miktarda “u” kadar yer değiştirir. “F” ve “u” arasındaki bu ilişki yüklerin yapıya tepkisinin hesaplanmasını sağlar. Birçok mühendislik uygulamasında bu olay Hook Kanunu olarak bilinen eşitlikle tanımlanır;

$$F=K.u$$

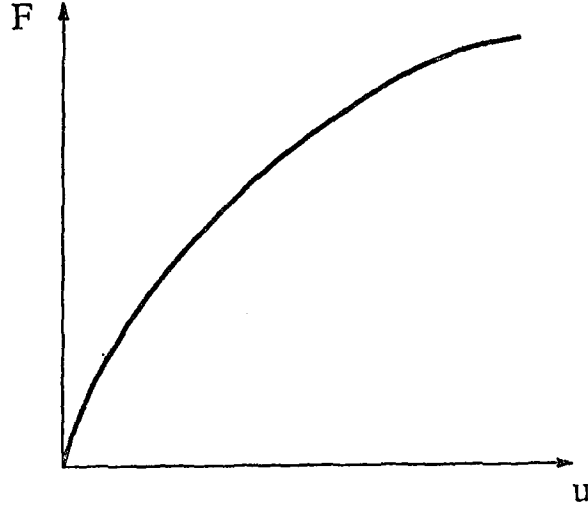


$$F = Ku$$

Şekil 4.58. Lineer davranış özellikleri (ANSYS User's Manual).

Bu eşitlikte orantı sabiti “K” yapısal sistemin sertliğine karşılıktır. Yapının sertliği sabit kaldığı sürece bu yapı lineerdir. Ansys programında ve diğer analiz programlarında bulunan standart lineer eşitlik çözücülerini karmaşık lineer yapıların analizi için geliştirilmiştir (ANSYS User's Manual).

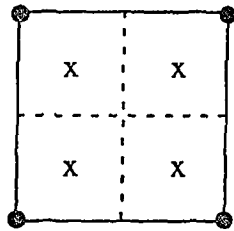
Kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişkinin sabit olmadığı mühendislik uygulamaları da mevcuttur. Bu sistemlere Nonlinear Sistemler denir.



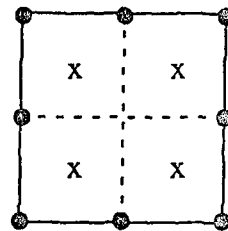
$$F \neq Ku$$

şekil 4.59. Nonlinear davranış eğrisi (ANSYS User's Manual).

Nonlinear gerilme-uzama ilişkileri nonlinear yapısal davranışın genel nedenidir. Malzemenin gerilme-uzama özelliklerinin etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar yük, çevresel koşullar ve yükün uygulandığı zaman dilimi gibi faktörlerdir. Nonlinear malzemelerin modellemesinde birçok durumda basit elemanlar kullanılır (ortasında düğüm noktası bulunmayan). Basit elemanlar karmaşık elemanlar gibi aynı sayıda birleşme noktasını sağlar ve bu yüzden daha az masrafla aynı doğru sonuçları verir.



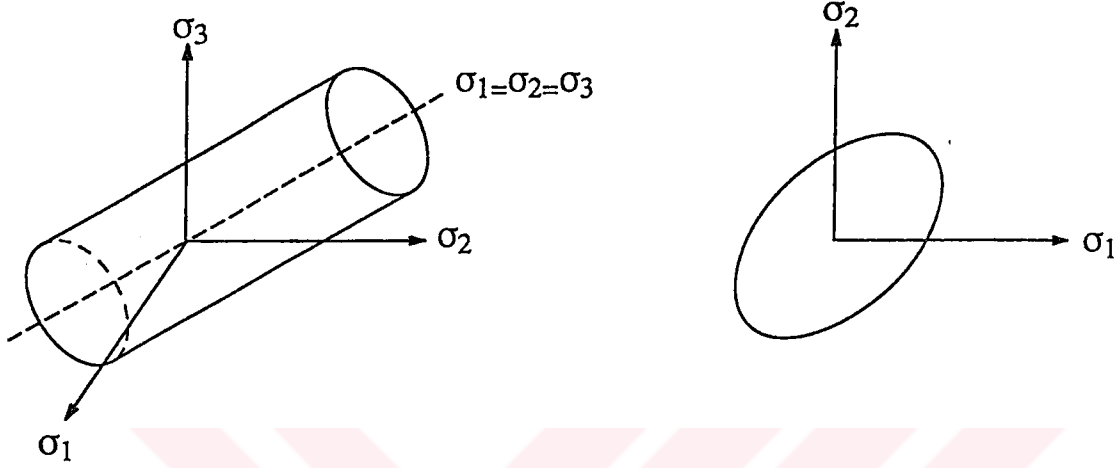
4 Integration Pts.
8 DOFs



4 Integration Pts.
16 DOFs

şekil 4.60. Elemanların serbestlik dereceleri (ANSYS User's Manual).

Analiz programı akma kriteri ve gerilme durumunu karşılaştırarak plastik şekil değişiminin olup olmayacağına karar verir. Von Mises akma kriteri yaygın şekilde kullanılan kullanılan akma kriteridir. Bunun denklemi 2.10 eşitliğinde verilmiştir. Aşağıdaki şekilde Von Mises akma kriteri temel gerilme alanında grafiklenmiştir;



Şekil 4.61. Von Mises akma kriteri (ANSYS User's Manual).

Burada silindirik alan üç boyutlu olarak $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ eksenini boyunca sıralanmıştır. İki boyutlu modellemelerde ise akma kriteri elips olarak ifade edilmektedir. Bu akma yüzeyi içindeki herhangi bir gerilme durumu elastiktir, dışına çıktığında akma başlar.

Nonlineer analizde kullanılan metodlardan biri de Newton-Raphson Metodu'dur. Bu eşitlik şu şekilde açıklanır;

$$[K^T] \{\Delta u\} = \{F^{app}\} - \{F^{nr}\}$$

Burada ;

$[K^T]$ = rijitlik matrisi

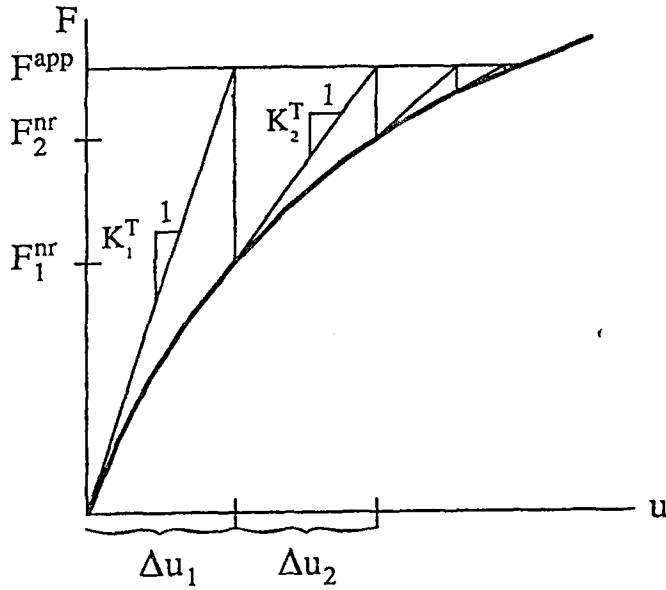
$\{\Delta u\}$ = yer değişim artışı

$\{F^{app}\}$ = uygulanan yük vektörü

$\{F^{nr}\}$ = yenilenen Newton-Raphson kuvveti

Full Newton-Raphson Metoduna göre program $[K^T]$ 'yi ve $\{F^{app}\} - \{F^{nr}\}$ 'yi güncelleştirir. Bir başka deyişle $\{F^{app}\}$, $\{F^{nr}\}$ 'ye eşit değilse bu sistem dengede değildir.

Newton-Raphson metodunun şeması aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.62. Newton-Raphson şeması (ANSYS User's Manual).

Elastik ve plastik gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\{\epsilon_i^{pl}\} = \{\epsilon_n^{pl}\} + \{\Delta\epsilon_n^{pl}\}$$

$$\{\epsilon_i^{el}\} = \{\epsilon_i^{tot}\} - \{\epsilon_i^{pl}\}$$

Ansys analiz programını kullanarak modelleyebileceğimiz nonlinear malzeme tipleri şunlardır (ANSYS User's Manual);

Plastiklik : Belirli bir gerilme değeri aşıldığında malzemede meydana gelen geri dönüşmez şekil değiştirmelerdir. Plastik deformasyona uğramış eleman orijinal şekline geri dönmez.

Hiperelastiklik : Kauçuk (lastik) ve süngerimsi elastik elemanların modellenmesidir. Bu elemanlar yüksek nonlinearlik gösterirler ve orijinal şekillerine dönmezler.

Sürünme : Plastiklik gibi geri dönüşmez şekil değişimleri meydana gelir fakat bunu için uzun bir zaman gerekir.

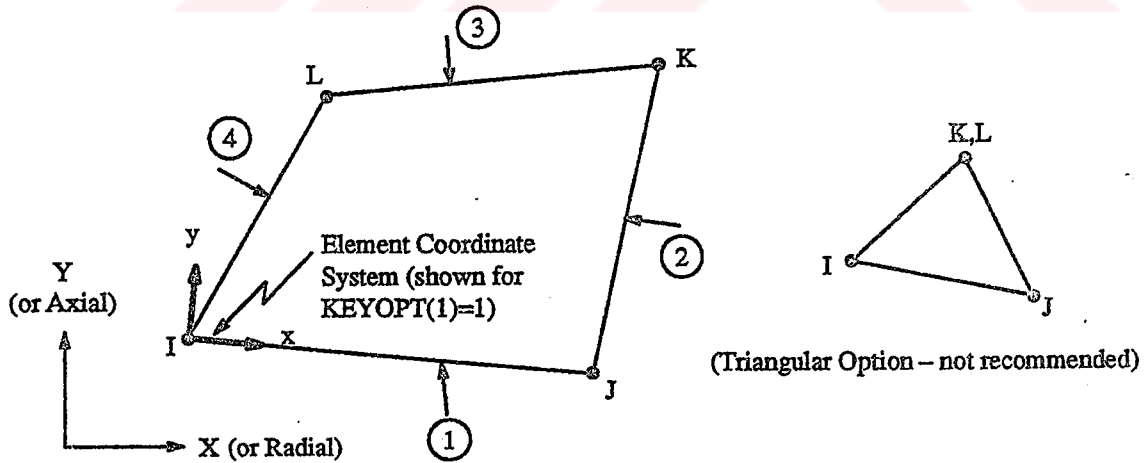
Viskoelastiklik : Malzemenin gerilme değişimi oranı ve zaman etkisini hesaplar. Multilineer elastiklik nonlinear çekme-gerilme ilişkisini inceler. Bütün çekmeler eski haline dönebilir.

Kullanıcı Tanımlı Malzemeler : Malzemenin davranışını tanımlamaya imkan verir.

Ansys analiz programında iki boyutlu modellemede Plane42 isimli katı eleman kullanılmıştır. Plane42, katı yapıları iki boyutlu modellemede kullanılır. Bu eleman düzlem eleman veya axisymmetric eleman olarak kullanılır. Herbir düğümün iki serbestlik derecesinin olduğu dört düğümle tanımlanır, x ve y doğrultusunda ötelenme hareketi yapar. Elemanın gerilme doğrultusu, elemanın koordinat sistemine paraleldir. Plane42; plastiklik, genleşme, sürünme, sertleştirme, yüksek sapma ve yüksek gerilme özelliklerine sahiptir. Şekil 463'de Plane42 elemanı görülmektedir (ANSYS User's Manual).

Burada elemanın sınır şartları "Symmetry Boundary Conditions" komutu ile verilmiştir. Bu komutla parçanın simetrik olduğu belirtilmiştir. Y eksenini üzerindeki noktaların yukarı aşağı hareketi, X eksenini üzerindeki noktaların da sağa sola hareketi engellenmiştir. Bu iki eksen arasında kalan bölgedeki noktalar X ve Y doğrultularında hareket edebilirler.

"Axisymmetric" komutu ile de iki boyutlu olarak modellenen parçanın üç boyutlu olduğu ifade edilmektedir. Üç boyutlu parçanın iki boyuta indirgenmesinde kullanılan bir komuttur.



Şekil 4.63. İki boyutlu Plane42 katı elemanı (ANSYS User's Manual).

Kullanılan analiz tipi; Transient Dinamik Analiz, yani zamana bağılı analizdir. Transient Dinamik Analiz, yapının dinamik hareketi altındaki zamana bağılı uygulanan yüklerin hareketini belirlemekte kullanılan bir tekniktir. Bu tip analiz yapıda geçici, harmonik ve statik birleşmeye tepki olarak zamanla yerdeğiştirme, gerilme ve kuvveti belirlemekte kullanılır (ANSYS User's Manual). Atalet ve damping etkisi önemli değilse bunun yerine statik analiz kullanılabilir. Transient dinamik analiz tarafından çözülen problemin temel eşitliği;

$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$ şeklinde verilir. Burada;

$[M]$ = yüzey matrisi

$[C]$ = damping matrisi

$[K]$ = rijitlik matrisi

$\{\ddot{u}\}$ = nodal ivme vektörü

$\{\dot{u}\}$ = nodal hız vektörü

$\{u\}$ = nodal yer değiştirme vektörü

$\{F(t)\}$ = yük vektörü

olarak tanımlanır.

Transient dinamik analiz yapmak için üç metod kullanılır; full (tam) metod, indirgeme metodu ve süperpozisyon metodu. Bizim bu çalışmada kullandığımız metod, full metoddur. Bu metod diğerlerinden daha güçlüdür çünkü her çeşit nonlineerliği içerir. Bu metodun avantajları;

- a) Kullanımı kolaydır, çünkü serbestlik derecesini ve izlenecek yolu seçmede herhangi bir sorunla karşılaşılmaz.
- b) Her çeşit nonlineerliğe izin verir.
- c) Full matris kullanır böylece matris büyüklüğü tahmini gerektirmez.
- d) Bütün yerdeğiştirme ve gerilmeler bir defada hesaplanır.
- e) Her çeşit yükü kabul eder.
- f) Katı model yüklerinde etkili kullanımı sağlar.

En önemli dezavantajı ise; diğer metodlardan daha pahalı olmasıdır (ANSYS User's Manual).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada anlatılmak istenen; deney düzenekleriyle yapılan bir deneyi bilgisayar ortamında modelleyerek gerçeğe uygunluğunun araştırılmasıdır. Alınan sonuçlardan görüldüğü gibi farklı olan kısımlarının yanında çoğu aşamada ortak hatta birbirine yakın değerler bulunmuştur. 2mm. çentik derinlikli numunelerin çentik mukavemetlerinin ve kırılma tokluklarının, 1mm. çentik derinlikli numunelerden yüksek olduğu görülmüştür. Deneylerden elde edilen sonuçlarda; çentik mukavemeti en yüksek parçanın 75° çentik açılı, 2mm. çentik derinlikli parça olduğu belirlenmiş. Ayrıca en yüksek kırılma tokluk değerinin de 60° açıda ve 1mm. derinlikte olduğu bildirilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise;

En yüksek kırılma tokluğu 75° açıda ve 2 mm. derinlikte bulunmuştur.

En düşük kırılma tokluğu 60° açıda ve 1mm. derinlikte olduğu gözlenmiştir.

Çentik gerilmesi en yüksek olan numune; 75° açıda, 2mm. derinlikteki numunedir.

Bulunan bu sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, bazı farklılıkların dışında, benzer yönleri görülmektedir. Bu farklılıkların olmasının sebeplerinden birinin de σ - ϵ diyagramlarındaki fark ve analiz programında parabolik eğrinin tanımlanamayışı olarak değerlendirmiştik. Buradan yola çıkarak, kullanılan bu analiz programının tam olarak olmasa da belli bir yere kadar deneysel çalışmalarla paralel gittiğini söyleyebiliriz. Çekme mukavemetine kadar aynı düzlemde giden çalışma, gerçekte çekme mukavemeti sınırından sonra malzemeye gelen gerilmenin azalması ve bilgisayarda bunu ifade edemememiz sebebiyle bazı yerlerde farklılıklar göstermektedir.

İncelediğimiz programda analiz, akma sınırındaki olaylar için güvenilir biçimde kullanılabilir.

6. KAYNAKÇA

- AKKURT, M. 1990. Makine Elemanları. Birsen Yayınevi, Cilt 1, İstanbul. s. 13-41.
- ANSYS USER'S MANUAL
- BROWN, İr.W.F., U.J.E. SRAWLEY. 1967. Symposium on Plain Strain Crack Toughness, Testing Of High Steel Metallic Materials STP 410, ASTM Philadelphia. p. 56-126.
- DIETER, G.E. 1988. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, Singapore, p.316.
- EWALDS, H.L., R.J.H. WANHILL. 1985. Fracture Mechanics, First Edition, Edward Arnold, London. p.14-45.
- HERTZBERG, R.W. 1989. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley and Sons, New York, USA. p.34-89.
- RUHL, K. 1959. Die Sprödbuchtsicherheit von Stahlkonstruktionen. Düsseldorf: Wener-Verlag. p. 55-86.
- SMITH, R.A. 1978. "An Introduction to Fracture Mechanics for Engineers, Part 1: Stresses due to Notches and Cracks", Materials in Engineering Applications. p. 109-128
- SMITH, W.F. 1993. Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill, New York. p. 203-212.
- SRAWLEY, J.E.U., W.F.BROWN. 1965. Symposium Fracture Toughness Testing and Its Application, STP 381, ASTM Philadelphia. p. 133-209.
- UĞUZ, A. 1996. "Kırılma Mekanikine Giriş", Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa. 150 s.
- UĞUZ, A. ve A. BAYRAM. 1999. The Effect of Notch On the Tensile Properties of A Commercial 7075-Alloy, (yayınlanmamış), Bursa. 15 s.

7. ÖZGEÇMİŞ

Bu çalışmayı hazırlamış olan Cankut SALMAN 1975 yılında Kayseri’de doğmuştur. İzmir Atatürk Lisesi’ni bitirdikten sonra, 1992 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek tahsiline başlamıştır. 1996 yılında mezun olduktan sonra Ekim 1996’da yüksek lisans sınavını kazanmış ve bir yıl süre ile İngilizce hazırlık görmüştür. Kasım 1997’de BURÇELİK A.Ş.’de Kalite Güvence Sorumlusu olarak çalışmaya başlamıştır. Halen bu görevini sürdürmektedir.

