

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇENTİKLİ ÇEKME DENEYİNİN
SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Erman AKIN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ

Haziran 2006

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇENTİKLİ ÇEKME DENEYİNİN
SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Erman AKIN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 20/ 06 /2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ Jüri Başkanı **Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU Üye** **Doç. Dr. S. Can KURNAZ Üye**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, küreselleştirilmiş AISI 1040 ve 4140 çeliklerine ait çentikli çekme deneyi deneysel sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde malzeme değerleri olarak, malzemelerin basma deneyi sonuçlarından elde edilen gerçek gerilme ve birim şekil değişim değerleri kullanılmıştır. Böylece basma deneyi sonuçları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile çentikli çekme deneyi benzetiminin elde edilebilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmanın yürütülmesinde bana yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans danışmanım saygı değer hocam Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ 'e teşekkürlerimi sunarım.

Sonlu elemanlar yöntemi konusunda destekleri nedeniyle saygı değer hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet FIRAT 'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana olan yardımlarından dolayı Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlilerinden Şener ŞAHİN ve Erman ASLAN 'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca, öğrenimim sırasında bana maddî ve manevî yönden destek sağlayan aileme çok teşekkür ederim.

Erman AKIN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
MEKANİK DENEYLER.....	4
2.1.Giriş.....	4
2.2.Basma Deneyi.....	5
2.3.Çentikli Çekme Deneyi.....	8
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	12
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ ÇALIŞMASI.....	17
4.1.Giriş.....	17
4.2.Geometri Özellikleri.....	17
4.3.Malzeme Özellikleri.....	18
4.3.1.Referans deneye ait basma eğrisinden gerçek gerilme ve birim şekil değişim değerinin kullanılması.....	18

4.4.Gerilme Yığılma Faktörü Hesabı	21
4.4.1.Eksenel yönde uygulanan kuvvet için	22
4.5.Modelin Tanımlanması.....	24
4.6.Sonlu Elemanlar Ağı.....	24
4.7.Sınır Koşulları.....	25
BÖLÜM 5.	
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI.....	27
5.1. Yatay (x) Yöndeki Şekil Değişimi Sonuçları.....	27
5.2. Dikey (y) Yöndeki Şekil Değişimi Sonuçları.....	31
5.3. Eksenel Gerilme Değişimi Sonuçları.....	34
5.4. Eşdeğer Gerilme Değişimi Sonuçları.....	38
5.5. Eşdeğer Birim Şekil Değişimi Sonuçları.....	44
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
6.1. Sonuçlar.....	53
6.2. Öneriler.....	53
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Numune kesit alanı
Al	: Alüminyum
D ₀	: Numunenin başlangıç anındaki çapı
D	: Numunenin son andaki çapı
h ₀	: Numunenin başlangıç anındaki yüksekliği
h	: Numunenin son andaki yüksekliği
ε _θ	: Açısal yönde birim şekil değiştirme
ε _z	: Eksenel birim şekil değiştirme
σ _{eq}	: Eşdeğer gerilme
σ _Y	: Akma gerilimi
p	: Hidrostatik basınç
q	: Malzeme sabiti
f	: Hasar parametresi
r	: Minimum kesite ait radyal koordinat
a	: Minimum kesitin yarıçapı
ε _{eq}	: Eşdeğer plastik birim şekil değişimi
E	: Elastisite modülü
γ	: Poisson oranı
A _ç	: Çentik kesitindeki alan
A _d	: Dairesel kesitteki alan
K	: Yığılma faktörü
P ^d	: Dairesel kesite uygulanan basınç değeri
P ^ç	: Çentikli kesite uygulanan basınç değeri
σ	: Gerilme
ε	: Gerçek birim şekil değişimi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Basma deneyinde birim şekil değişimlerinin ölçülebilmesi için işaretlemenin yapılması.....	6
Şekil 2.2. Bir silindirik koordinat sistemi ve basmaya uğramış numunede meydana gelen çatlakın görünümü.....	6
Şekil 2.3. Çentikli çekme numunesi örneği.....	10
Şekil 2.4. Boyun verilmiş deney numunesine ait parametrelerin gösterimi....	11
Şekil 3.1. Sonlu eleman yönteminde eleman tipleri.....	13
Şekil 4.1. Çentikli çekme deneyi numunelerine ait geometrik ölçüler.....	17
Şekil 4.2. Küreselleştirilmiş AISI 1040 çeliğine ait basma deneyi grafiği.....	19
Şekil 4.3. Küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğine ait basma deneyi grafiği.....	19
Şekil 4.4. AISI 1040 çeliğine ait basma eğrisinden elde edilen MISO eğrisi.....	20
Şekil 4.5. AISI 4140 çeliğine ait basma eğrisinden elde edilen MISO eğrisi.....	20
Şekil 4.6. a) Nominal (S_{yy}) çekme gerilmesinin çentik kökünde dağılımı b) Nominal (S_{zy}) kayma gerilmesinin çentik kökünde dağılımı.....	21
Şekil 4.7. Parça kesit noktalarının gösterimi.....	22
Şekil 4.8. SEM ile elde edilmiş çentik kökündeki aksenal (y) yöndeki gerilme dağılımı.....	23
Şekil 4.9. SEM ile elde edilmiş çentik kökündeki radial (x) yönde gerilme dağılımı.....	23
Şekil 4.10. Çentikli numuneye ait oluşturulmuş ağ yapısının görünümü.....	25
Şekil 4.11. Modele ait sınır koşullarının gösterimi.....	26
Şekil 5.1. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri ($R=2\text{mm}$ için).....	27

Şekil 5.2. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için).....	28
Şekil 5.3. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için).....	28
Şekil 5.4. AISI 4140 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için).....	29
Şekil 5.5. AISI 4140 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için).....	29
Şekil 5.6. AISI 4140 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için).....	30
Şekil 5.7. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için).....	31
Şekil 5.8. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için).....	32
Şekil 5.9. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için).....	32
Şekil 5.10. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için).....	33
Şekil 5.11. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için).....	33
Şekil 5.12. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için).....	34
Şekil 5.13. AISI 1040 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=2mm için).....	35
Şekil 5.14. AISI 1040 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=5mm için).....	35
Şekil 5.15. AISI 1040 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=10mm için).....	36
Şekil 5.16. AISI 4140 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=2mm için).....	37
Şekil 5.17. AISI 4140 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=5mm için).....	37

Şekil 5.18. AISI 4140 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=10mm için).....	38
Şekil 5.19. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=2mm için).....	39
Şekil 5.20. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=5mm için).....	39
Şekil 5.21. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=10mm için).....	40
Şekil 5.22. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=2mm için).....	40
Şekil 5.23. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=5mm için).....	41
Şekil 5.24. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=10mm için).....	41
Şekil 5.25. AISI 1040 için çentik kökünde meydana gelen von Misses eşdeğer gerilimin değişimi.....	42
Şekil 5.26. AISI 4140 için çentik kökünde meydana gelen von Misses eşdeğer gerilimin değişimi.....	43
Şekil 5.27. AISI 1040 için eşdeğer gerilmenin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi.....	43
Şekil 5.28. AISI 4140 için eşdeğer gerilmenin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi.....	44
Şekil 5.29. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=2mm için).....	45
Şekil 5.30. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=5mm için).....	45
Şekil 5.31. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=10mm için).....	46
Şekil 5.32. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=2mm için).....	46
Şekil 5.33. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=5mm için).....	47

Şekil 5.34. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=10mm için).....	47
Şekil 5.35. AISI 1040 için eşdeğer birim şekil değişiminin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi.....	48
Şekil 5.36. AISI 4140 için eşdeğer birim şekil değişiminin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi.....	48
Şekil 5.37. AISI 1040 için deney sonuçlarına ait eğri ile basma deneyi sonuçlarına göre SEY ile elde edilmiş eğrilerin karşılaştırılması.....	49
Şekil 5.38. AISI 4140 için deney sonuçlarına ait eğri ile basma deneyi sonuçlarına göre SEY ile elde edilmiş eğrilerin karşılaştırılması.....	50
Şekil 5.39. Küreselleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi analizinde aksenal ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.....	51
Şekil 5.40. Küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi analizinde aksenal ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.....	52

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Çentikli çekme deneyi, kırılma tokluğu, süneklik, sonlu elemanlar yöntemi, eksenel simetrik model, basma deneyi

Çentikli çekme deneyi özellikle malzemelerin kırılma tokluğu ve süneklik özelliklerinin tespitinde sıkça yapılan deneylerden biridir. Fakat farklı çentik yarı çaplarının incelenmesi gereği, çekme deneylerinin çok sayıda numune ile gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bu da deney için malî yönden bir kaynak gerektirmektedir. Bu nedenle, daha az maliyetli sonuçlar için sonlu eleman yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yapılan çentikli çekme deneyine ait deney sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Malzemelere ait basma deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen gerçek birim şekil değişimi ve gerçek gerilme değerleri sonlu eleman analizinde kullanılmıştır. Sonlu eleman yöntemini 2 boyutlu eksenel simetrik bir model ile oluşturulmuştur. Daha sonra bu modele çentik bölgesinde daha yoğun olacak şekilde bir ağ modeli oluşturulmuştur.

Sonlu eleman yönteminde AISI 1040 ve 4140 olmak üzere 2 farklı küreselleştirilmiş çelik kullanılmıştır. Her bir malzeme için farklı çentik yarıçaplı numuneler ($R=2, 5$ ve 10mm) kullanılarak ayrı ayrı sonuçlar hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, küreselleşmiş 2 farklı çeliğe ait basma eğrilerinden yararlanarak sonlu eleman yönteminde elde edilen çentikli çekme benzetimine ait sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiriyle yaklaşık olarak uygunluk sağladığı görülmüştür.

THE INVESTIGATION OF NOTCHED TENSILE TEST WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Keywords: Notched tensile test, fracture toughness, ductility, finite element method, axisymmetric model, upsetting test

Notched tension test is done very often for especially determining the materials fracture toughness and ductility. In order to investigate the different notch radius in notched tension test, a lot of samples must be used in test. In this situation a financial source is needed. Therefore Finite Element Method which support lesser cost must be used.

In this study, experiments results and finite element results were compared. Using the upsetting test results which they are real stress and real strain values were used in finite element analysis. Two dimensional axisymmetric model was come into being in FEA, and then in this model and in notched area a lot of mesh was used.

AISI 1040 and 4140 steels in the hot rolled were used in the finite element method. Results were calculated for each material and different notched radius ($R=2, 5$ and 10mm).

Consequently, benefiting from the upsetting test curve, notches tension simulation results in FEA and experimental results were become very closely.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mühendislik malzemeleri ile gerçekleştirilen makine mühendislik yapıları ve imalat proseslerinde, imalat koşulları ve de sonrası servis koşullarında çok farklı gerilme halleri etkisinde çalışılmaktadır. Şekillendirme teçhizatı, şekillendirilen malzeme prosesi ve makine elemanlarının güvenilirlikli tasarımında genellikle malzemelerin tek eksenli yükleme koşullarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçları kullanılmaktadır. Bu değerlerden yararlanılarak çok eksenli yüklemeler etkisinde malzemedeki zorlanmalar yaklaşık ifadeler ile tayin edilmektedir. Uygulama koşullarına benzer zorlanmaları içeren deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılan değerlendirmeler daha verimli sonuç verecektir. Bu nedenle, çok eksenli gerilme halini içeren çentikli çekme deneyleri ile malzemelerin zorlanma koşullarını incelemek güvenilir boyutlandırma ve verimli imalat çalışmalarında yararlı olmaktadır. Başka bir ifadeyle, çentikli çekme deneyleri sürekli üç eksenli gerilme hali etkisinde gerçekleşen bir çekme deneyidir. Bu deneylerden elde edilen veriler, üç eksenli gerilmelerin etkisinde gerçekleşen uygulamaların tasarlanmasında yararlı olacaktır.

Birçok uygulamalı problemlerde, silindirik konumdaki çekme numunelerinde çatlak oluşumu için eşdeğer birim şekil değişimi, sünekliğin ölçümü olarak ele alınır [1–2]. Süneklik, çatlak oluşumu olmaksızın malzemenin büyük miktarlarda şekil değiştirme kabiliyeti olarak ifade edilir. Boşluk büyümesi olarak gerçekleşen sünek hasarla ilgili ilk teorik araştırma McClintock [3] tarafından yapılmış, Rice ve Tracey [4] tarafından daha ileri bir çalışma yapılmıştır. Her iki analizde boşluk büyüme oranının, hidrostatik eşdeğer gerilim oranı gibi üç eksenli gerilme bölgelerinde kesin olarak bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Farklı tipteki çekme testlerinde düz ve silindirik numuneler gibi parçalar sık sık kullanılır. Ancak, çatlak oluşumunda eşdeğer birim şekil değişimi, numunelerin şekilleriyle ilişkili gerilme durumuna bağlıdır. Bir başka

deyişle, eşdeğer birim şekil değişimi, farklı geometrilerdeki çekme numunelerinde aynı değildir. Bu yüzden, farklı numuneler daima, çatlak oluşumunda aynı birim şekil değişimine sahip değildir.

Hancock ve Mackenzie [5] ile Mackenzie ve arkadaşlarının [6] deneysel sonuçları, en azından yapısal malzemeler için, sünekliğin üç eksenli olarak yönlendirilebilirliği fikrini desteklemiş ve malzeme hasarının yüksek derecede hidrostatik gerilmeye yol açmış olduğunu görmüşlerdir. Sonuçlar, Bridgman [7] analizi kullanılarak elde edilen hasar birim şekil değişimi ve üç eksenliliğin gösterim parametreleri bir kapalı hasar eğrisi olarak belirtilmiştir.

Çentikli numunede gerilme – birim şekil değişimi alanlarının daha fazla ayrıntılı olarak araştırılması Hancock ve Brown [8] tarafından yapılmıştır. Temel olarak, silindirik çentikli numunede üç eksenliliğin en yüksek olduğu minimum kesitin orta noktasındaki hasarı, önceki gözlemlerinde elde ettikleri kanıtlarla destekleyerek ele almışlardır.

Sünek hasardaki teorik ve deneysel sonuçlar, en azından gerilme alanlarının eksenel simetrik olduğunda, hidrostatik gerilmenin etkilediği sünek hasar eğiliminin tanımlanmasına yardımcı olmak ve tanımın yaygınlaşmasına fayda sağlamaktadır. Benzer statik deneyler ve sonuçlar diğerleri tarafından daha detaylı araştırılmıştır. Bunlar; Rice-Tracey modeli (Beremin 1980, 1981 [9,10]; Lautridou ve Pineau 1981 [11]), kırılma mekaniği (Devaux ve diğerleri 1985 [12]), hasar kriteri (Chaouadi ve diğerleri, 1994 [13]; Holmes ve diğerleri, 1993 [14]; Nash ve Cullis 1984 [15]) ve malzeme modelleme (Zavaliangos ve Anand 1993 [16]).

Bunlardan başka, üç eksenli zorlanma koşullarında hasar oluşmayan bölgenin tayini için, Bao [17], Bonora [18], An[19],Schiffmann [20],Alves [21] araştırmalar yapmışlar ve sünek kırılma ile eşdeğer gerilmenin çok eksenli zorlanma koşullarına etkili bir şekilde bağlı olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Yapılan literatür araştırmaları göstermiştir ki, çentikli çekme deneyleri yaygın olarak uygulanan bir deneydir. Yine bu sonuçlar çentikli çekme deneylerinin çok sayıda

çentik çeşitleri ile gerçekleştiğini göstermektedir. Bu nedenle, standart deney sonuçlarından elde edilen veriler ile çentikli çekme deneyi modellenmesi, deneysel çalışmalardaki değişkenlerin sayısında kolay bir artış sağlayacağı açıktır.

Bu çalışmada, basma deneylerinden elde edilen gerilme- birim şekil değişimi verileri kullanılarak çentikli çekme deneylerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi araştırılmıştır. Çentikli çekme deneyleri modellenmesi ile çentikli çekme deneyi yapmadan, basma eğrilerinden yararlanarak sonlu eleman yönteminde elde edilen çentikli çekme benzetimine ait sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiriyle yaklaşık olarak uygunluk sağladığı görülmüştür.

BÖLÜM 2. MEKANİK DENEYLER

2.1. Giriş

Mekanik deneyler, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli ölçüde yardımcı olur. Her türlü konstrüksiyonda ve her türlü makine – alet tasarımında en önemli konu malzeme seçimidir. Malzeme seçimi ise, makine veya konstrüksiyonun kullanma yerinin koşullarına göre yapılır.

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri; sertlik, elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı, süneklik, rezilyans, tokluk, basma dayanımı, burma dayanımı, kayma modülü, kırılma tokluğu, aşınma dayanımı, sünme dayanımı, yorulma dayanımı ve çentik darbe dayanımı v.b. şeklinde sıralanabilir. Bu özelliklerin tayin edilmesinde kullanılan başlıca mekanik deneyler şunlardır:

- a) Sertlik deneyleri
- b) Çekme deneyleri
- c) Basma deneyleri
- d) Burma deneyleri
- e) Darbe deneyleri
- f) Kırılma tokluğu deneyleri
- g) Aşınma deneyleri
- h) Yorulma deneyleri
- i) Sürünme deneyleri

Mekanik deneylerin kullanılma başlıca kullanılma yerleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

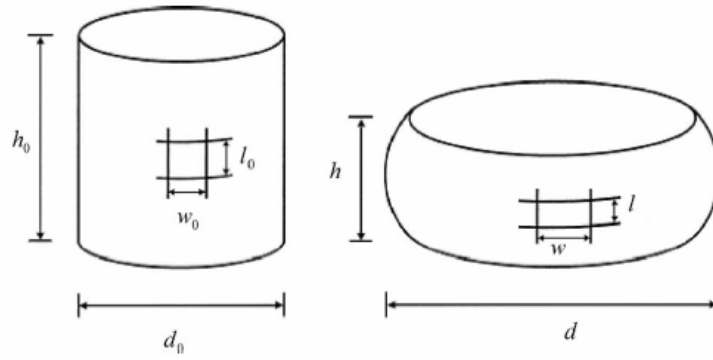
- a) Belirli bir tasarım için kullanılacak malzemenin uygun olup olmadığının tespit edilmesinde.
- b) Yeni bir tasarımda, çeşitli malzemelerden hangisinin daha uygun olacağını tayin edilmesinde.
- c) Belirli özelliklerdeki malzemelerden yapılmış alet ve cihazların kalite kontrolünde, performanslarının tayininde ve kullanılışları esnasında ortaya çıkan aksaklıkların tespit ve giderilmesi ile ilgili çalışmalarda.
- d) Malzeme bilimi ile ilgili teorik çalışmalarda ve teorik kuralların pratiğe uygunluğunun tespitinde [22].

Bu çalışmada, mekanik deneylerden, basma ve çentikli çekme deneyleri kullanılmıştır.

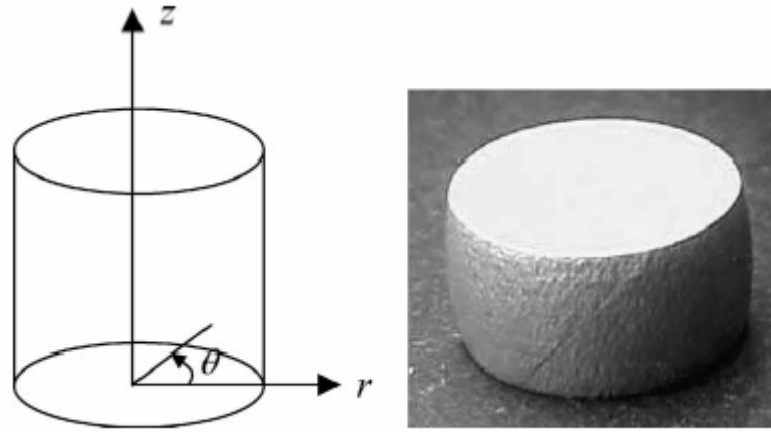
2.2. Basma Deneyi

Basma deneyi, çekme deneyinin tersi olarak kabul edilebilir. Basma kuvvetinin etkin olduğu uygulamalarda kullanılan gevrek malzemelerin mukavemet değerleri genelde basma deneyi ile belirlenir. Bu nedenle, basma deneyinde elde edilen sonuçlar gevrek malzemelerle yapılan tasarımda doğrudan kullanılabilirler. Basma deneyinde, genelde silindirik veya daire kesitli örnekler kullanılır [23].

Kopma uzaması ve kopma büzülmesi değerleri hemen hemen sıfır olan gevrek malzemelerin sünekliği çekme deneyi ile ölçülemez. Bu tür malzemelerin sünekliği basma deneyi ile ölçülür. Basma deneyinde çok küçük boyuttaki örnekler bile deneye tabi tutulabilir [24].



Şekil 2.1. Basma deneyinde birim şekil değişimlerinin ölçülebilmesi için işaretlemenin yapılması [23]



Şekil 2.2. Bir silindirik koordinat sistemi ve basmaya uğramış numunedeki meydana gelen çatlak görünümü [23]

Basma deneyinin en belirgin sakıncaları sürtünmenin varlığı, şekil değişimi ilerledikçe kesitin artması sonucunda yükün de artması ve deneylerin sabit birim şekil değiştirme hızında gerçekleşmesi için özel araç ve gereçlerin gerekmesidir. Özellikle kuvvet ve süneklik değerleri basma deneylerindeki sürtünme koşulları ile kayda değer miktarda farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, malzemelerin mekanik özelliklerinin tayininde sürtünme koşullarından bağımsız olan çekme deneyleri tercih edilmektedir. Bununla beraber, basma deneyleri endüstriyel şekillendirme proseslerine benzerliği ve sürtünme koşullarının etkisini incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Basma deneylerinde, h_0 yüksekliğinde ve D_0 çapındaki silindirik deney numunelerine basma kuvveti uygulanır. Basma sırasında h ve çap D değerleri ölçülür. Herhangi bir andaki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi;

$$\sigma = F / A \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \ln (h / h_0) \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanır.

Basma numunelerinde, üniform bir gerilme durumu elde edilmesi gayesiyle yuvarlak kesitli numuneler tercih edilir. Fakat kare veya dikdörtgen kesitli numuneler de kullanılabilir.

Basma numunelerinde önemli olan bir özellik, numunenin çapı (d_0) ile yüksekliği (h_0) arasındaki orandır. Bu oranın (h_0/d_0) çok büyük olması numunenin deney sırasında bükülmesine ve gerilmelerin numune üzerinde homojen olarak dağılmamasına sebep olur, dolayısıyla yanlış sonuçlar elde edilir. Bu sebeple pratikte üst limit olarak $(h_0/d_0) \leq 10$ oranı tavsiye edilir. Basma numunesinin yüksekliğinin çapa göre çok kısa olması da istenmez, alt limit olarak $(h_0/d_0) \geq 1,5$ oranı tavsiye edilir. Numune boyutlarının $(h_0/d_0) < 1,5$ olması durumunda, numune ile numunenin basıldığı plakalar arasındaki sürtünme, deney sonuçlarını etkileyecek değerlere yükselir. Genel olarak, basma numunelerinde $(h_0/d_0) \geq 2$ oranı en fazla kullanılan orandır. Bununla beraber, farklı malzemeler için farklı (h_0/d_0) oranı kullanılmaktadır. Metalik malzemeler için basma numunelerinde genellikle $h_0/d_0 = 2$ oranı kullanılır.

Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma diyagramlarında gerçek gerilme değerleri birbirine eşittir. Halbuki mühendislik çekme ve basma diyagramlarında, plastik bölgedeki mühendislik basma gerilmeleri değerleri mühendislik çekme gerilmeleri değerlerinden daha fazladır.

Basmada malzemenin deformasyon kabiliyeti veya sünekliği, % Şekil değişimi ile tayin edilir. Basmada malzemenin sünekliği, genel olarak numune yüzeyinde ilk görülebilen çatlakın teŐekkül ettiği deformasyon miktarı olarak tarif edilir.

Basma deneyi ile metalik malzemelerin sünekliğinin tayinindeki zorluk, uygulanan gerilmenin numune üzerinde genellikle üniform olmamasından ileri gelir. Deney cihazındaki basma plakaları ile numune arasındaki sürtünme kuvvetlerinin tesiri ile numunede fıçılama olur. Fıçılama olduğunda numunedeki deformasyon homojen değildir.

Fıçılama, numune ile basma plakaları arasındaki sürtünmeyi azaltmak için seçilecek uygun yağlayıcılarla minimuma indirilebilir. Oda sıcaklığındaki basma deneylerinde teflon, yüksek sıcaklıktaki basma deneylerinde cam uygun yağlayıcılar olarak kullanılabilir [22].

Őekillendirilebilirlik çalıŐmaları için malzemenin düşük kuvvetlerle ve hasara uğramadan fazla Şekil deđiŐtirmesi dövme kabiliyetinin iyi olduğunu gösterir [25].

2.3. Çentikli Çekme Deneyi

Çekme deneyi, bir numunenin tek ekseninde ve sabit hızda koparılıncaya kadar çekilmesi iŐlemidir [25]. Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranıŐlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılır [26].

Farklı tipteki çekme testinde düz ve silindirik numuneler gibi parçalar sık sık kullanılır. Ancak, çatlak oluşumunda eşdeğer birim Şekil değişimi, numunelerin Şekilleriyle ilişkili gerilme durumuna bağlıdır. Bir başka deyişle, eşdeğer birim Şekil değişimi, farklı geometrilerdeki çekme numunelerinde aynı değildir. Bu yüzden, farklı numuneler daima, çatlak oluşumunda aynı birim Şekil deđiŐimine sahip değildir. Bundan başka, çekme deneylerinde boyun vermenin nerede ve ne zaman oluşacağı belirgin olmadığından ve de yükleme koşullarında deđiŐime neden olduğundan elde edilen süneklik değerleri güvenilir olmamaktadır. Deney

koşullarının deney süresince sabit kalmaması nedeniyle gerilme halindeki belirgin değişim çentikli çekme deneyleri ile giderilmeye çalışılmaktadır.

Çentikli çekme deneyi, numuneye çentik ile boyun verilerek çekme işleminin yapılmasıdır. Çentikli çekme deneyi, geniş ölçüde yüksek dayanıklı çeliklerin özellikleri, yüksek sıcaklıktaki alaşımların çentik hassasiyetinin araştırılması için yapılmaktadır. Son zamanlarda çentikli çekme numuneleri kırılma mekaniğinin ölçülebilmesi için kullanılmaktadır. Çentik hassasiyeti ayrıca çentik etkisi ile araştırılabilir. Bunlardan başka, süneklik tayininde de kullanılmaktadır.

Çekme deneyinden saptanan şekil değiştirme miktarı boyun verme nedeniyle güvenilir değildir. Boyun verme başlangıcı ile tek eksenli gerilme halinden üç eksenli gerilme haline geçilir ve kopma bu gerilme hali etkisiyle gerçekleşir. Bu nedenle, dövülebilirlik sürekli üç eksenli gerilme hali etkisinin geçerli olduğu, kopmanın meydana geldiği bölgede gerilme ve şekil değiştirme değerlerini veren çentikli çekme deneyleri ile araştırılmıştır.

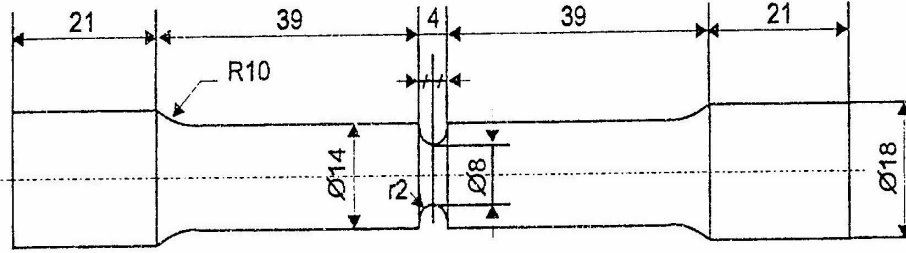
Şekil 2.3'deki gibi numuneler ile çentikli çekme deneyleri, çentikli kesitteki çeşitli azalma değerlerini sağlayan kuvvetlerin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiş ve numuneler koparılanaya kadar deneyler sürdürülür. Deneylerden elde edilen σ_d ve buna karşılık gelen F değerlerinden, üç farklı çentik yarıçapını birlikte içeren F ile (d_0-d) , σ_x/σ_0 ve σ_m/σ_0 ile $2 \ln d_0/d$ arasındaki ilişkiler grafik şeklinde ve kopmaya yol açan değerlerden incelenir. Burada σ_x eksenel gerilmeyi, σ_m ortalama gerilmeyi ve σ_0 efektif gerilmeyi ifade etmektedir.

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan değerlerle gerçekleştirilen grafikler ve çizelge aşağıdaki denklemlerle bulunur [26] :

$$\sigma_x / \sigma_0 = 1 + (d/2) / 2R \quad (2.3)$$

$$\sigma_m / \sigma_0 = (1/3) + (d/2) / 2R \quad (2.4)$$

$$\epsilon_{kopma} = 2 \ln d_0/d_{kopma} \quad (2.5)$$



Şekil 2.3. Çentikli çekme numunesi örneği

Çentikli çekme işlemi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde çentikli çekme işlemi yumuşak çelik malzemesi kullanılarak 2 boyutta aksinel simetrik olarak modellenmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile Bridgman modeli arasındaki ilişki bulunmuştur. Üç eksenli çalışmada malzeme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak hasarın oluşumunda üç eksenli gerilmenin temel parametre olmadığı ispatlanmıştır [21].

Çentikli çekme deneyi hasar modelinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada 3 farklı çentik çapından oluşan numunelere ait deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözülerek sayısal sonuçlar karşılaştırılmaktadır [27]. Bir başka hasar modeli ise üç eksenli ve yönden bağımsız olarak modellenmiştir. Gerçek gerilim ve birim şekil değişimi değerlerinden yola çıkarak sonlu elemanlar yöntemi ile farklı malzeme çeşitleri için uygulanan kuvvetin çaptaki azalma miktarına göre değişim grafikleri elde edilmiştir [28].

Hasar modelinin incelendiği bir çalışmada ise SEY analizinde kullanılmak üzere Gurson akma gerilmesi formülü kullanılmıştır. Buna göre formül aşağıdaki gibidir [28,29]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_Y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_Y} \right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (2.6)$$

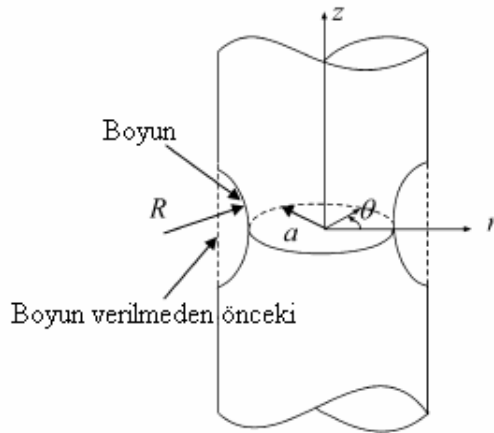
Burada, σ_{eq} Von Misses eşdeğer gerilmesi, σ_Y malzemenin akma gerilimi, p hidrostatik basınç, q_1, q_2 ve q_3 malzeme sabitleri, f ise hasar parametresidir.

Çentikli çekme gerilme testleri, numuneye farklı çaplarda çentiklerin makine yardımı ile işlenerek farklı gerilme düzeylerine neden olmayı amaçlar. Hidrostatik gerilme ile eşdeğer gerilme arasındaki oran aşağıdaki Bridgman denklemi ile ifade edilmiştir [8].

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln \left(\frac{a^2 + 2aR - r^2}{2aR} \right) \quad (2.7)$$

Bu denklemde r minimum kesite ait radyal koordinat, a minimum kesitin yarıçapı ve R çentik yarıçapıdır (Şekil 2.4). Bu oran çentik kökünde $r = a$ olduğundan $1/3$ 'dür. Maksimum değer ise $r = 0$ olduğundan aşağıdaki denklem elde edilerek hesaplanır [24].

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (2.8)$$










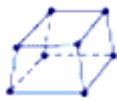


Şekil 2.4. Boyun verilmiş deney numunesine ait parametrelerin gösterimi [23]

BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir.

Sonlu elemanlar yöntemi, çok çeşitli mühendislik problemine sonuç elde etmek için uygulanabilecek sayısal bir işlemdir. Kararlı rejimli, değişken rejimli, lineer, lineer olmayan durumlar için gerilim(stress) analizi, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetizma problemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilir. Modern sonlu elemanlar yönteminin izleri 1900'lu yılların başına kadar sürer. Bu yıllarda bazı araştırmacılar sürekli elastik durumu eş boyutlardaki kesikli elastik parçalarla modellemişlerdir. Bununla birlikte, Courant sonlu elemanlar yöntemini ilk geliştiren kişi olarak anılmıştır [30].

Courant'tan sonra sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanıldığı diğer önemli adım Boeing'in 1950'lerde uçak kanatlarını modellemek için üçgen gerilim elemanları kullanmasıyla atılmıştır [30]. 1960'larda araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini diğer mühendislik alanlarında kullanmaya başlamışlardır. Zienkiewicz ve Cheung 1967'de tamamen sonlu elemanları anlatan bir kitap yazmışlardır [31]. Günümüzde birçok alanda sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Çoğu popüler program paketleri 1970'li (ABAQUS, ADINA, ANSYS, MARK, PAFEC) ve 1980'li (FENRIS, LARSTRAN '80, SESAM '80.) yıllarda kullanılmaya başlamıştır [32].

Boyut	Eleman Derecesi	Eleman Şekli	Eleman Tipi
1-D (Eğri)	Lineer		Kiriş
	Kuadratik		Kiriş
	Kübik		Kiriş
2-D (Alan)	Lineer		Kabuk
	Kuadratik		
	Kübik		
3-D (Hacim)	Lineer		
	Kuadratik		

Şekil 3.1. Sonlu eleman yönteminde eleman tipleri [33]

İlk başlarda sonlu elemanlar yöntemini bütün işlemleri elle yapılımıştır. Bundan dolayı, işlemler 10–100 eleman için yapılmıştır. Fakat eleman sayısının azlığı sonuçların hassasiyetini kısıtlamaktaydı. Bilgisayarların gelişmesi ile bu işlemler bilgisayara aktarılmış ve eleman sayıları arttırılmıştır (Şekil 3.1). Bu gün problemlerde milyonlarca eleman kullanılmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi; sayısal bir yöntem olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir [30]. Sonlu Elemanlar Yönteminde (Finite Elements Method (FEM)) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, bu noktalara düğüm (node) denir.

Örneğin, katı modellerde her bir elemandaki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi düğüm noktaları için tanımlanmış şartları, matematiksel lineer denklemlere çevirir, önce bu denklemler çözülür ve bütün elemanlardaki gerçek gerilmeleri bulmaya çalışır. Sonuç olarak model ne kadar çok sayıda elemana bölünürse o elemente uygulanan yüke göre daha gerçekçi sonuç verir.

Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanının almış olduğu en büyük değer pratikte özel bir önem taşır [30].

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar "node" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde matematiksel bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler "node"lardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Bu yöntemde yapı "sonlu" boyutta çok sayıda "elemana" bölünerek analizler gerçekleştirilmektedir. Metodun adı da buradan gelmektedir [34].

Matematik modelleme işleminin, modelin varyasyonel problem olarak ifade edilmesinden sonraki aşaması, bilgisayarda çözümlenmesi hedeflenen ayrık modelin

oluşturulmasıdır. Günümüzde, diferansiyel denklemlerle ilgili matematik modellerin ayrık benzeşiklerinin oluşturulması ve elde edilen ayrık problemin bilgisayarda çözümlenmesi açısından en kapsamlı ve evrensel yöntem, sonlu elemanlar yöntemi (SEY)'dir. Bu yöntemin klasik sonlu farklar yönteminden başlıca farkı, bunun sınır değer problemini değil, varyasyonel problemi temel almasıdır.

Bu nedenle SEY, bilimsel ve teknolojik problemlerin sayısal çözümlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. SEY'in boyutlarının büyüklüğünü göstermek için, bunun hem matematiksel analiz, hem diferansiyel denklemler, hem sayısal yöntemler, hem bilgisayar bilimleri, hem de ayrıca çeşitli mühendislik bilimleri dallarıyla iç içe olduğunu söylemek yeterlidir [30].

Sonlu eleman metodunu diğer metotlara üstün kılan başlıca hususlar şunlardır: [30]

1. Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cisimi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
2. Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köseleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
3. Değişik malzeme ve/ya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme "nonlineerite"leri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
4. Sebep-sonuç bağıntılarına ait problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözümlenmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
5. Sınır şartları kolayca uygulanır.
6. Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

Sonlu elemanlar yönteminin günümüzdeki uygulamaları oldukça fazladır ve diferansiyel eşitliklerle düzenlenen fiziksel tüm problemleri kapsar. Sonlu elemanlar yönteminin yararları, genişçe kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Bunların bazıları: [32]

1. Bitişik elemanlardaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik bir kaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkân vermektedir.
2. Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilirler.
3. Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı artırılabilir.
4. Süreksiz yüzey yüklemeleri gibi sınır durumları yöntem için zorluk oluşturmaz. Karışık sınır durumları kolaylıkla ele alınabilir.

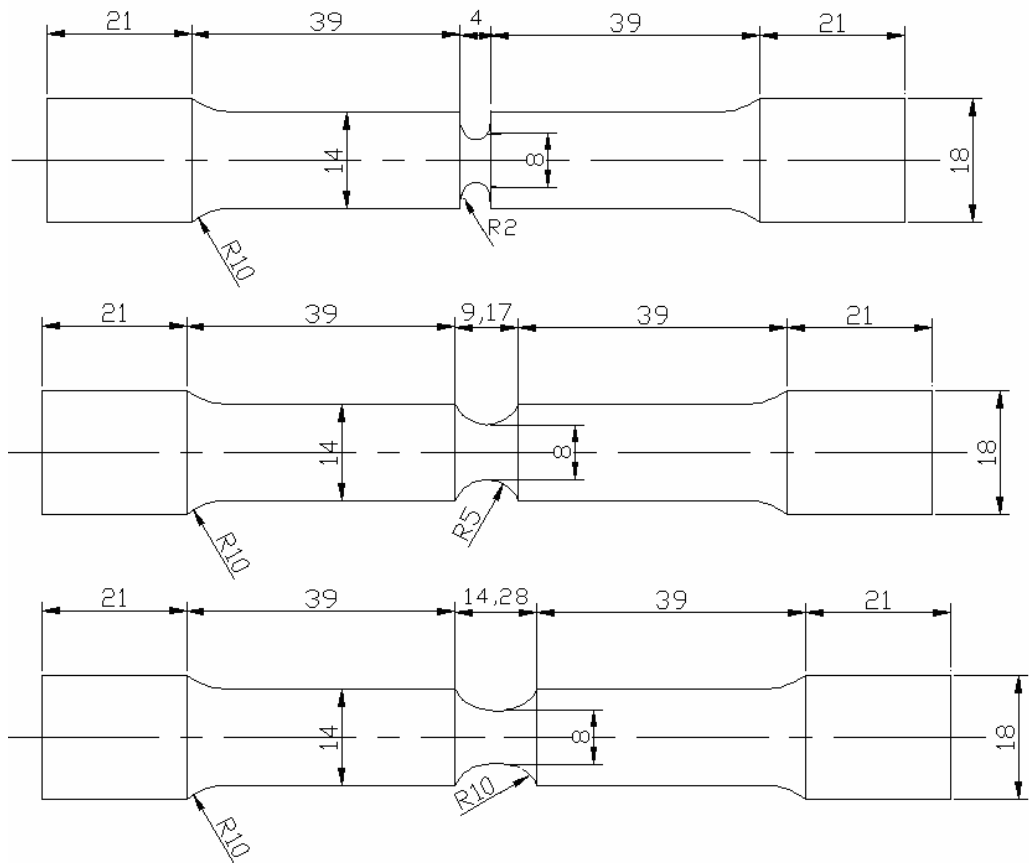
Çözümü istenilen problemin geometrisi, kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı paket program içinde veya bir CAD ortamında oluşturulabilir. Modelin başka CAD ortamında oluşturulması durumunda IGES, SAT, VDA gibi dönüştürücü formatlar kullanılarak sonlu elemanlar programına transfer edilebilir [34].

BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ ÇALIŞMASI

4.1. Giriş

Bu çalışmada farklı malzemelere ait çentikli çekme değerlerinin SEY ile belirlenmesi ve daha önce yapılmış deney sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

4.2. Geometri Özellikleri



Şekil 4.1. Çentikli çekme deneyi numunelerine ait geometrik ölçüler [26]

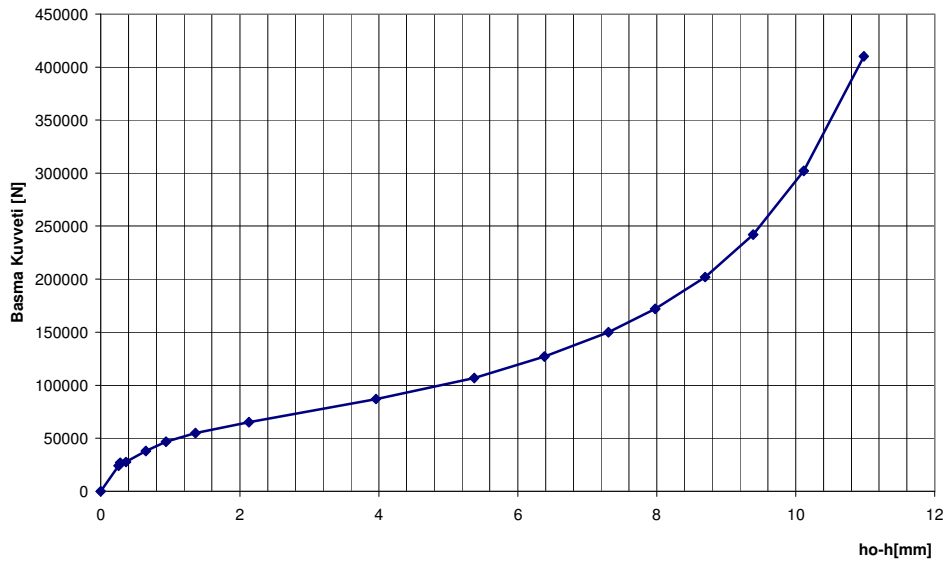
Numuneye ait geometrik ölçüler şekil 4.1’de gösterilmektedir. Numuneleri çentik yarıçapları 2, 5 ve 10 mm olarak tanımlanmıştır [26].

4.3. Malzeme Özellikleri

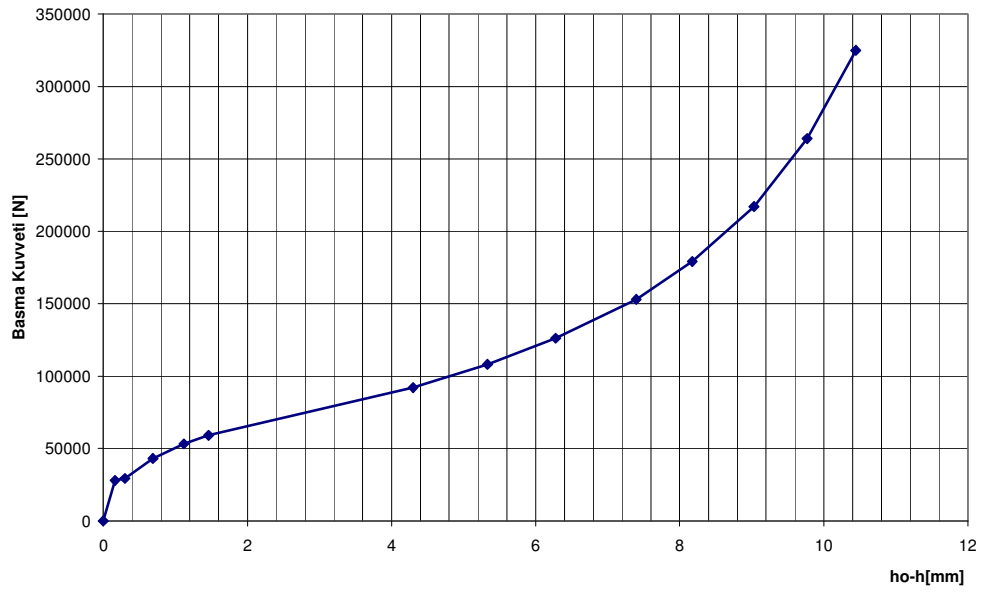
Referans alınan deneyde AISI 1040 ve 4140 olmak üzere 2 farklı çelik seçilmiştir. Elastisite modülü 200 GPa, poisson oranı 0.3 alınmıştır. Basma [26] deneyinde elde edilen sonuçlar ele alınarak her bir malzeme için gerçek gerilme – birim şekil değişimi değerleri elde edilerek MISO (Multi linear isotropic hardening) eğrileri çıkarılmıştır.

4.3.1. Referans deneye ait basma eğrisinden gerçek gerilim ve birim şekil değişimi değerinin kullanılması

Referans deneye ait basma eğrisine ait değerler aşağıdaki formüller ile gerçek birim şekil değişimi ve gerçek gerilim değerlerine çevrilerek oluşturulan eğri sonlu elemanlar yönteminde (SEY) MISO değeri olarak girilmiştir [26]. Basma deneyine ait grafikler şekil 4.2 ve şekil 4.3’de yer almaktadır.



Şekil 4.2. Küreselleştirilmiş AISI 1040 çeliğine ait basma deneyi grafiği [26]



Şekil 4.3. Küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğine ait basma deneyi grafiği [26]

$$\varepsilon = \ln \frac{d}{d_0} \quad (4.1)$$

ε = Gerçek birim şekil değişimi değeri

d = numunenin herhangi bir andaki çap miktarı

d_0 = numunenin ilk çap miktarı

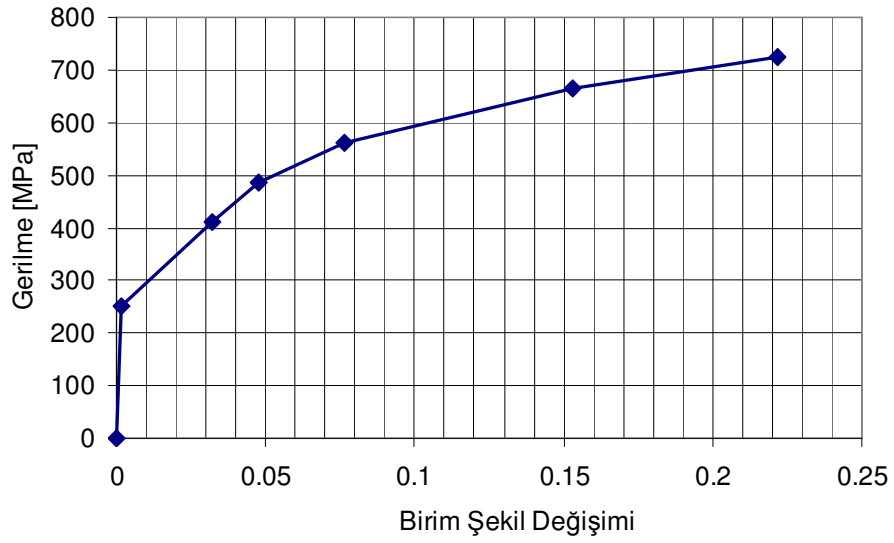
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

σ = Gerçek gerilim değeri

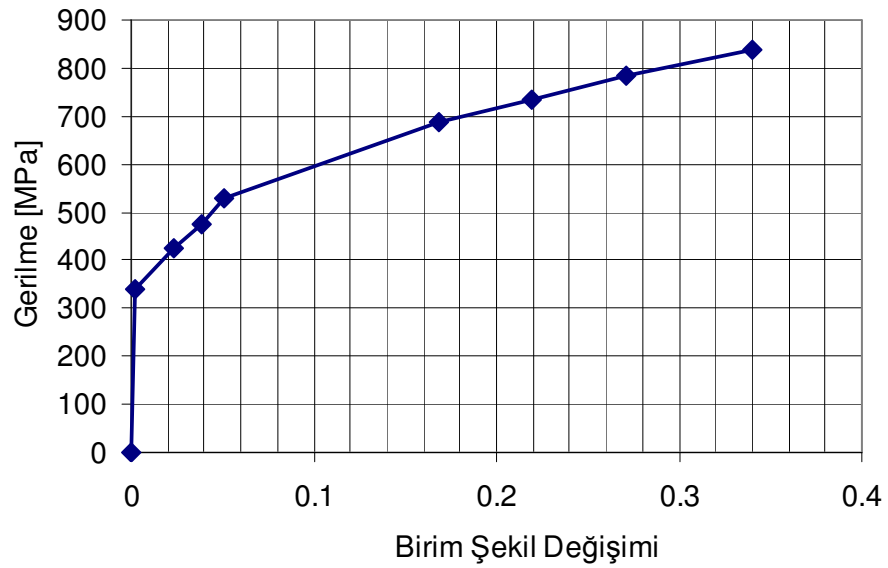
F= Herhangi bir andaki kuvvet değeri

A = Herhangi bir andaki kesit alanı

Bu denklemler ile elde edilen MISO eğrileri şekil 4.4 ve şekil 4.5'deki gibidir.



Şekil 4.4. AISI 1040 çeliğine ait basma eğrisinden elde edilen MISO eğrisi



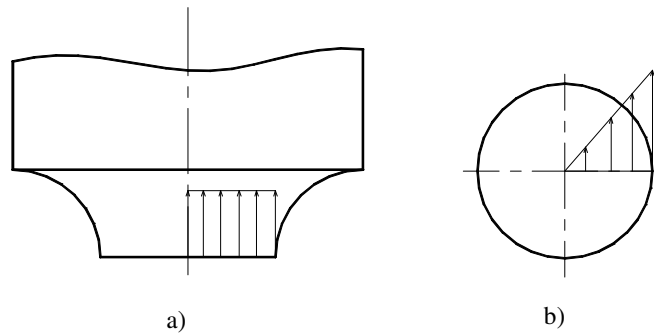
Şekil 4.5. AISI 4140 çeliğine ait basma eğrisinden elde edilen MISO eğrisi

4.4. Gerilme Yığılma Faktörü Hesabı

Gerilme yığılma faktörünü aksel yüklemeye çentik kökünde nominal çekme gerilmesinin düzgün dağılım gösterdiği düşünölmüştür (Şekil 4.6-a). Çentik kökünde birim gerilme oluşturmak için gerekli birim yüklemeye değeri elde edilir. Bu birim yüklemeye durumu için sonlu eleman analizi ile aksel (y) ve çevresel (x) yöndeki gerilme bileşenleri değeri elde edilir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen değeri ile nominal gerilme değeri oranı, aksel yüklemeye gerilme yığılma faktörü olarak belirlenir (Denklem 4.4 ve 4.5). Çevresel yüklemeye de aynı şekilde birim gerilme için gerekli yüklemeye belirlenir. Sonlu eleman analizi yüklemeye koşullarını oluşturmak için dairesel ve çentik kesiti olmak üzere iki kesit belirlenmiştir (Şekil 4.6) [35].

S_{yy} ; Çentik kökünde oluşan aksel (y) yöndeki nominal çekme gerilme değeri.

$$S_{yy} = \frac{F}{A} \quad \text{Nominal Çekme gerilmesi} \quad (4.3)$$



Şekil 4.6. a) Nominal (S_{yy}) çekme gerilmesinin çentik kökünde dağılımı b) Nominal (S_{zy}) kayma gerilmesinin çentik kökünde dağılımı [35]

$$K_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{S_{yy}^c} \quad (4.4)$$

$$K_{zy} = \frac{\sigma_{zy}}{S_{zz}^c} \quad (4.5)$$

K_{yy} : Aksel yüklemeye için aksel yöndeki gerilme yığılma faktörüdür,

K_{zy} : Aksel yüklemeye için çevresel yöndeki gerilme yığılma faktörüdür.

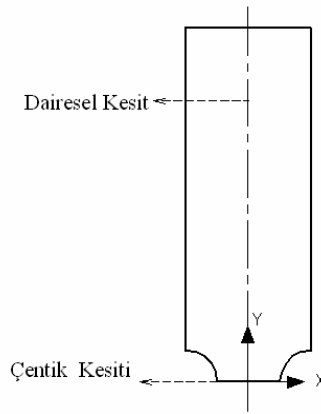
4.4.1. Eksenel yönde uygulanan kuvvet için

Eksenel yönde uygulanan kuvvet için gerilme yığılma faktörünün hesaplanmasında, nominal gerilme değeri ve sonlu elaman analizi gerilme değerleri bilinmelidir. Birim nominal gerilme değeri için yükleme hesaplamaları aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 4.7'deki geometri üzerindeki kesitlerde alanlar;

$$A_d = 254.469\text{mm}^2 \quad (\text{Dairesel kesitteki alan})$$

$$A_\zeta = 50.265\text{mm}^2 \quad (\text{Çentik kesitindeki alan})$$



Şekil 4.7. Parça kesit noktalarının gösterimi

Çentik kesitinde birim gerilme oluşturmak için gerekli F eksenel kuvveti denklem 4.3'ü kullanarak elde edilir.

$$F = A_\zeta \cdot S_{yy}^\zeta$$

Eksenel kuvveti oluşturmak için gerekli basınç değeri;

$$P^d = \frac{F}{A^d} \quad (4.6)$$

P^d : Dairesel kesite uygulanan basınç değeridir.

Çentik kesiti ve dairel kesit için kuvvet eşitliği yazılacak olursa,

$$P^d \cdot A^d = P^\zeta \cdot A^\zeta \quad (4.7)$$

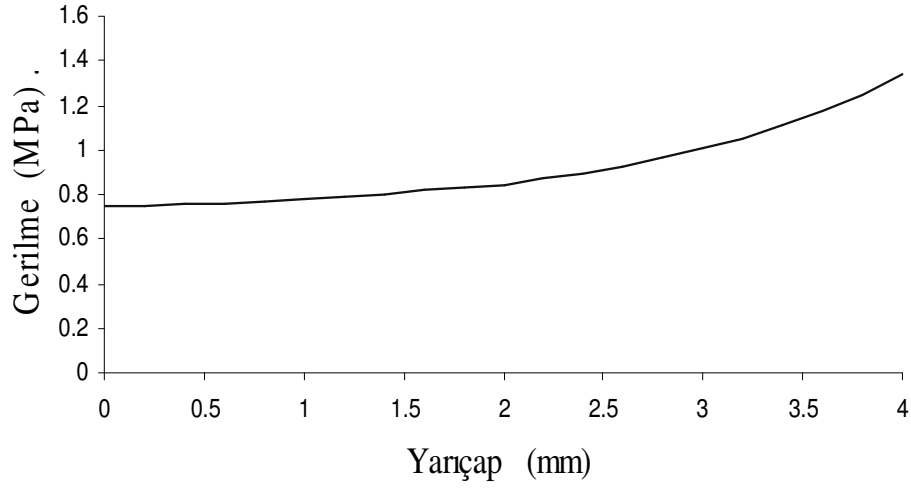
$$P^{\zeta} = S_{yy}^{\zeta} \quad (4.8)$$

$$P^d = \frac{A^{\zeta}}{A^d} \cdot S_{yy}^{\zeta} \quad (4.9)$$

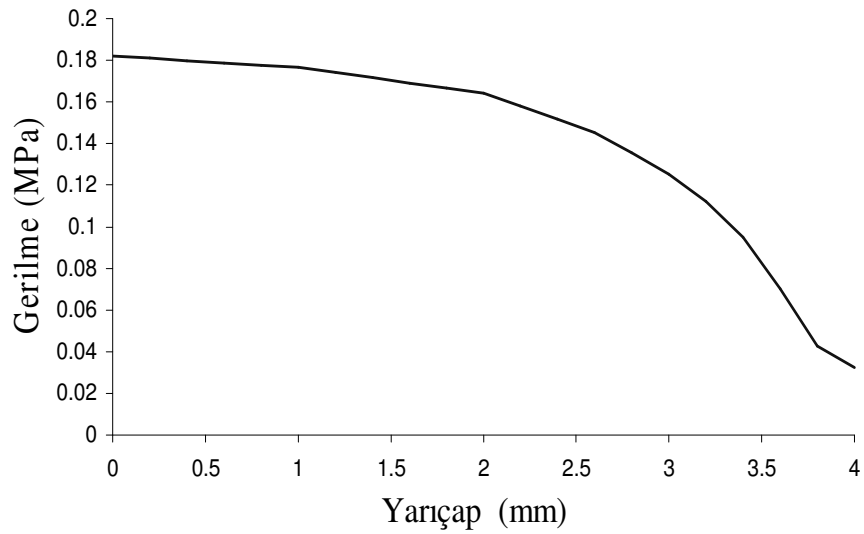
Çentik kesitinde 1 birimlik gerilme oluşturmak için gerekli basınç yükü;

$$P^d = 0.1975 \text{ N/mm}^2 \text{ 'dir.}$$

Dolayısıyla çentik kesitinde bir birimlik gerilme oluşturmak için, dairesel kesitteki gerekli basınç yükü 0.1975 birimdir.



Şekil 4.8. SEM ile elde edilmiş çentik kökündeki aksenal (y) yöndeki gerilme dağılımı



Şekil 4.9. SEM ile elde edilmiş çentik kökündeki radial (x) yönde gerilme dağılımı

0.1975 N/mm²'lik basınç sonucu SEY ile yapılmış çentikli çekme deneyi analizi sonucunda çentik kökünde aksenal (şekil 4.8) ve radial (şekil 4.9) gerilme değerleri elde edilmiştir.

SEM ile elde edilen değerler alınarak gerilme yığılma faktörü hesaplamak için denklem 4.4'ü kullanırsak;

$$K_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{S_{yy}^c} = \frac{1.3447}{1} = 1.3447$$

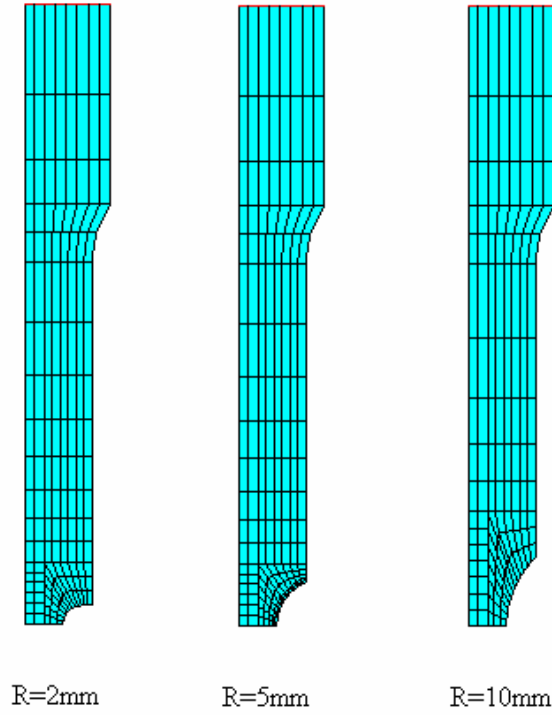
K_{yy} , aksenal (y) yönde uygulanan kuvvet için aksenal (y) yönde oluşan gerilme yığılma faktörüdür.

4.5. Modelin Tanımlanması

Modellerimiz şekil 4.10'daki gibi 1/4'lük kısmını aksenal simetrik olarak modelleriz. Aksenal simetriklikte numune kesitinin her yönde aynı deformasyon özelliği gösterdiği varsayılmaktadır.

4.6. Sonlu Elemanlar Ağı

Eleman tipi olarak "Ansys Plane42" kullanılmıştır. Çentikli numunemizde oluşturduğumuz ağ yapısı şekil 4.10'da gösterilmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken alan 9 parçaya ayrılmış ve her bir alanda ayrı ayrı ağ yapısı oluşturulmuştur. Çentikli bölgede daha hassas sonuçlar elde edebilmemiz için daha küçük elemandan oluşan bir ağ yapısı kullanılmıştır.



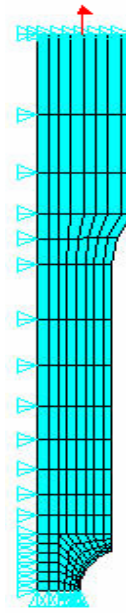
Şekil 4.10. Çentikli numuneye ait oluşturulmuş ağ yapısının görünümü

4.7. Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar yönteminde aksenal simetrik numuneler için, çözümün daha kolay ve daha kısa sürede gerçekleşmesi için numunelerin simetri eksenlerine göre 1/2'lik, hatta 1/4'lük kısmı modellenmektedir.

Çekme kuvveti etkisindeki numunede, simetri ekseni boyunca yer alan elemanlar her iki yönden eşit gerilme etkisinde kalacağından dikey simetri ekseni x (yatay) ve yatay simetri ekseni de y (dikey) yöndeki hareketi engellenmiştir.

Çentikli çekme deneylerinde çekme kuvveti, etki ettiği alanın her noktasına eşit olarak etki ettiğinden, sonlu elemanlar yönteminde çentikli çekme modelinde, çekme kuvvetine eşit basınç kuvveti ile çekme işlemi uygulanmıştır (Şekil 4.11).



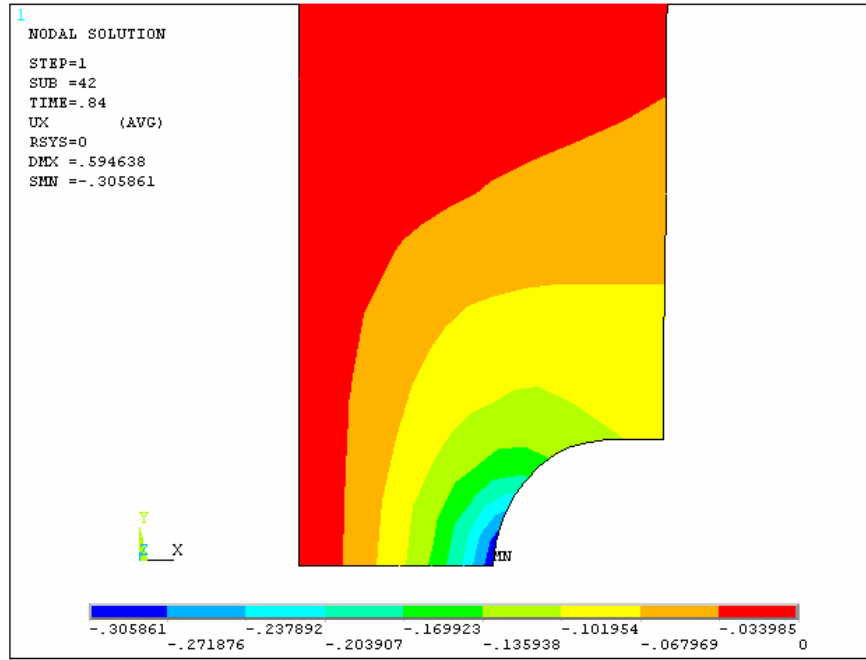
Şekil 4.11. Modele ait sınır koşullarının gösterimi

BÖLÜM 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI

5.1. Yatay (x) Yöndeki Şekil Değişimi Sonuçları

Yatay (x) yöndeki şekil değişimi SEY verileri, maksimum şekil değişiminin numune kesitinin hangi bölgesinde oluştuğunu görebilmemiz için gereklidir.

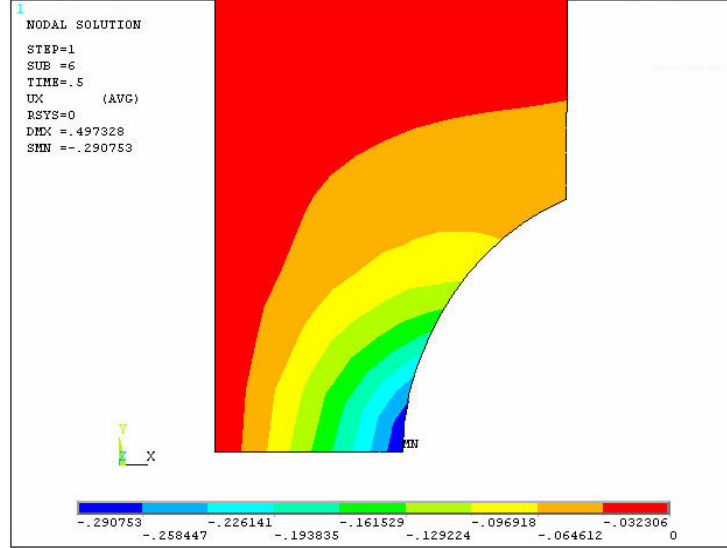
AISI 1040 çeliğine ait yatay (x) yöndeki şekil değişimini gösteren SEY verileri şekil 5.1 – 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.1. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için)

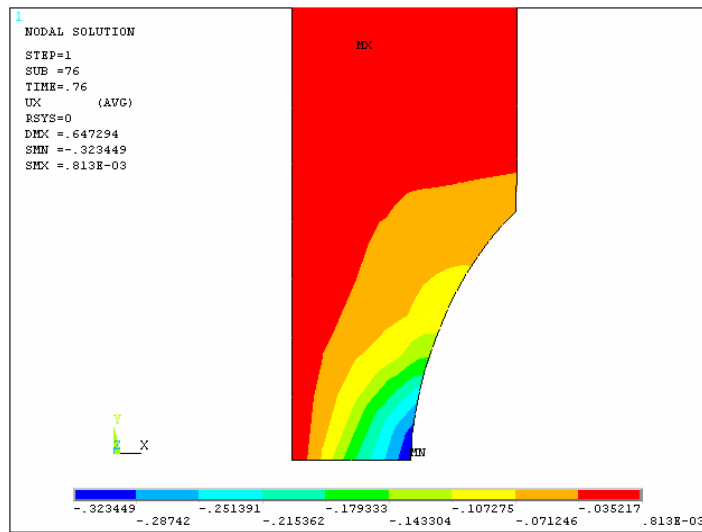
Şekil 5.1’de en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta

40.54kN'luk çekme kuvveti etkisinde 0.305861mm'lik bir değer ile yaklaşık %15 'lik bir azalmanın meydana geldiğini göstermektedir.



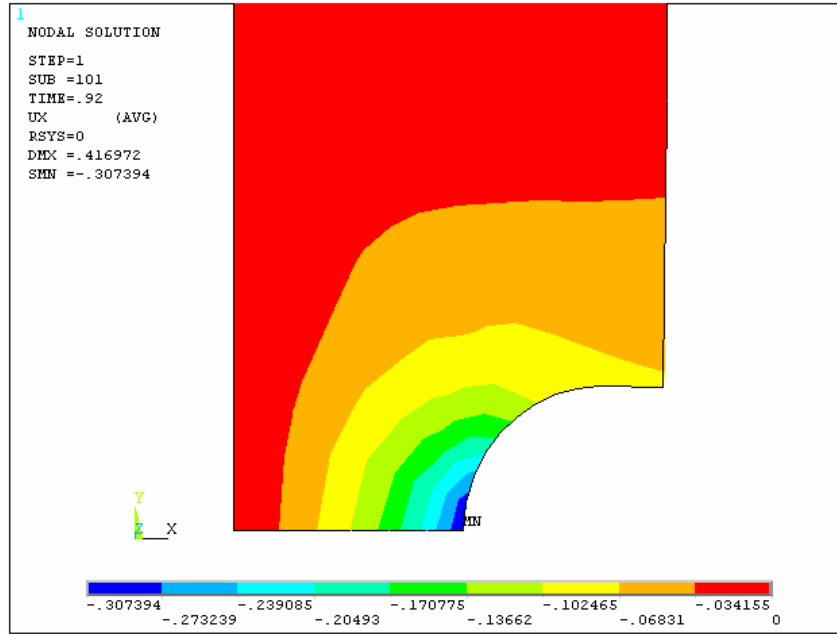
Şekil 5.2. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için)

Şekil 5.2'de en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta 34.8kN'luk çekme kuvveti etkisinde 0.290753mm'lik bir değer ile yaklaşık %14 'lük bir azalmanın meydana geldiğini göstermektedir.

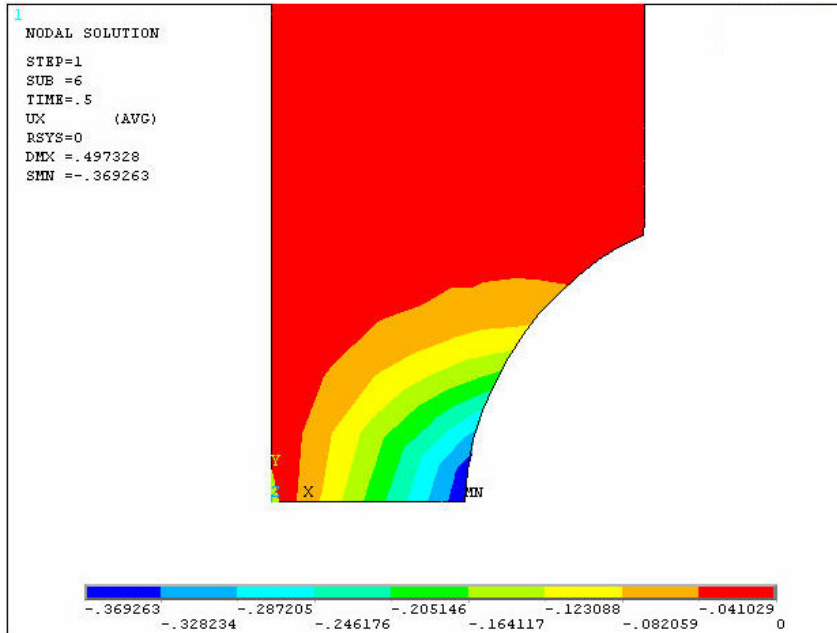


Şekil 5.3. AISI 1040 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için)

Şekil 5.3’de en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta 34.16kN’luk çekme kuvveti etkisinde 0.323449mm’lik bir değer ile yaklaşık %16’lık bir azalmanın meydana geldiğini göstermektedir.



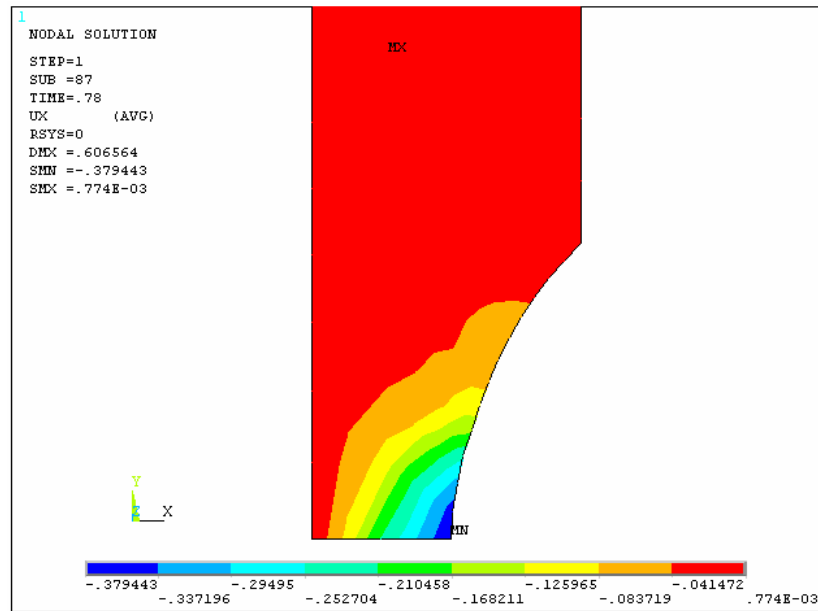
Şekil 5.4. AISI 4140 için numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için)



Şekil 5.5. AISI 4140 numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için)

Şekil 5.4'de en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta 41.35kN'luk çekme kuvveti etkisinde 0.307394mm'lik bir değer ile yaklaşık %15.36'lık bir azalma meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 5.5'de en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta 34.7kN'luk çekme kuvveti etkisinde 0.369263mm'lik bir değer ile yaklaşık %17.61'lik bir azalma meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 5.6. AISI 4140 numunede yatay yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için)

Şekil 5.6'da en fazla deformasyon çentik noktasında, (MN) olarak ifade edilmiş bölgede oluşmuştur. Bu sonuç bize numunenin çentik kesitine ait yarıçapta 34.16kN'luk çekme kuvveti etkisinde 0.379443mm'lik bir değer ile yaklaşık %18.97'lik bir azalma meydana geldiğini göstermektedir.

Yukarıdaki şekillerde numune üzerinde bölgesel olarak yatay yönde yer değiştirme miktarları gösterilmiştir. Bu grafikler bize, kuvvet etkisi altındaki numunedeki

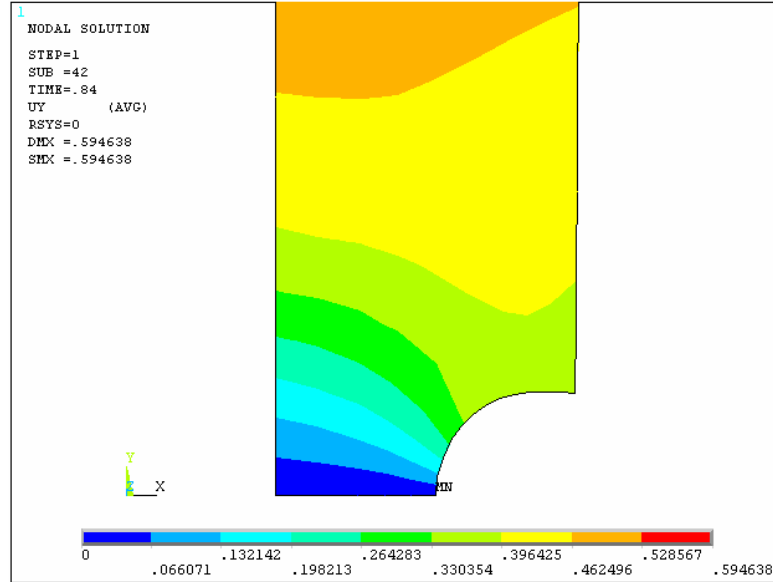
şekilsel değişim miktarlarını renkler yardımı ile göstermektedir. Numunenin çentik kökü noktasındaki minimum kesitteki ΔD ($d_0 - d$)'lik kesit daralması bu grafiklerden tespit edilebilmektedir. En fazla yer değiştirme miktarının çentik kökünde (MN) olarak belirtilen bölgede olduğu görülmektedir. Şekil değişimi sola doğru olduğundan en fazla yer değişimi minimum (MN) negatif değerde meydana gelmiştir.

Ayrıca bu grafikler numunenin şekilsel değişimi hakkında fikir sahibi olmamızda yardımcı olmaktadır.

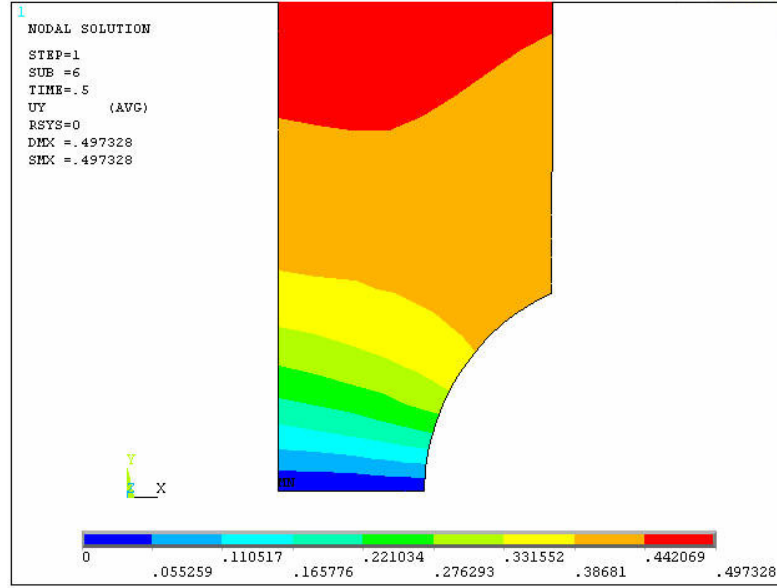
5.2. Dikey (y) Yöndeki Şekil Değişimi Sonuçları

Dikey (y) yöndeki şekil değişimi sonuçları, numunelerin kesitlerinde çekme yönündeki şekil değişimi miktarı dağılımı hakkında bilgi verir.

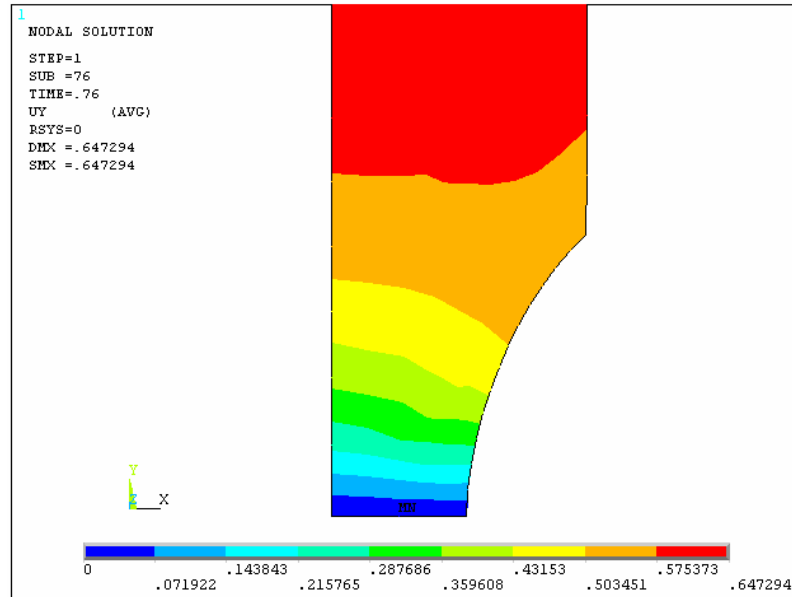
Şekil 5.7 – 5.9 AISI 1040, Şekil 5.10 – 5.12 AISI 4140 malzemeleri için farklı çentik yarıçaplı numunelere uygulanan çentikli çekme SEY dikey yöndeki şekil değişimi dağılımı sonuçlarını göstermektedir.



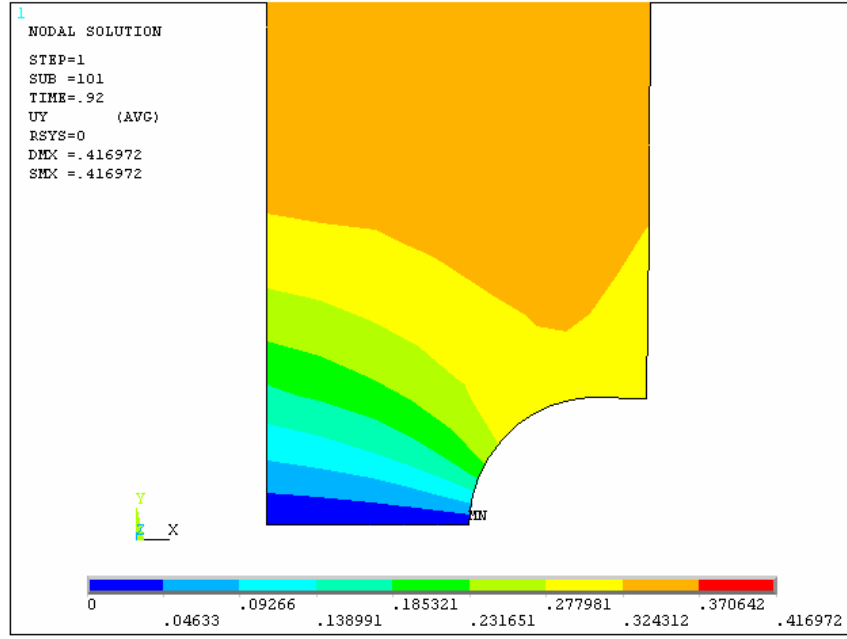
Şekil 5.7. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için)



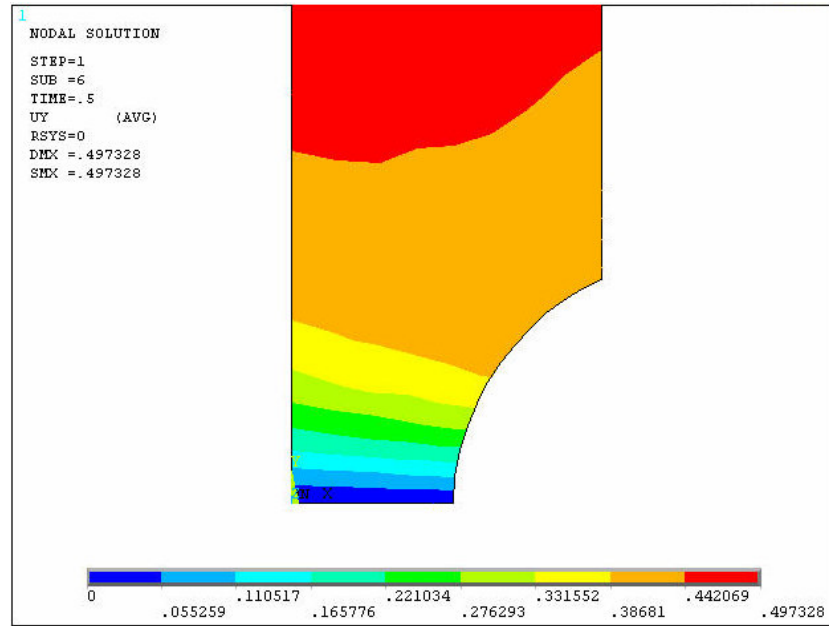
Şekil 5.8. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için)



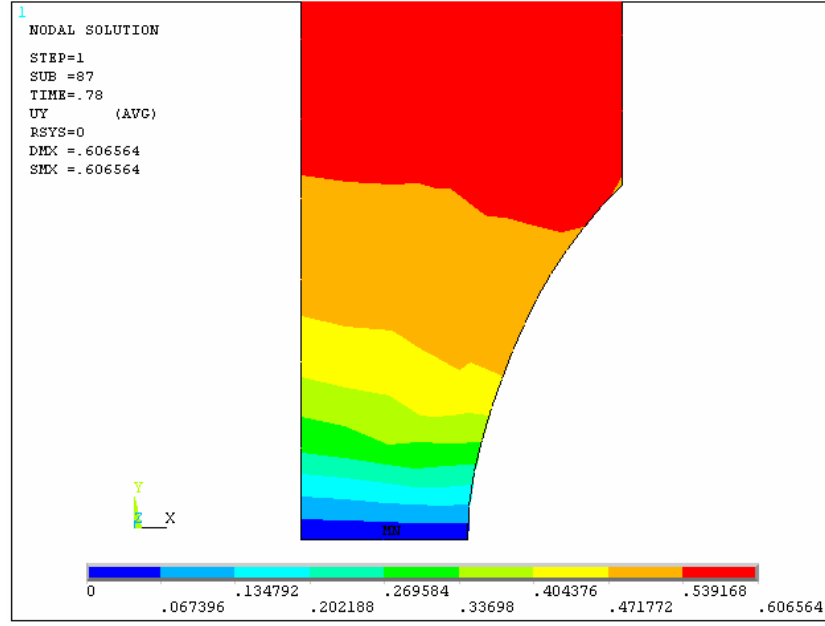
Şekil 5.9. AISI 1040 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için)



Şekil 5.10. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=2mm için)



Şekil 5.11. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=5mm için)

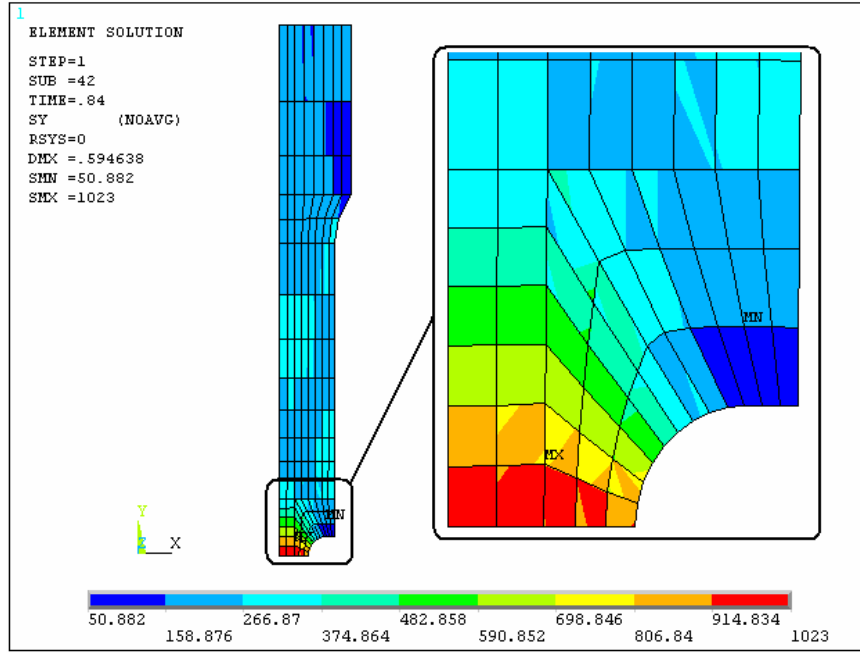


Şekil 5.12. AISI 4140 numunede dikey yönde oluşan deformasyon değerleri (R=10mm için)

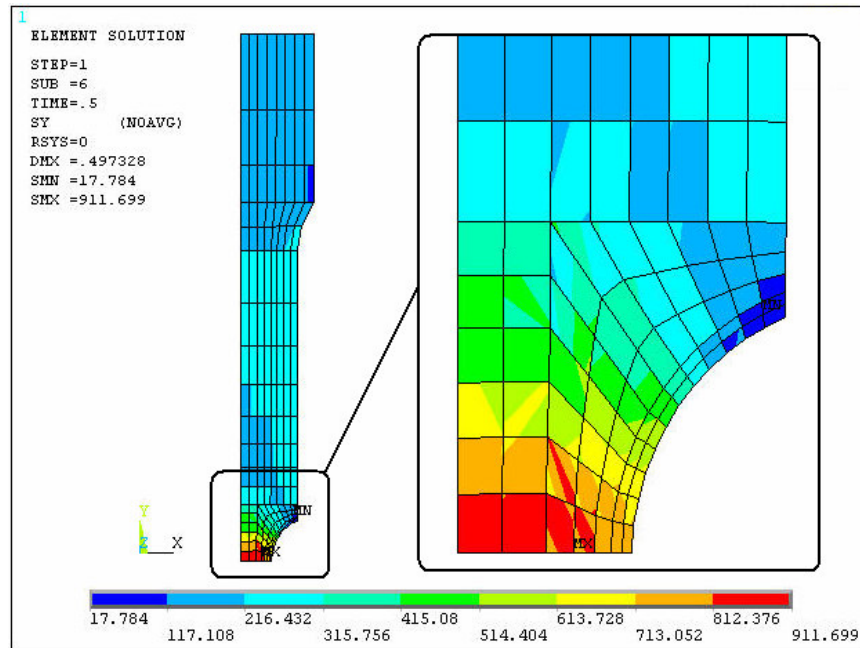
Yukarıdaki şekillerde numune üzerinde bölgesel olarak dikey yönde yer değiştirme miktarları gösterilmiştir. Bu grafikler bize, kuvvet etkisi altındaki numunedeki şekilsel değişim miktarlarını renkler yardımı ile göstermektedir. Kuvvet etkisi altındaki numunenin, Δh ($h - h_0$)'lik kesit uzama miktarı bu grafiklerden tespit edilebilmektedir. En fazla yer değiştirme miktarının kuvvetin etki ettiği numunenin en üst noktasında olarak belirtilen bölgede oluştuğu görülmektedir. Numuneye her iki yönden etki eden kuvvetler, çentik kökünde kesit boyunca yer alan elemanlar üzerinde çentik kesiti bölgesinde herhangi bir deformasyonun oluşmadığı görülmektedir.

5.3. Eksenel Gerilme Değişimi Sonuçları

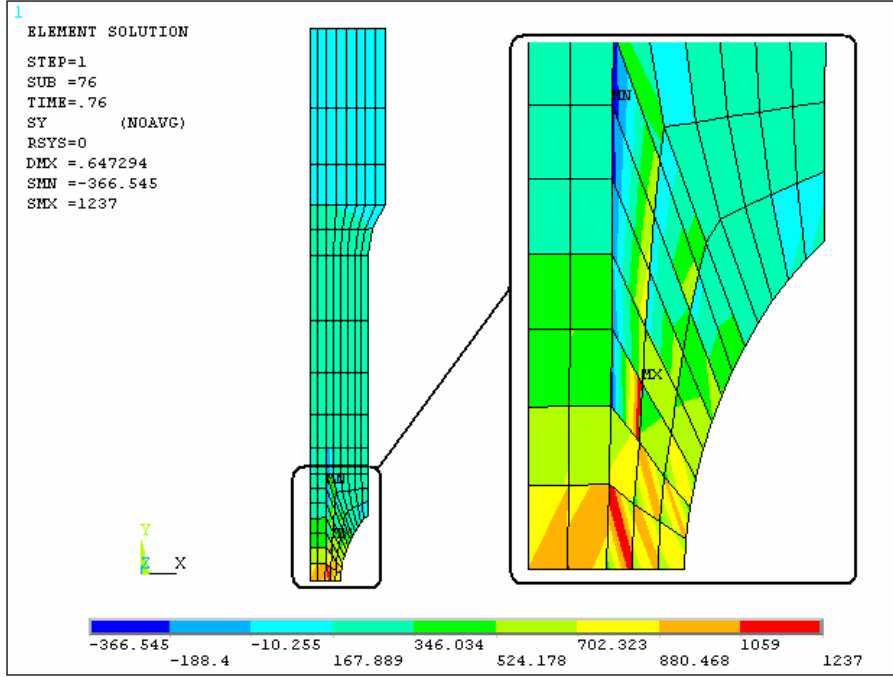
AISI 1040 çeliğine ait aksenal gerilmedeki değişimi veren SEY verileri aşağıda şekil 5.13 – 5.15 de sunulmuştur.



Şekil 5.13. AISI 1040 için numunede aksel yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=2mm için)



Şekil 5.14. AISI 1040 için numunede aksel yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=5mm için)

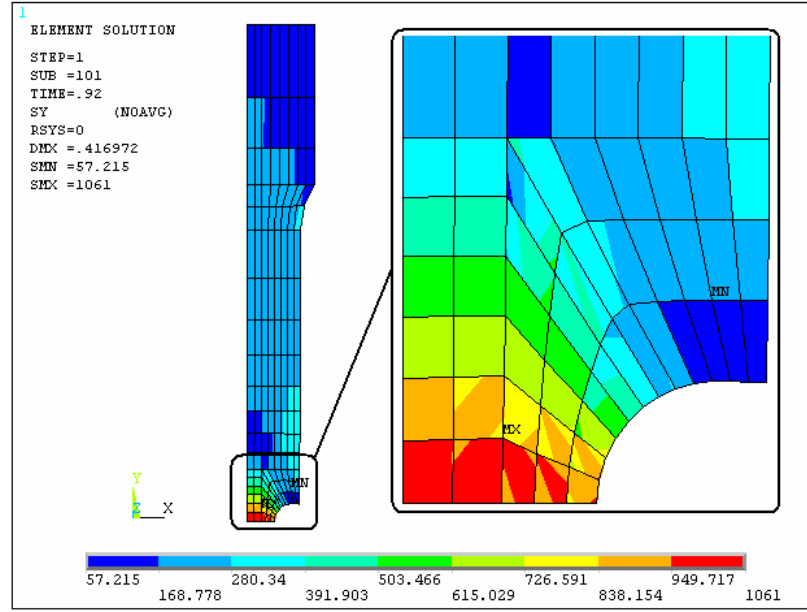


Şekil 5.15. AISI 1040 için numunede aksel yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=10mm için)

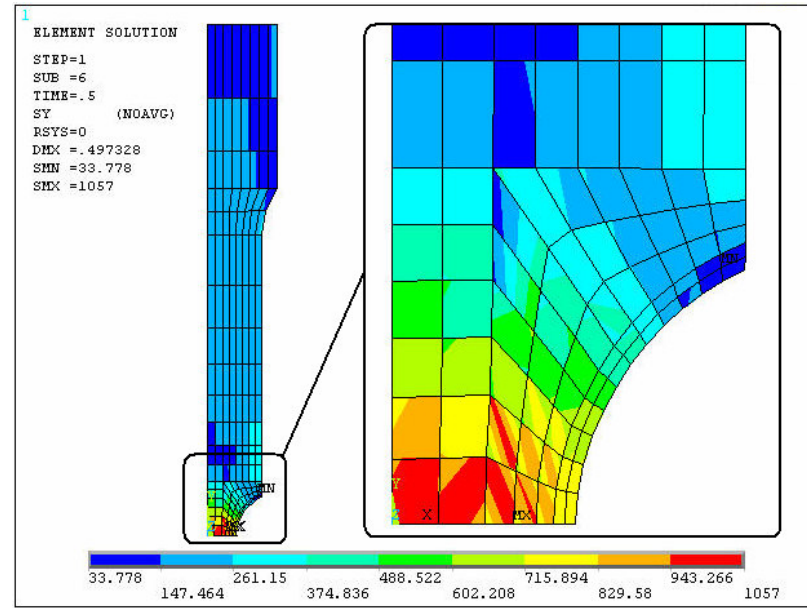
Şekil 5.13 – 5.15’deki çentikli çekme deneyi aksel gerilme değerleri verileri maksimum zorlanmanın çentik yüzeyinden daha içerde olduğunu göstermektedir. Bu durum çentik bölgesindeki plastik şekildeğişiminde gerilme dağılımını inceleyen çalışmalara uygundur [36].

Şekil 5.13’de R2 için maksimum aksel gerilme değeri 1023 MPa, şekil 5.14’de R5 için 911.699 MPa ve şekil 5.15’de R10 için ise 1237 MPa bulunmuştur.

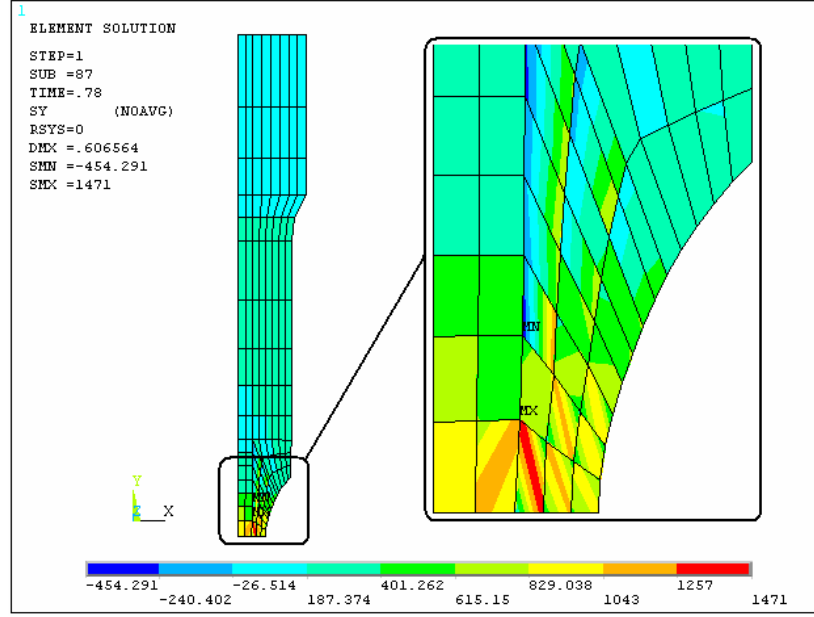
AISI 4140 çeliğine ait aksel gerilmedeki değişimi veren SEY verileri aşağıda Şekil 5.16 – 5.18 de sunulmuştur.



Şekil 5.16. AISI 4140 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=2mm için)



Şekil 5.17. AISI 4140 için numunede aksenal yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=5mm için)

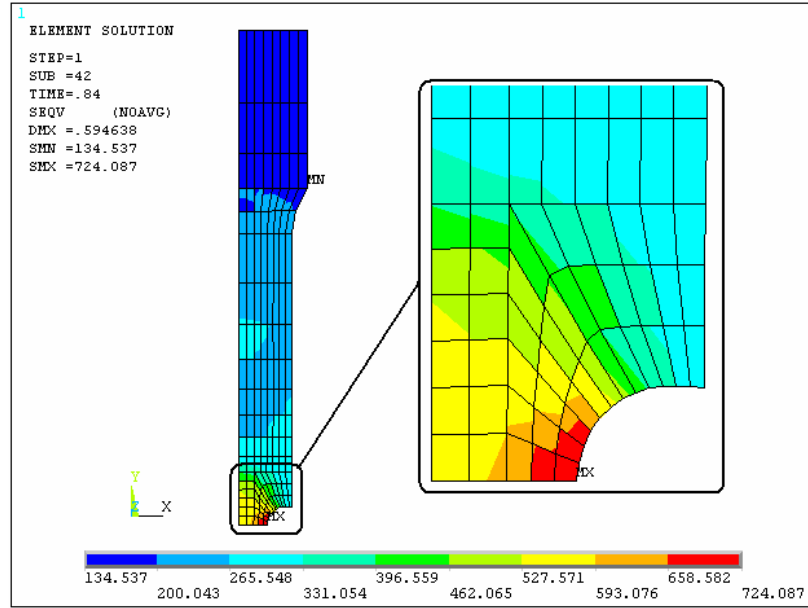


Şekil 5.18. AISI 4140 için numunede aksel yönde meydana gelen gerilim değerleri (R=10mm için)

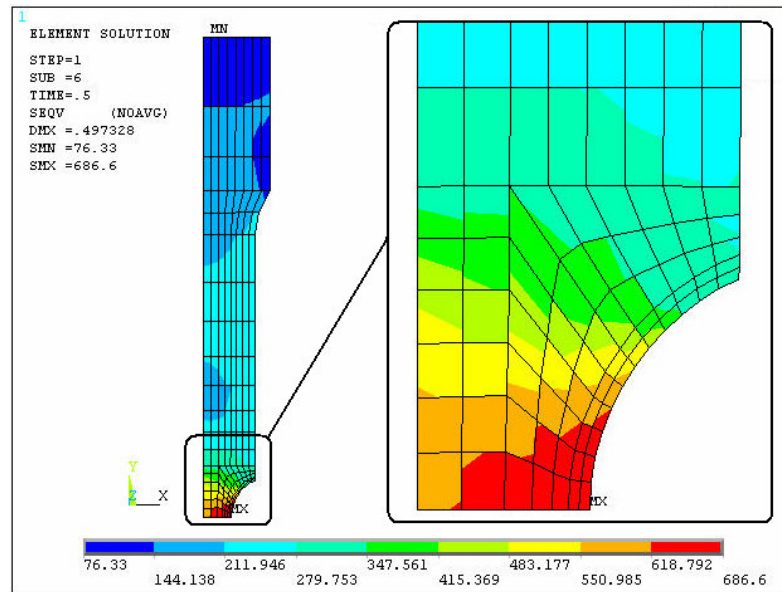
R2 için maksimum aksel gerilme değeri 1061 MPa, R5 için 1057 MPa, R10 için 1471 MPa bulunmuştur.

5.4. Eşdeğer Gerilme Değişimi Sonuçları

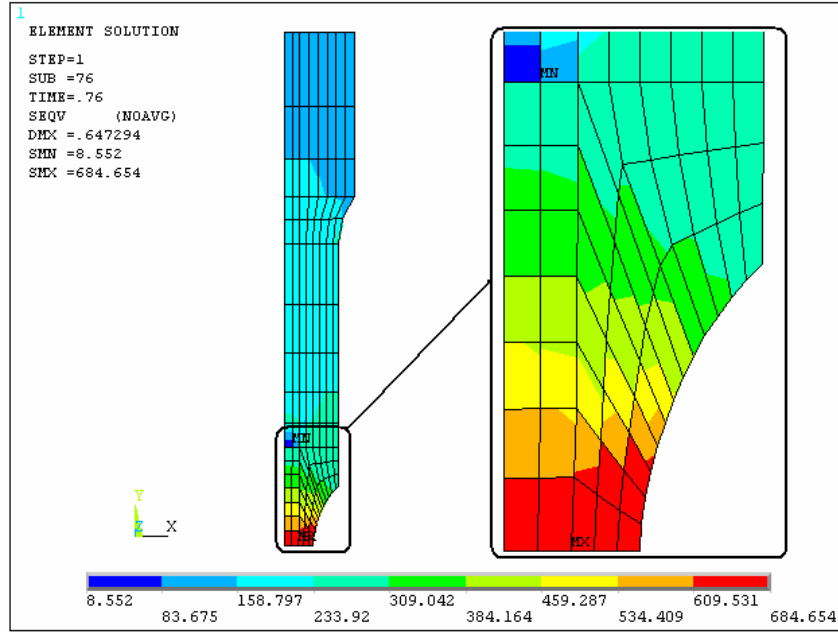
AISI 1040 ve AISI 4140 numuneleri ile üç farklı çentik yarıçapı için uygulanan SEY analizlerinden elde edilen eşdeğer gerilmelerin kesitteki dağılımını gösteren sonuçlar Şekil 5.19 – 5.24 de görülmektedir.



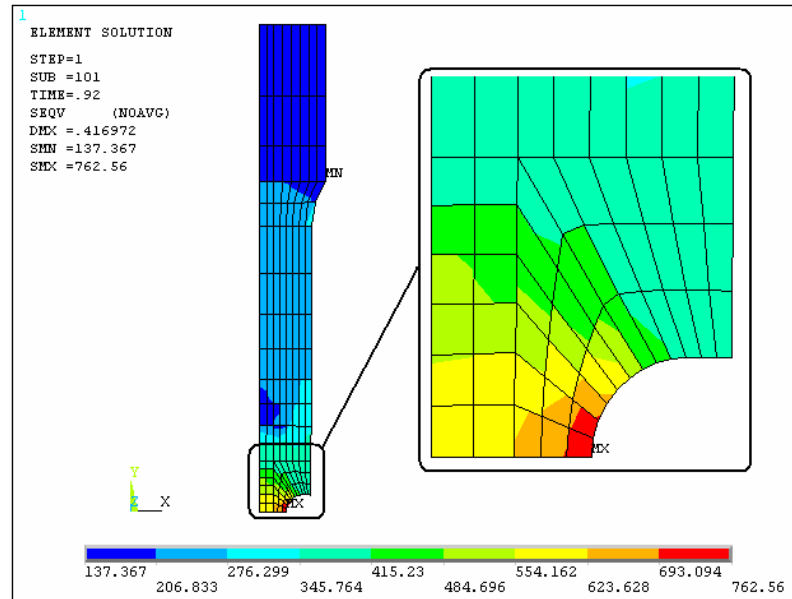
Şekil 5.19. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=2mm için)



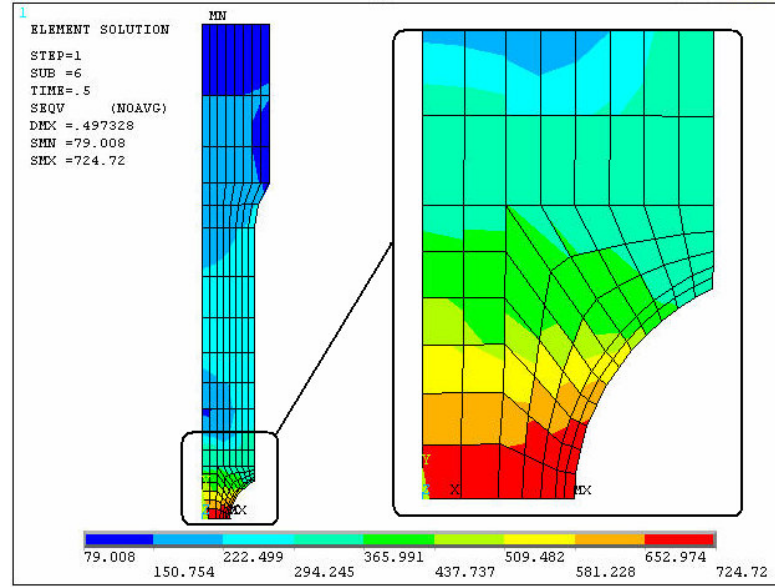
Şekil 5.20. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=5mm için)



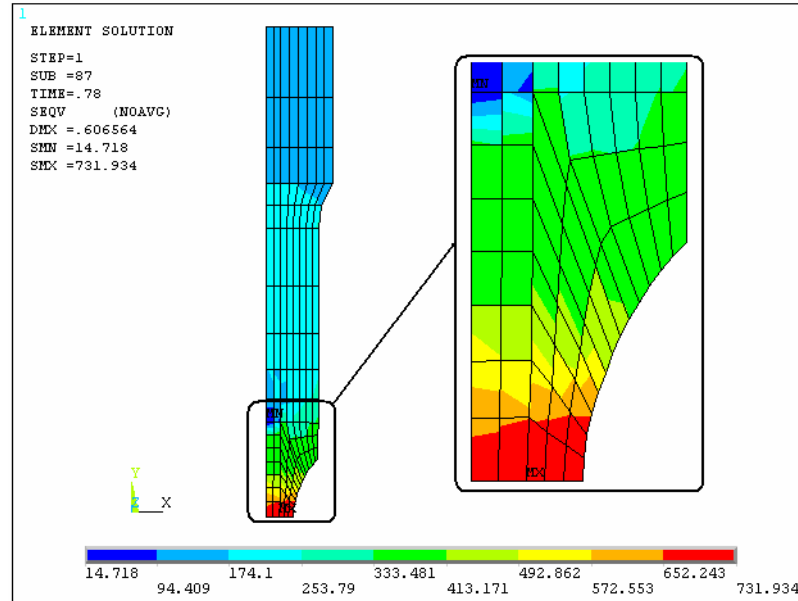
Şekil 5.21. AISI 1040 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=10mm için)



Şekil 5.22. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=2mm için)



Şekil 5.23. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=5mm için)

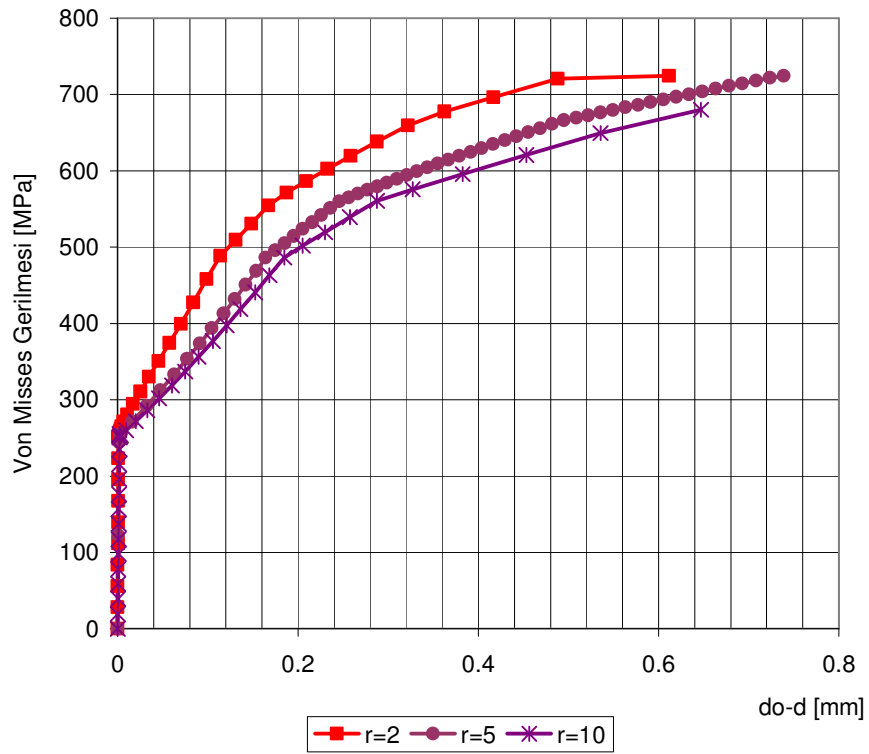


Şekil 5.24. AISI 4140 için numunedeki von Misses eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (R=10mm için)

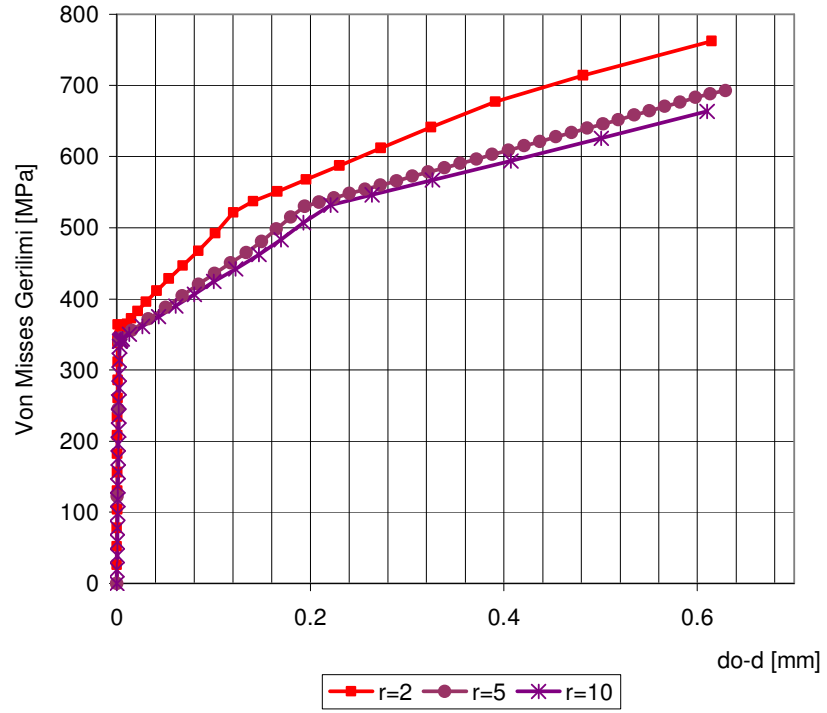
Yukarıda analiz sonucunda çentikli çekme numunesi üzerinde meydana gelen von Misses eşdeğer gerilme dağılımları gösterilmektedir. Maksimum eşdeğer gerilmenin meydana geldiği çentik kökündeki gerilme değerlerinin, çentik yarıçapının artmasıyla kesit boyunca artış gösterdiği görülmektedir. Çentik kökünde oluşan

maksimum eşdeğer gerilme değerlerinin, küreselleştirilmiş AISI 4140 numunesinde daha yüksek çıktığı görülmektedir.

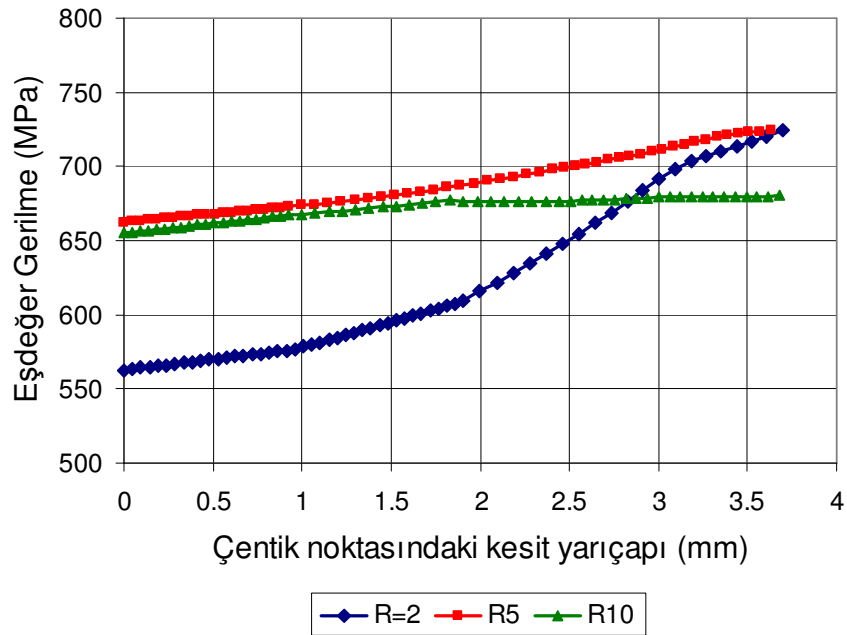
Şekil 5.25 ve 5.26 da çentik kökünde oluşan von Misses eşdeğer gerilme değerleri çentik yarıçaplarına göre karşılaştırılmıştır. Her iki malzemede de çentik yarıçapının arttıkça eşdeğer gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak eşdeğer gerilmenin artması ile gerilme üç eksenliliğinin azalma gösterdiği söylenebilir.



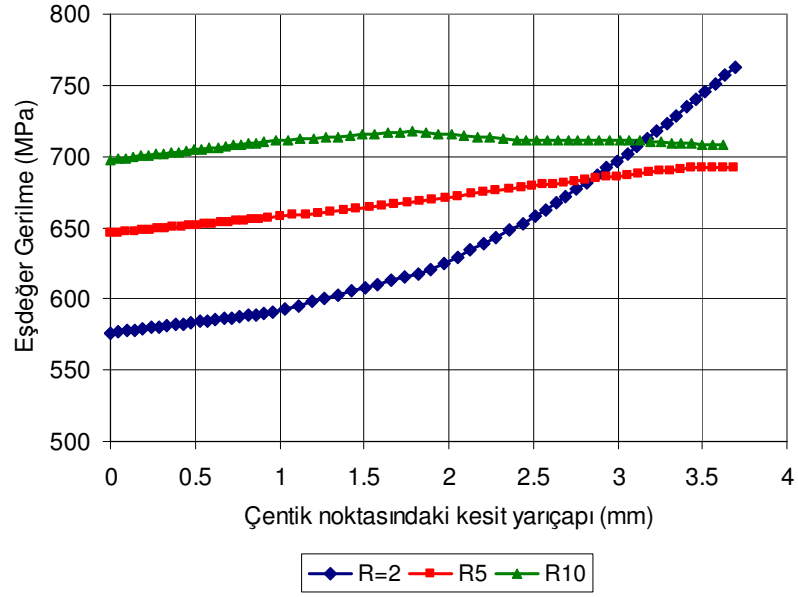
Şekil 5.25. AISI 1040 için çentik kökünde meydana gelen von Misses eşdeğer gerilimin değişimi



Şekil 5.26. AISI 4140 için çentik kökünde meydana gelen Von Mises eşdeğer gerilimin değişimi



Şekil 5.27. AISI 1040 için eşdeğer gerilmenin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi

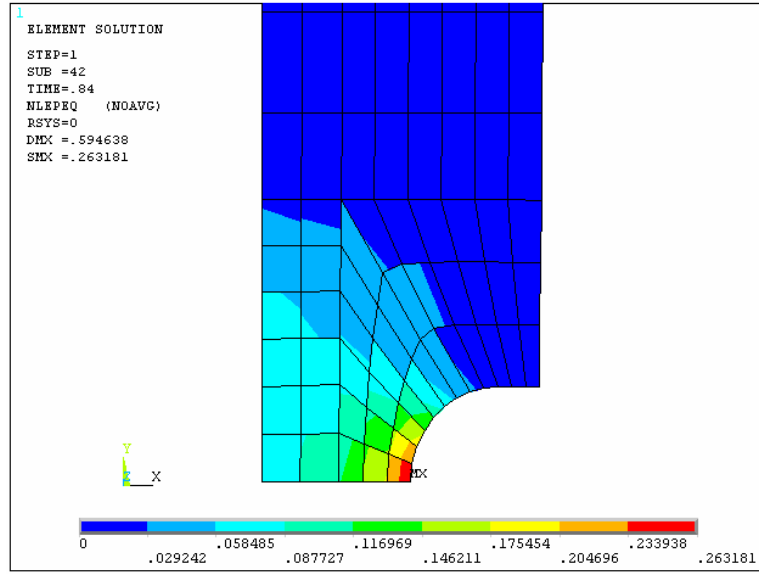


Şekil 5.28. AISI 4140 için eşdeğer gerilmenin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi

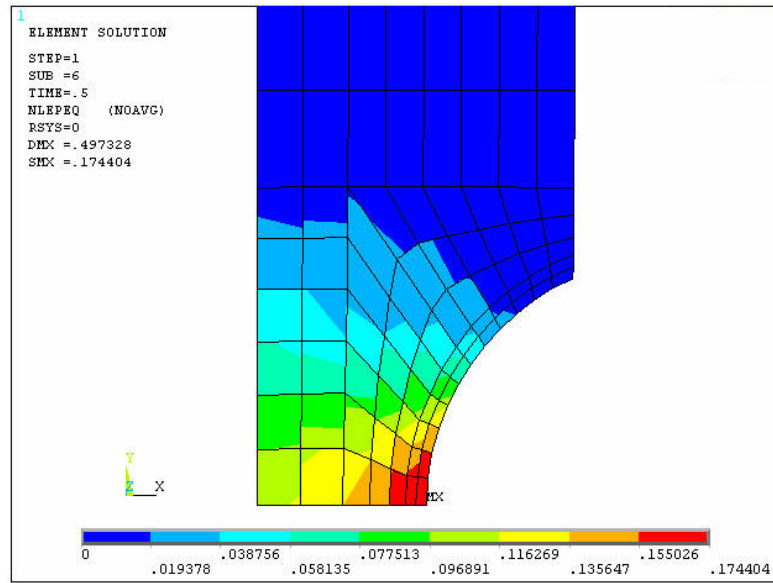
Şekil 5.27 ve 5.28 de eşdeğer gerilmenin numunenin çentik bölgesindeki kesit boyunca değişimi gösterilmektedir. Gerilme değerlerinin, numunenin çentik köküne doğru artış gösterdiği görülmektedir. Bu artış miktarı, çentik yarıçapı arttıkça azalmaktadır.

5.5. Eşdeğer Birim Şekil Değişimi Sonuçları

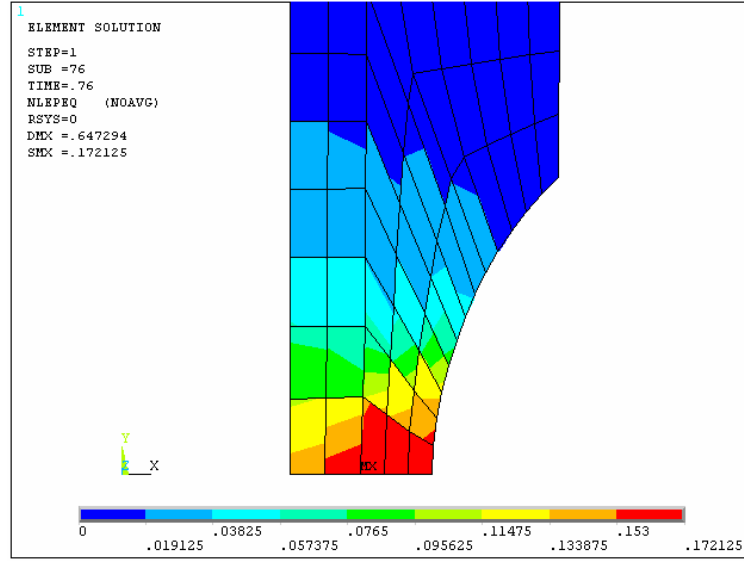
AISI 1040 ve AISI 4140 numuneleri ile üç farklı çentik yarıçapı için uygulanan SEY analizlerinden elde edilen eşdeğer birim şekil değişiminin kesitteki dağılımını gösteren sonuçlar Şekil 5.29 – 5.34 de görülmektedir.



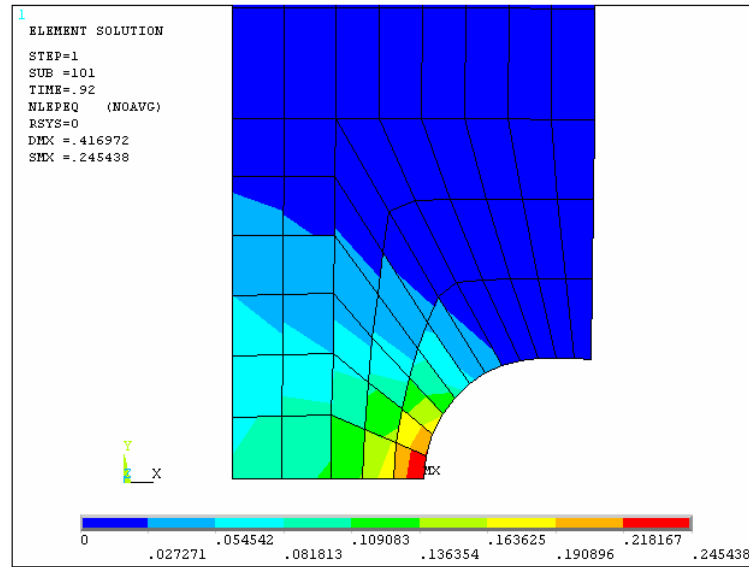
Şekil 5.29. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=2mm için)



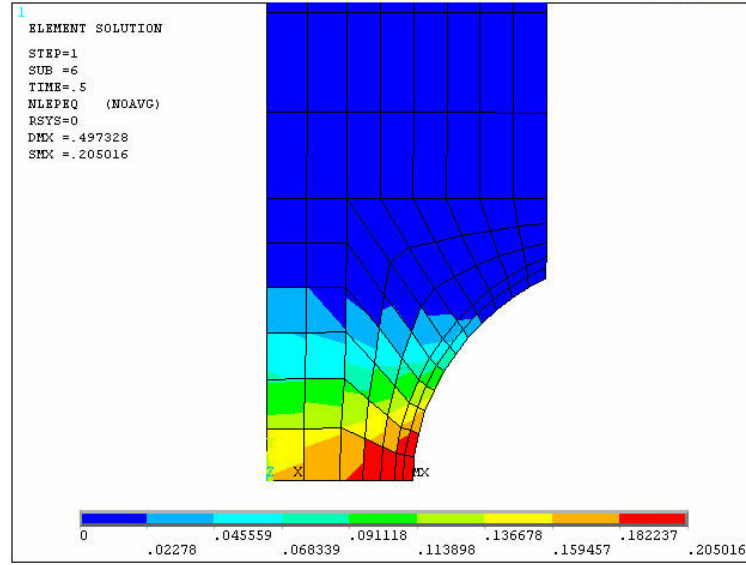
Şekil 5.30. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=5mm için)



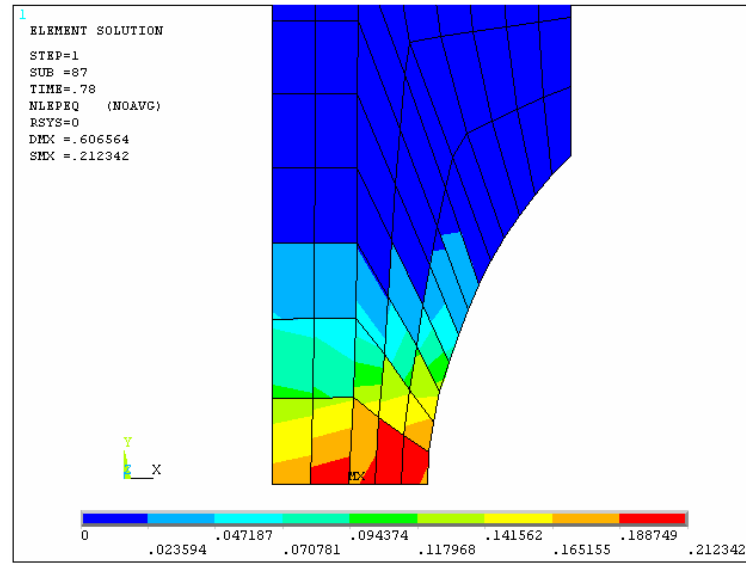
Şekil 5.31. AISI 1040 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=10mm için)



Şekil 5.32. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=2mm için)



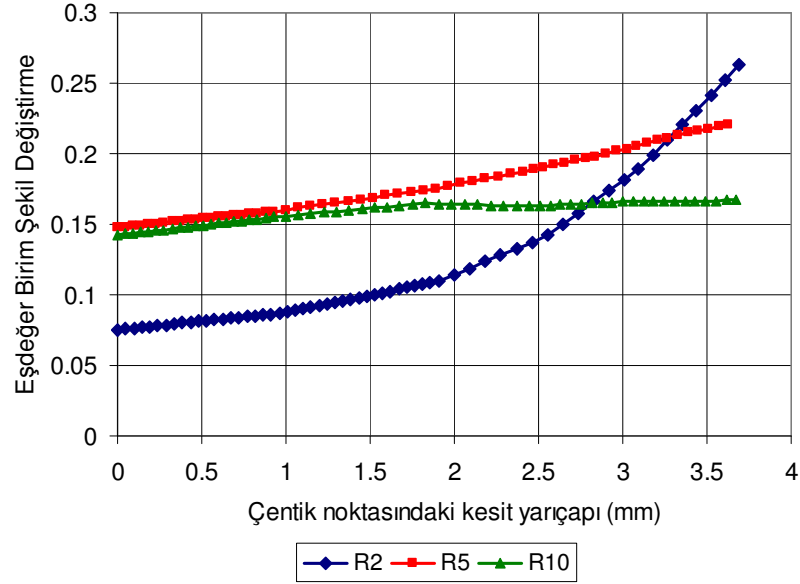
Şekil 5.33. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=5mm için)



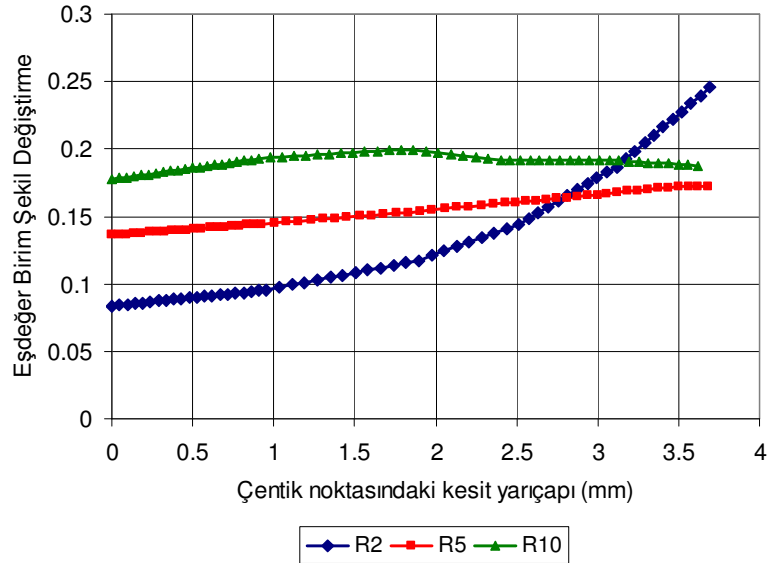
Şekil 5.34. AISI 4140 için numunedeki eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımı (R=10mm için)

Yukarıda analiz sonucunda çentikli çekme numunesi üzerinde meydana gelen eşdeğer plastik birim şekil değişimi dağılımları gösterilmektedir. Maksimum eşdeğer plastik birim şekil değişiminin çentik kökünde meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 5.35 ve 5.36 da eşdeğer plastik birim şekil değişiminin, numunenin çentik kökü bölgesindeki kesit boyunca değişimi gösterilmektedir. Kesit boyunca eşdeğer plastik birim şekil değişimi artışının, çentik yarıçapı arttıkça azalma gösterdiği görülmektedir.

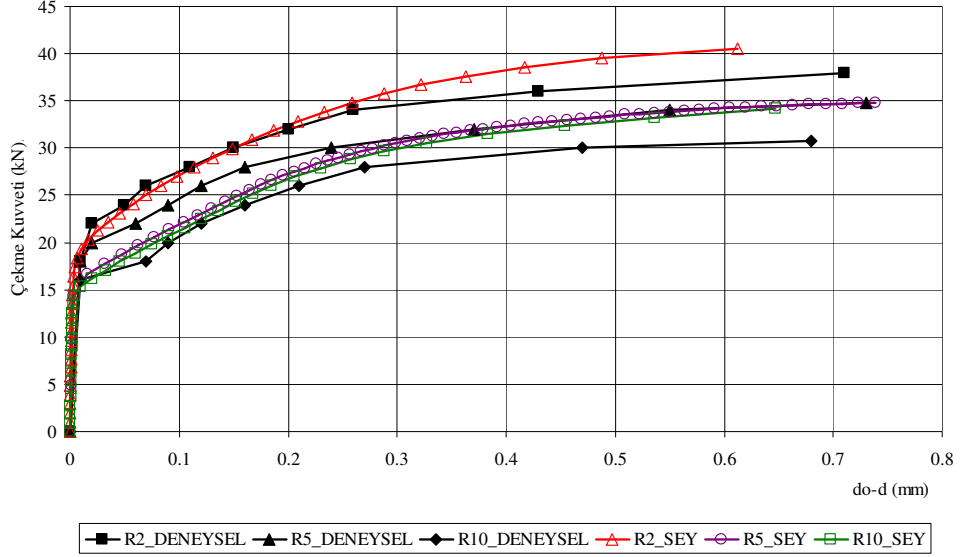


Şekil 5.35. AISI 1040 için eşdeğer birim şekil değişiminin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi



Şekil 5.36. AISI 4140 için eşdeğer birim şekil değişiminin numunenin çentik bölgesindeki kesiti boyunca değişimi

Aşağıda AISI 1040 ve 4140 çentikli çekme deneyinden elde edilen çekme kuvveti – kesit daralması değişimi eğrileri ile SEY çalışmalarından elde edilen çekme kuvveti – kesit daralması değişimi eğrilerinin karşılaştırılması şekil 5.37 ve 5.38 de görülmektedir.

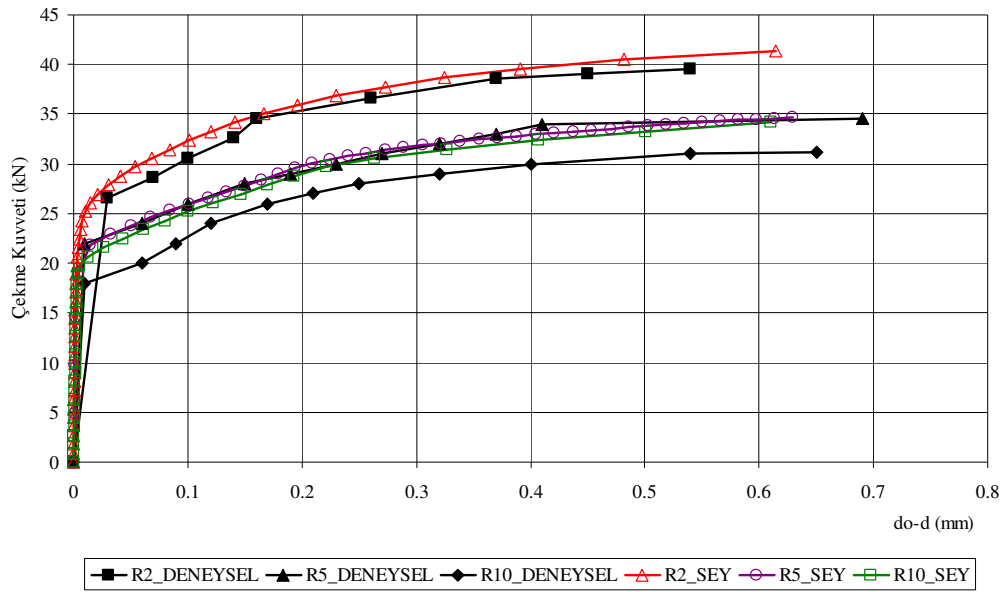


Şekil 5.37. AISI 1040 için deney sonuçlarına ait eğri ile basma deneyi sonuçlarına göre SEY ile elde edilmiş eğrilerin karşılaştırılması

Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara, R2 için %8, R5 için %9 ve R10 için %10 oranında maksimum hata oranı ile yaklaşım gösterdiği görülmüştür.

Şekil 5.37'deki grafikte görüldüğü gibi çentik çapı arttıkça çekme kuvvetinin azaldığı görülmektedir. Bir başka deyişle, çentikli çekme numunesini deformasyona uğratmak için gerekli çekme kuvveti, çentik çapı arttıkça azalır.

AISI 1040 için basma deneyi verilerine ait eğriler ile çentikli çekme SEY analizi yapılarak %10 yaklaşımla çekme kuvveti – kesit daralması eğrileri sonuçları elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 5.38. AISI 4140 için deney sonuçlarına ait eğri ile basma deneyi sonuçlarına göre SEY ile elde edilmiş eğrinin karşılaştırılması

Basma sonuçlarındaki gerçek gerilim ve gerçek birim şekil değişimi değerlerine göre sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çözüm sonuçlarına göre oluşturduğumuz çekme kuvvetinin numunenin çentik bölgesindeki kesitin daralma miktarına göre değişim grafiği Şekil 5.38'de görülmektedir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara, R2 için %6, R5 için %2 ve R10 için %6.6 oranında maksimum hata oranı ile yaklaşım gösterdiği görülmüştür.

AISI 1040 sonuçları gibi AISI 4140 malzemesi için de basma deneyi verilerine ait eğriler ile çentikli çekme SEY analizi yapılarak %10 yaklaşımla çekme kuvveti – kesit daralması sonuçları elde edilebileceği görülmüştür.

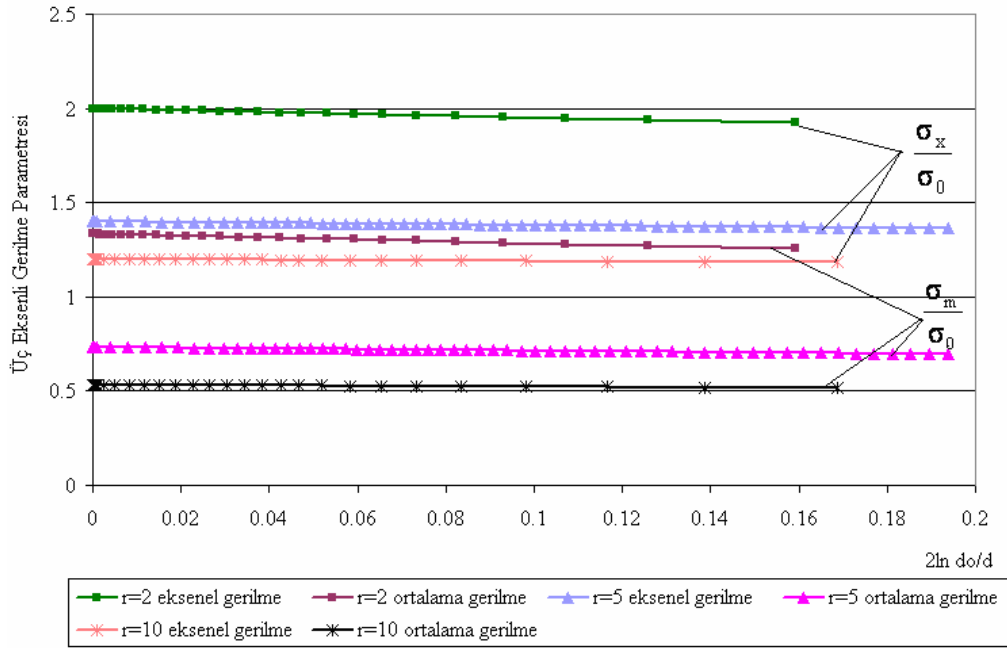
Benzer çalışmalar incelendiğinde, ANSYS paket yazılımı kullanılarak basma deneyi verileri ile yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çekme deneyi verileri ile ABAQUS paket program kullanılmış ve deneysel sonuçlara çok yakın veriler elde edilmiştir [17].

Çekme deneyi verileri ile daha hassas sonuçların elde edilebilmesi, basma deneylerinde sürtünme koşullarının değişken olması etkisi ile olduğu düşünülmektedir. Çünkü, sürtünmesiz basma deneyi gerçek gerilme – gerçek birim

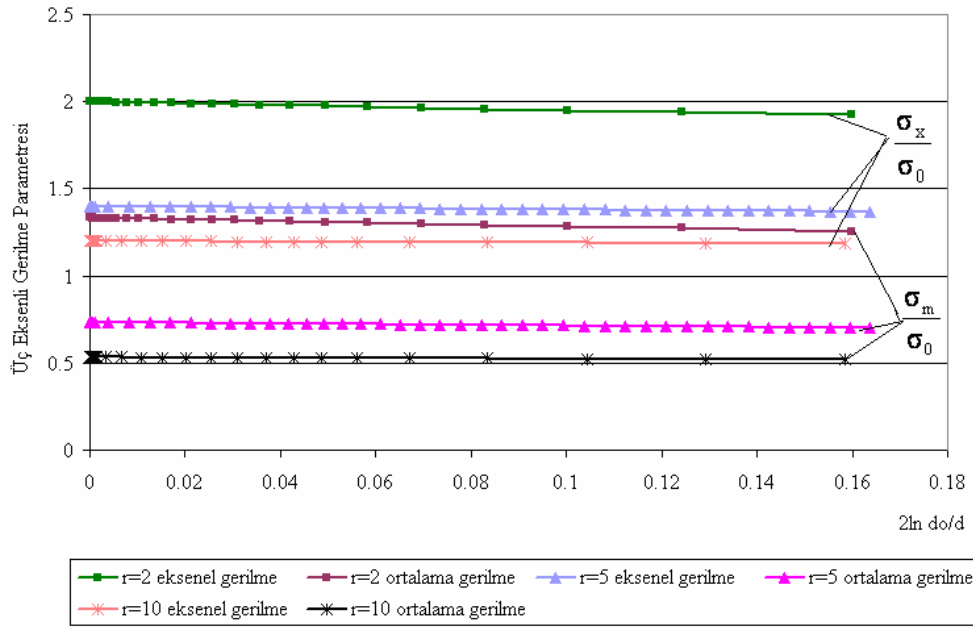
şekil değişimi değerleri, çekme deneyi gerçek gerilme – gerçek birim şekil değişimi değerleri ile aynıdır. Fakat, basmadaki sürtünme koşulları değişimi sonuçlarda farklılığa yol açmaktadır.

Bundan dolayı, SEY analizi çalışmalarında basma deneyi verileri yerine çekme deneyi verilerinin kullanılması daha hassas sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Şekil 5.39 ve 5.40’da farklı çentik yarıçapındaki numunelere ait eksenel gerilme (σ_x / σ_0) ve ortalama gerilme (σ_m / σ_0) değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.39. Küreselleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi analizinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi



Şekil 5.40. Küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi analizinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi

σ_x / σ_0 ve σ_m / σ_0 değerlerinin çentik çapı arttıkça azalma gösterdiği görülmektedir. Bu durum, çentik yarıçapındaki azalışın malzemenin zorlanmasını artırdığını gösterir. Ayrıca üç eksenli gerilme değerinin, çekme işlemi boyunca doğrusal olarak azalma gösterdiği görülmektedir. Bu durum çentikli çekme deneyinde numunenin lineer bir değişimle zorlandığını ve sürekli üç eksenlilik koşullarında gerçekleştiğini açıklar.

Çalışmanın amacını oluşturan çentikli çekme deneyi deneysel sonuçları ile çentikli çekme SEY analizi sonuçlarının karşılaştırılması yapıldığında maksimum % 10 farklılıkla benzerlik elde edilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yapılan çalışma sonucunda sonlu eleman yöntemi ile elde edilen eğrilerin, deneysel sonuçlara ait eğrilerle % 10 yaklaşıklıkla uyum sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar bize, malzemelerin basma deneylerine ait deneysel sonuçlarından yararlanarak hesaplanan gerçek birim şekil değişimi ve gerçek gerilme eğrilerinin sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak elde edilebileceği sonucunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, çentik çapı arttıkça çekme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. σ_x / σ_0 ve σ_m / σ_0 değerlerinin çentik çapı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca üç eksenli gerilme değerinin, çekme işlemi boyunca doğrusal olarak azalma göstermiştir.

6.2. Öneriler

Çentikli çekme deneyinde kopma noktasının bazı formüllerle tanımlanarak sonlu elemanlar yönteminde hesaplanması mümkündür. Bununla ilgili ABAQUS gibi sonlu elemanlar yöntemi yazılımları kullanılarak elde edilen sonuçlar, çentikli çekme deneyleri ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili yazılım programlarına ilgili formüllerin tanımlanması ile deney sonunda numunedeki kopma değerlerine ait sonuçlar bulunabilir. Bu sonuçlardan yararlanılarak numuneye ait malzemenin dövülebilirlik kabiliyeti ve güvenilirliği hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] CLAUSING, DP. "Effect of plastic strain state on ductility and toughness". Int J Fract Mech 1970;6:71–85.
- [2] ATKINS, AG. "Fracture in forming". J Mater Process Technol 1996; 56: 609–81.
- [3] MCCLINTOCK, FA. "A criterion of ductile fracture by the growth of holes". J Appl Mech 1968;35: 363–71.
- [4] RICE, JR., TRACEY, DM. "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields". J Mech Phys Solids 1969;17:201–17.
- [5] HANCOCK, JW., MACKENZIE, AC. "On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states". J Mech Phys Solids 1976;24:147–69.
- [6] MACKENZIE, A., HANCOCK, J., BROWN, D., "On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels", Engineering Fracture Mechanics 9, 056-077, 1977
- [7] BRIDGMAN PW. "Studies in large plastic flow and fracture". Cambridge, MA: Harvard University Press; 1952.
- [8] HANCOCK, J., BROWN, D., "On the role of strain and stress state in ductile failure", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 31 (1), 1-24, 1983
- [9] BEREMIN F, "Influence de la triaxialite_ des contraintes sur la rupture par de chirement ductile et la rupture fragile par clivage dun acier doux", Journal de Me_canique Applique, 216-231.
- [10] BEREMIN F, "Experimental and numerical study of the diferent stages in ductile rupture application to crack initiation and stable crack growth In Three dimensional Constitutive Relations and Ductile Fracture ed S Nemat Nasser pp 074-194, North-Holland Publishing Company.

- [11] LAUTRIDOU J, PINEAU A, “Crack initiation resistance in A497 steels in relation to inclusion distributions”, *Engineering Fracture Mechanics*, 44-60.
- [12] DEVAUX, J., ROUSSELIER, G., MUDRY, F., PINEAU, A. “An experimental program for the validation of local ductile fracture using axisymmetrically cracked bars and compact tension specimens” *Engineering Fracture Mechanics* 162-172.
- [13] CHAOUADI, R. DE MEESTER, P., VANDERMEULEN, W., “Damage work as ductile fracture criterion”, *International Journal of Fracture* 55, 044-053.
- [14] HOLMES, B., KIRKPATRICK, S., SIMONS, J., GIOVANOLA, J., SEAMAN, L., “Modeling the process of failure in structures” In *Structural Crashworthiness and Failure* N Jones, T Wierzbicki pp 44-82 Elsevier Science Publishers Ltd Barking Essex.
- [15] NASH, M., CULLIS, I., “Numerical modelling of fracture a model for ductile fracture in triaxial states of stress” In *Mechanical Properties at High Rates of Strain*, J Harding pp 296-203 The Institute of Physics Conf Series no 69 Bristol.
- [16] ZAVALIANGOS, A., ANAND, L., “Thermo elasto viscoplasticity of isotropic porous metals” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 0976-0007.
- [17] BAO, Y., “Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios”, *Engineering Fracture Mechanics* 72 505–522 Impact and Crashworthiness Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2005.
- [18] BONARA, N., “On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model”, *International Journal of Fracture* 88: 359–371, 1997
- [19] AN, G. B., OHATA, M., TOYODA, M., “Effect of strength mis-match and dynamic loading on ductile fracture initiation”, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (2003) 1359–1377.
- [20] SCHIFFMANN, R., WOLFGANG, DAHL, W.B., “The influence of strain history on ductile failure of steel”, *Computational Materials Science* 13 (1998) 142-147.
- [21] ALVES, M., JONES, N., “Influence of hydrostatic stress on failure of axisymmetric notched specimens”, University of Liverpool, 1997.
- [22] KAYALI, E. S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, 1996.

- [23] BAO, B., WIERZBICKI, T., “On the cut-off value of negative triaxiality for fracture”, Engineering Fracture Mechanics 72 1049–1069, Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA, 2005.
- [24] ÇAPAN, L., “Metallere Plastik Şekil Verme”, Çağlayan Kitabevi, 1999.
- [25] SAVAŞKAN, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Derya Kitabevi, 1999.
- [26] KARADENİZ, E., “Çeliklerde Dövülebilirliğin Burma, Basma ve Çekme Deeyleriyle İncelemesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1997.
- [27] CHEN, Y., “Finite Element Modelling of Ductile Tearing in Pipeline Steels Using a Micromechanical Damage Model”, doctor of philosophy thesis, University of Waterloo, Canada, 2004.
- [28] JACKIEWICZ, J., KUNA, M., “Non-Local Regularization For FE Simulation Of Damage in Ductile Materials”, Computational Materials Science 28, 684–695, 2003.
- [29] HASHEMI, S. H., HOWARD, I. C. YATES, J. R. AND ANDREWS, R. M., “Micro-Mechanical Damage Modelling Of Notched Bar Testing Of Modern Line Pipe Steel”, The University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, Sheffield, UK.
- [30] <http://analiz.infotron.com.tr>
- [31] ZIENKIEWICZ, CHEUNG, “The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics”, McGraw Hill, New York, USA, 1967.
- [32] BARTON, M., RAJAN, S.D., “Finite Element Primer for Engineers”, Arizona State University, 2000.
- [33] PİŞKİN, Ş. , “Hesaplamalı Bilim Ve Mühendislikte Özel Konular, Mesh Üretimi”, ders notu, Bilişim Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2002.
- [34] FIRAT, M., “Mekanik Tasarımda Dayanım ve Güvenilirlik”, Sakarya Üniversitesi, 2005.
- [35] FIRAT, M., “Çok Eksenli Yükler Altında Çentik Kökü Gerilme-Gerinim Hesaplaması”, ders notu, Sakarya Üniversitesi, 2005.
- [36] DIETER, George E., “Mechanical Metalurgy”, McGraw-Hill Book, 1988.

ÖZGEÇMİŞ

Erman AKIN, 1981'de Kaynarca doğdu. Lise öğrenimini Adapazarı Atatürk Lisesi'nde 1998 yılında tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başladı ve 2003 yılında lisans öğrenimini tamamladı. Yüksek lisans öğrenimine yine aynı üniversitede, 2003 yılında başladı.