

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖŞE KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ  
DÜZLEMSEL YAPILARIN KIRILMA MEKANİĞİ  
AÇISINDAN DUYARLILIK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Şaban KÜÇÜKGÜMRAH**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Muhammet  
CERİT**

**Temmuz 2010**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖŞE KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ  
DÜZLEMSEL YAPILARIN KIRILMA MEKANİĞİ  
AÇISINDAN DUYARLILIK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Şaban KÜÇÜKGÜMRAH**

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT

Bu tez 05 /07/ 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr. Muhammet CERİT  
Jüri Başkanı

Doç.Dr. Ali Osman AYHAN  
Üye

Yrd.Doç.Dr. Ergün NART  
Üye



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Literatür Taraması .....	3

### BÖLÜM 2.

KIRILMA MEKANİĞİ .....	8
2.1. Kırılma Mekaniğine Giriş .....	8
2.2. Kırılma Mekaniğinin Gelişimi .....	9
2.2.1. Kırılma modları .....	10
2.2.2. Kırılma mekaniği parametreleri .....	11
2.2.2.1. Gerilme şiddet faktörleri .....	12
2.3. Gerilme Yığılması .....	13
2.4. Çatlak İlerleme Mekanizması .....	14
2.5. Kırılma Türleri .....	16

2.5.1. Sünek Kırılma .....	16
2.5.2. Gevrek Kırılma.....	18
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS .....	20
BÖLÜM 4.	
KÖŞE KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ PLAKALARIN KIRILMA ANALİZİ	22
4.1. Proplemin Tanımlanması .....	22
4.1.1. Çözümü bilinen örnek proplem .....	23
4.2. Modelin Oluşturulması.....	23
4.3. Analiz Tipinin Belirlenmesi .....	26
4.4. Birim Sisteminin Belirlenmesi .....	26
4.5. Eleman Tipinin Belirlenmesi .....	27
4.6. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi .....	28
4.7. Geometrik Modelin Oluşturulması .....	29
4.7.1. Keypointlerin oluşturulması .....	30
4.7.2. Çizgilerin oluşturulması .....	32
4.7.3. Alanların oluşturulması .....	32
4.8. Elemanlara Ayırma (Meshing ) İşlemi .....	33
4.9. Sınır Şartları ve Yüklerin Uygulanması .....	36
4.9.1. Sınır şartlarının uygulanması.....	36
4.9.2. Simetri seçimi.....	37
4.9.3. Kuvvetin uygulanması.....	38
4.10. Analizin Çözümünün Başlatılması.....	40
4.11. Sonuçların İncelenmesi .....	40
4.12. Gerilme Şiddet Faktörünün (K) Hesaplanması .....	43
4.12.1 K için yörünge tanımlanması .....	43
4.12.2. K Değerinin hesaplanması.....	45
BÖLÜM 5.	
ÇATLAK İLERLEME DOĞRULTUSU .....	46

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR ..... 48

6.1. Yorumlar ..... 59

KAYNAKLAR ..... 61

ÖZGEÇMİŞ ..... 63

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$K_I$	: Gerilme Şiddet Faktörü Mode I
$K_{II}$	: Gerilme Şiddet Faktörü Mode II
$K_{III}$	: Gerilme şiddet Faktörü Mode III
$\sigma$	: Gerilme
$\nu$	: Poisson oranı
$E$	: Elastisite Modülü
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
EPKM	: Elastik Plastik Kırılma Mekanîği
GŞF	: Gerilme Şiddet Faktörü
$T_x$	: Geçiş Sıcaklığı
$G$	: Enerji Boşalma Miktarı
$\gamma$	: Yüzey Enerjisi
$U$	: Toplam Enerji
$W$	: Dış Kuvvetlerin Yaptığı İş
$K_c$	: Kırılma Tokluğu
$\mu$	: Kayma Modülü
$X$	: Üst Kaynak Kolu
$L$	: Alt Kaynak Kolu
$a$	: Kaynak Ağzı Uzunluğu
$R$	: Eğrilik Yarıçapı
$\theta$	: Çatlak Yayılma Açısı
$J$	: J integrali

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yapısal çatlak örneği .....	9
Şekil 2.2. Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu .....	11
Şekil 2.3. Basit Çekme Durumunda Çentikli Kısımlarda Oluşan Yığılmaları .....	14
Şekil 2.4. Çatlak ucu ilerleme mekanizması .....	15
Şekil 2.5. Yorulma Çizgileri .....	16
Şekil 2.6. Sünek kırılmada hasar oluşumu .....	17
Şekil 4.1. Modelin bölgeleri.....	24
Şekil 4.2. Modelin boyutları.....	24
Şekil 4.3. Kaynak Ağzı Tanımlama .....	25
Şekil 4.4. Analiz Tipinin Belirlenmesi.....	26
Şekil 4.5. Birim Atama.....	27
Şekil 4.6. Eleman Tipinin Belirlenmesi .....	27
Şekil 4.7. Element Davranışı Seçimi.....	28
Şekil 4.8. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi .....	29
Şekil 4.9. KP, LINE, AREA numaralandırımı .....	30
Şekil 4.10. Keypoint Oluşturma.....	31
Şekil 4.11. Keypointlerin Çalışma Düzlemine Yerleşimi.....	31
Şekil 4.12. Çizgilerin Oluşturulması.....	32
Şekil 4.13. Alanların Oluşturulması.....	33
Şekil 4.14. Çatlak Ucunun Yoğunlaştırılması.....	34
Şekil 4.15. Alanların Mesh Büyüklüğü.....	35
Şekil 4.16. Mesh Komutu.....	35
Şekil 4.17. Meshlenecek Alanların Seçimi .....	35
Şekil 4.18. Meshleme işlemi sonrası modelin görünümü .....	36
Şekil 4.19. . Çatlak Bölgesi Yoğunlaştırılmış .....	36
Şekil 4.20 Ankasre sınır şartı .....	36
Şekil 4.21 . Simetrik sınır şartı.....	36
Şekil 4.22 Sınır Şartlarının Uygulanması. Modelin Sabitlenmesi .....	37

Şekil 4.23. Sabitleme ve simetri alma işlemlerinden sonra modelin son durumu ....	38
Şekil 4.24. Üst Parçada Çekme Oluşturma .....	39
Şekil 4.25. Çekme yükü değerinin girilmesi .....	39
Şekil 4.26. Analizin Çözümü .....	40
Şekil 4.27. Analiz Sonrası Uyarı .....	40
Şekil 4.28. Gerilme Tipi Gösterimi Seçimi .....	41
Şekil 4.29. Von Mises kuramına göre oluşan gerilmenin gösterimi .....	42
Şekil 4.30. Deformasyon Gösterimi Seçimi.....	42
Şekil 4.31. Oluşan Deformasyon .....	43
Şekil 4.32. Node Seçimi.....	44
Şekil 4.33. K değerine İsim Tanımlama.....	44
Şekil 4.34. Plane Strain Seçimi .....	45
Şekil 4.35. Çözüm Sonrası Bulunan K ( Gerilme Şiddet Faktörü )değerleri.....	45
Şekil 5.1. Çatlak başlangıcı .....	47
Şekil 5.2. $X/L=0.25$ çatlak ilerlemesi .....	47
Şekil 5.3. $X/L=1$ çatlak ilerlemesi.....	47
Şekil 6.1 Kaynak üst kolu için $K_I$ değişimi .....	49
Şekil 6.2. Kaynak üst kolu için $K_{II}$ değişimi .....	49
Şekil 6.3 Kaynak alt kolu için $K_I$ değişimi .....	50
Şekil 6.4. Kaynak alt kolu için $K_{II}$ değişimi .....	50
Şekil 6.5. Simetrik içbükeylikte $K_I$ değişimi .....	51
Şekil 6.6. . Simetrik dışbükeylikte $K_I$ değişimi .....	52
Şekil 6.7. Ankastre içbükeylikte $K_I$ değişimi .....	53
Şekil 6.8 Ankastre dışbükeylikte $K_I$ değişimi .....	54
Şekil 6.9. Simetrik içbükeylikte $K_{II}$ değişimi .....	55
Şekil 6.10 Simetrik dışbükeylikte $K_{II}$ değişimi .....	56
Şekil 6.11. . Ankastre içbükeylikte $K_{II}$ değişimi .....	57
Şekil 6.12 Ankastre dışbükeylikte $K_{II}$ değişimi .....	58



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Kaynak Ağız Tanımlama .....	26
Tablo 4.1. Oluşturulan keypointlere ait koordinatlar .....	30
Tablo 6.1. Ankastra ve Simetrik, alt ve üst kol uzunluk değişimi ile Düz Tip Kaynak Formunda Analiz Sonucu Bulunan $K$ değerleri .....	48
Tablo 6.2. Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_I$ değerleri .....	51
Tablo 6.3. Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_I$ değerleri .....	52
Tablo 6.4. Ankastra, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_I$ değerleri .....	53
Tablo 6.5. Ankastra Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_I$ değerleri .....	54
Tablo 6.6. Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_{II}$ değerleri .....	55
Tablo 6.7. Simetri, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_{II}$ değerleri .....	56
Tablo 6.8. Ankastra Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_{II}$ değerleri .....	57
Tablo 6.9. Ankastra Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan $K_{II}$ değerleri .....	58

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Köşe Kaynağı, Kaynak Ağzı, Gerilme Şiddet Faktörü, Kırılma Mekanikliği, Çatlak İlerlemesi, Ansys, Kırılma Analizi, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Bu çalışmamda, Eksenel çekme kuvvetine maruz köşe kaynağı ile birleştirilmiş düzlemsel yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Benzer analizler kaynak ağzı açılarak köşe kaynağı yapılmış düzlemsel elemanlar için tekrarlanmıştır. Kaynak ağzı açılmış ve açılmamış bağlantılardaki deformasyon ve gerilme davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiş, bunlara ilave olarak, kalıntı gerilmeler göz önünde bulundurulmadan kısmi kaynak ağzı açılmış ve açılmamış köşe kaynak bağlantılarındaki gerilme şiddet faktörlerinin değişimi farklı kalınlık, genişlik ve sınır şartları için belirlenmiştir. Çatlak oluşması muhtemel noktalara çatlak başlatılarak ilerleme davranışı belirlenmiştir. Analiz için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve ANSYS 12.0 programından yararlanılmıştır.

# **SENSITIVITY ANALYSIS OF A PLANAR STRUCTURES JOINED WITH FILLET WELD IN RESPECT TO FRACTURE MECHANICS**

## **SUMMARY**

Key words: Fillet Weld, Stress Intensity Factor, Fracture Mechanics, Crack Progress, Ansys Failure Analysis, Finite Element Method.

In this study, stress and deformation in planar structures, which attached with fillet weld, has analysed under axial tensile force with finite element method.

Similar analysis has performed for the planar structures, which were welded with weld bevel. Deformation and stress behavior for the weld connections with and without weld bevel were compared. In addition, the change of stress intensity factor was determined at filled weld connections with and without partial weld bevel, with different thickness, width and boundary conditions. Behavior of the crack progress was determined by manually crack formation at possible crack locations in the structure. Finite element method was used for analysis. ANSYS 12.0 program was used.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Kaynak bağlantıları çözülemeyen bağlantı şekillerinden olup, günümüzde en yaygın olarak kullanılan bağlantı şeklidir. Kaynak yönteminin endüstriyel uygulamaları 19. yüzyılın ikinci yarısında başlamıştır.

Kaynak yöntemleri ve şekilleri geniş bir yelpazede değişir. Genel olarak kaynak; birleştirilecek elemanların birleşme bölgesinde ergiyerek birbirine karışması ve böylece moleküllerin kohezyonla birbirine bağlanması olayıdır.

Kaynak edilecek malzemelerin birbirlerine göre pozisyonu kaynağın geometrisini belirlemektedir. Bu geometriyi uygulama zorlukları kaynak işlemini konstrüktif olarak sınırlandırır. Çalışma zorluğunun olduğu yerlerde, örneğin girilemeyecek kadar dar yerlerde, dış taraftan kaynağın yapılması gibi çözümlere gidilebilir. Çeşitli birleştirme şekillerinin temelini, alın kaynağı, tavan kaynağı ve köşe kaynağı oluşturur. Kaynak edilecek malzemelerde iyi bir nüfuziyet sağlanabilmesi için, malzemelere kaynak ağzı açılması gerekmektedir. Kaynak ağzı malzeme kalınlığına ve kaynak yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Kaynak ağzı açılarak yüzeydeki oksit, karbür, nitrür ve kirlilik gibi olumsuz etkenler malzemelerden uzaklaştırılır. Böylece iç kısımlardaki temiz metal açığa çıkarılarak, kaynak bağlantısının dayanımı artırılmış olur. Bu sayede, hem nüfuz eden yüzey artırılır, hem de gerilme çizgilerinin daha geniş bir alandan geçmesi sağlanarak gerilme yığılması azaltılmaya çalışılır.

Kaynak bölgesi genelde kritik bir noktadır. Kaynaklı bir cisme yükleme yapıldığında

yükler kaynak üzerinden iletilir. Gerilme çizgileri kaynak dikişindeki en dar alandan sıklaşarak geçer. Mukavemet hesapları en dar kesite göre yapılır ve kesitin ani ya da keskin biçimde değiştiği yerlerde gerilme yığılması gerçekleşir. Bu da bu bölgedeki gerilmelerin hesabını zorlaştırmaktadır.

Kaynak yapılan parçalarda meydana gelen artık gerilmeler, malzemelerin tam ve doğru bir şekilde imal edilmesini ve işlenmesini engel olur. Çoğu zaman önlem alınmadığı takdirde malzemelerde çarpılmalar ve çatlamlar oluşur. Ayrıca, artık gerilmeler gevrek kırılmaya neden olur ve kaynak yapılan malzemenin direncini düşürür. Bu sebeple artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı en önemli faktörlerdendir.

Birçok araştırmacı, artık gerilmeleri önceden hesaplamak için analitik ve deneysel metotlar geliştirmişlerdir. Bununla birlikte bilgisayar teknolojisindeki ve özellikle sonlu elemanlar yöntemindeki gelişmeler, kaynaklı yapılardaki artık gerilmelerin analizini kolaylaştırmıştır.

Makine parçaları, yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve çoğu zaman anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilir. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması oldukça önemlidir. Hemen hemen tüm mühendislik malzemeleri mikroskobik boyutlarda olsalar bile çatlak içerirler. Sistemin çalışması sırasında bu çatlaklar ilerleyerek birbirleri ile birleşirler ve gözle görünür bir hal alırlar. Bu şartlar altında bu elemanın yapısal bütünlüğü için mühendis, çatlak veya çatlakların nasıl ve ne zaman daha da büyüyeceğini, ilerleyebileceğini ve parçanın ne şekilde hasara uğrayacağını tahmin edebilmesi gerekir. Bu soruları cevaplamaya yardımcı olan teknoloji Kırılma Mekaniğidir.

Kırılma Mekaniği özellikle son yıllarda kuramsal ve deneysel olarak üzerinde en çok çalışılan mühendislik dallarından biri olmuştur.

Kırılma Mekaniği aşağıdaki temel soruların cevaplandırılmasına yardımcı olur.

- Çatlak ilerleyecek mi? Yada ne kadar ilerleyecek?
- Kritik çatlak uzunluğu nedir?

- Bir çatlak iletmek için gerekli minimum enerji nedir?
- Verilen bir çatlak, kritik uzunluğa ne kadar zaman sonra ulaşır?
- Çatlak kararsız bir şekilde hızlı mı yoksa yavaş bir şekilde mi ilerleyecektir?
- Çatlak yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse hangi hızda ilerler?

Kırılma Mekaniği ile ilgili konularında yapılacak olan çalışmalar sonucu kırılmanın insanlığa verdiği zarar azaltılabilir. Modern yapılar, üretim hatalarına karşı geçmiş dönemdekilere göre daha az toleranslıdır. Bu yüzden kullanılan dizayn işleminde emniyet katsayısının önemi daha da belirgin olmaktadır. Ancak kullanılan yeni analitik metotlarla birlikte gerilmeler, öncesine kıyasla daha doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bunun sonucu olarak tasarımcılar değişik kodlarda belirtilen emniyet katsayısı değerine yaklaşmaktadırlar. Öte yandan şu gerçekte bilinmektedir ki dış kuvvetlerin, malzeme özelliklerinin veya yapının özelliklerinin matematiksel olarak tespiti tam olarak yapılamamaktadır. Bunun sonucu olarak yapısal hasarlar ortaya çıkmaktadır. Bu hasarlar iki önemli konuyu ön plana çıkarmaktadır, emniyet ve ekonomiklik. Emniyet problemi, ekipman kullanıcılarını riske atmaktadır. Ekonomik problemler ise ekipmanın ömrünü ve ürün maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Emniyet problemleri oldukça tehlikeli olabilir. Bir parçanın hasarı ürünün tümünü tahrip edebilir ve kullanıcısının hayatını tehlikeye sokabilir. Bir türbin kanadının hasarı, bir milin veya fren sisteminin hasarı sistemin kontrolünü etkiler. Bu hasarlar önceden bir uyarı olmaksızın aniden ortaya çıkabilir. Ekonomik problemler ise yavaş yavaş ortaya çıkarlar. Bir parçanın herhangi bir yerinde çatlama ortaya çıkabilir. Parça değiştirilir ve sonra aynı parçanın başka bir yerinde veya başka parçalarda hasar oluşabilir. Bu olaylar meydana geldikçe bakım ve onarım maliyetleri üstel olarak artar. Kırılma Mekaniği, çatlak veya boşluk içerebilen mühendislik yapılarının emniyetli bir şekilde çalışmalarını sağlayan bir bilim dalıdır. İnsan hayatını güvence altına almanın yanı sıra önemli finansal kazanımları da beraberinde getirir. Kırılma kontrolü, çatlak değerlendirilmesi, kontrol, bakım ve onarım stratejilerini de içeren mevcut en iyi yöntemler uygulandığında, kırılmanın insanoğlu için istenmeyen zararları azaltılabilir. [1,2,3,4,7]

## 1.2. Literatür Taraması

Bu bölümde, kırılma mekaniği ve sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kırılma mekaniği konusunda yapılan çalışmalarda, kırılma tokluğu deneyleri yapılmış, çeşitli kırılma modelleri oluşturulmuş ve malzemelerin kırılma dayanımına etkileri araştırılmıştır.

Teng ve arkadaşları 2001 yılında T köşe kaynaklarında meydana gelen artık gerilme ve distorsiyonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizini araştırmışlardır. T köşe dolgu kaynaklarındaki termo mekanik davranışların analizi ile artık gerilmelerin ve açısız distorsiyonların hesabı sonlu elemanlar yöntemi ile bulunarak, termo elasto-plastik analizini açıklamışlardır. Ayrıca bu çalışmada T köşe dolgu kaynaklarında zamanla kaynak yerinin besleme değişimini simüle ederek, elemanın doğma ve ölmesi tekniğini ( Birth and Death ) açıklamaktadır. Bundan başka, parça kalınlığının, kaynak nüfuziyet derinliğinin ve kaynakta kısıtlama durumlarının artık gerilme ve distorsiyonlar üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde, enine artık gerilmelerde kaynak dikişine yakın bölgelerde yüksek çeki gerilmelerinin olduğu ve bu bölgeden uzaklaştıkça gerilme değerlerinin sıfıra kadar düştüğü tespit edilmiştir. Boyuna artık gerilmelerde ise, kaynak dikişi yakınlarında yüksek çeki gerilmeleri mevcutken, kaynak dikişinden uzak bölgelerde bası gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Parça kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı, açısız distorsiyonlara neden olurken, flanşı yukarı doğru eğmektedir. Flanş kalınlığını arttırmanın, kaynak dikişindeki çeki artık gerilme değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Nüfuziyet derinliğinin veya ısı girdisi değerini arttırmak, kaynak dikişine yakın bölgelerdeki çeki artık gerilmelerin değerini düşürdüğünü göstermişlerdir.

Ning-Xu M.A. ve arkadaşları tarafından 1995 yılında yapılan bir çalışmada T profildeki iç köşe kaynağında meydana gelen artık gerilmeler sonlu elemanlar analizi yardımıyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada tek paso ve çok pasolu iç köşe kaynaklı birleştirmelerdeki artık gerilmelerin dağılımı tek paso ve çok paso ile oluşturulan kaynaklar aracılığı ile incelenmiştir. Çıkan analiz sonuçları, iç köşe kaynak dikişine bitişik bölgelerde büyük enine çeki artık gerilmelerin olduğunu göstermiştir. Çok

pasolu analizde, tek pasolu analize göre daha büyük artık çeki gerilmeleri olduğu saptanmıştır.

Ferhan FIÇICI, tezinde köşe kaynağının üç boyutlu kırılma analizini yapmıştır. Çalışmanın amacı, köşe kaynaklarında üç boyutlu yüzey çatlak problemlerinin modellenmesidir. Kaynak malzemesinin, sac metaller ile aynı malzeme özelliklerine sahip olduğu varsayılmıştır. Yüzey çatlağının iki bölgede olduğu düşünülmüştür, biri kaynak kökündedir, diğeri kaynak ucundadır. Yüzey çatlağının yarı eliptik çatlak yüzü görüntüsüne sahip olduğu varsayılmıştır. Yüzey çatlağı problemi, mekanik yükleme altında İncelenmiştir. Modeller üç boyutlu sonlu elemanlar ile oluşturulmuştur. Çalışmanın temel sonucu, çekmeye ve eğmeye maruz kalmış test numunesi için çatlak yüzü çevresinde gerilme şiddeti faktörlerinin hesaplanmasıdır.

Melih DOĞAN, Tezinde Paslanmaz Çeliklerin Köşe kaynaklı Birleştirmelerinde Gerilme analizlerini incelemiştir. Konstrüktif tasarımlarda köşe kaynakları karşımıza sıkça çıkar. Bu çalışmada köşe kaynağa gelen gerilmenin analizinin yapılması amaçlanmıştır. Köşe kaynağının türevi olan ve T kaynağı olarak bilinen kaynaklı bağlantı da incelenmiştir. Tasarımlar sonucu modellere açılan kaynak ağzının gerilmeleri nasıl etkilediği irdelenmiş ve ideal duruma dair yaklaşım yapılması amaçlanmıştır. Deneysel malzeme olarak martenzitik paslanmaz çelik numuneler tercih edilmiştir. Analiz için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmış ve ANSYS Programından yararlanılmıştır. Sonuçlar grafiklerle gösterilmiş ve kritik durumlar belirtilmiştir.

Prof. Dr. Nihat TEKİN ve Prof. Nurullah GÜLTEKİN, Kaynak Teknolojisi kitabında, Öngörülen bir ömür süresince, kaynaklı birleştirmeye imal edilmiş bir kabın veya basınç taşıyan kısımlarının, zarar görmeden ve emniyetli bir şekilde, taşıyabileceği değişken ve tekrarlanan basınç zorlamaları ve buradan doğan gerilmeler çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar: Tasarım parametreleri, İmalat Teknikleri, Malzemeye ait özellikler, Yüzey pürüzlülüğü, Cidar kalınlıkları ve İşletme sıcaklıklarıdır. Yukarıda belirtilen faktörler ışığında, kaynaklı birleştirmeye imal edilmiş, tekrarlanan ve değişken basınçla zorlanan kaplarda, emniyetli ve zarar görmeden



çalışılabilecek belli bir ömür, belli bir gerilme değerinin aşılmaması halinde gerçekleşebilir.

Ercan ARICAN, Tezinde bir gaz türbinli motorun titanyum alaşımlı malzemeden imal edilmesi öngörülen fan diskinin bilgisayar ortamında modellenerek yapısında oluşması muhtemel yorulma kaynaklı kritik çatlakların ilerleme analizi yapmıştır. Unigraphics çizim programı kullanılarak bilgisayar ortamında model oluşturulmuş, oluşturulan bu model önce ANSYS programına aktarılarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal gerilme analizi yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan yapısal analizlerin sonuçları, yapı üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımları biçiminde gösterilmiştir. Çatlak ilerleme ve ömür hesapları yapılmıştır.

Dong (2001) kaynak yöntemiyle birleştirilmiş parçalarda yapısal gerilme tanımlarını ve formülasyonlarını incelemiştir. Bu formülasyonların yorulma analizine sayısal uygulamasını yapmıştır. Değişik tipte kaynaklı birleştirmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir.

Meriç ve Okur (2000) rutil elektrotla birleştirilmiş C22 çelik malzemesinin kaynak bölgesinin tokluğunu incelemişler ve uygunsuzluk (mismatch) faktörünü belirlemek amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında farklı çekme dayanımına sahip üç ayrı rutil elektrotla kaynak edilmiş C22 çelik sacdan alınan numuneleri incelemişlerdir. Malzemelerde yorulma sonucu oluşturulan çatlaklardan hareketle kaynak bölgelerinin direngenliklerini incelemişlerdir. Kaynak metali ve ısının tesiri altında bölgenin mekanik özelliklerini deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir, esas metal ile kaynak metali arasındaki uyumsuzluğu incelemişlerdir.

Minguez ve Vogvell (2003) açık ve kapalı formda kaynakla birleştirilmiş malzemelerde meydana gelen gerilme dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemiyle ve klasik hesap yöntemiyle incelemişler, bu iki farklı tip bağlantının karşılaştırmasını yapmışlardır. Kaynak bölgesinde meydana gelen kesme gerilmelerini incelemişlerdir. Kapalı kaynak formu yapının daha mukavemetli olduğu sonucuna varmışlardır.

Kapalı kaynak formunun kesme gerilmesini açık kaynaklı forma oranla yarı yarıya düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Avustralya Adelaide Üniversitesinde Nguyen ve Wahab tarafından yapılan bir çalışmada da, kaynak geometrisinin ve artık gerilmelerin kombine yüklemeye maruz kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımlarına etkileri araştırılmıştır. Kaynak ağız açısı, kaynak ağız mesafesi, parça kalınlığı gibi kaynak özellikleri ile artık gerilmelerin alın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı parçanın gerilme ve eğilme yükleri altındaki davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Nümerik model ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalar neticesi ile elde edilen bilgilerle karşılaştırılmış ve nümerik model doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, alın kaynağı ile birleştirilen malzemenin yorulma ömrü ve yorulma dayanımını arttırmak amacıyla, kaynak ağız açısını kaynak kökünde azaltma ya da tamamen ortadan kaldırmanın gerekliliği tespit edilmiştir [5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13]

## BÖLÜM 2. KIRILMA MEKANİĞİ

### 2.1.Kırılma Mekanikine Giriş

Kırılmayla ilgili bir problemin ilk başarılı analizi 1920 yılında Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith, sistemin toplam enerjisindeki azalmasıyla önceden var olan bir çatlakın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith 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 yaklaşımı, 1944 yılında Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır. Bundan hemen sonra Irwin, Griffith tipi enerji dengesinin, depo edilen şekil değiştirme (germe) enerjisi ile yüzey enerjisi artı plastik deformasyon sırasında yapılan iş arasında olması gerektiğini irdelemiştir. Irwin aynı zamanda sünek malzemelerde yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjinin, plastik deformasyon sırasında yapılan iş yanında genellikle önemsiz derecede olduğunu savunmuştur. Böylece  $G$  diye bir malzeme özelliği tanımlamıştır.  $G$ , birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için depolanan toplam enerjidir.  $G$ , enerji yayılım hızı veya çatlak itici gücü olarak da adlandırılır.

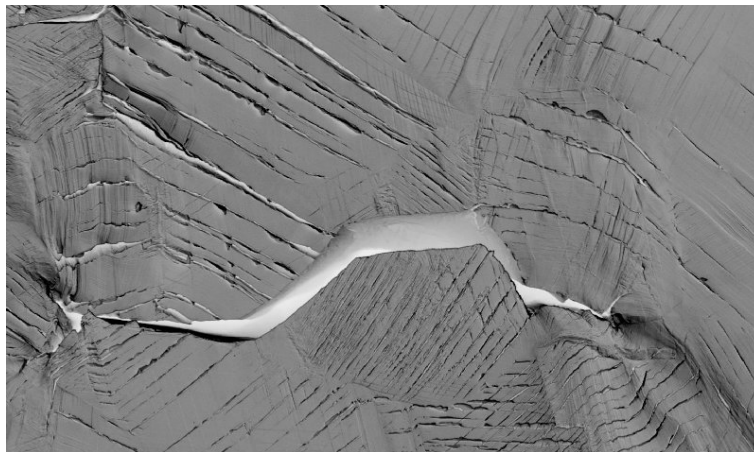
1950'lerin ortalarında Irwin, kırılma mekaniğinde yeni bir çığır açmıştır ve şunu söylemiştir, “Enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğerdir”. Buna göre, çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme yoğunluğu  $K_c$  veya enerji terimleriyle  $G_c$  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 çatlama 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 yılında Wells' in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar.

## 2.2. Kırılma Mekaniğinin Gelişimi

Malzemelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayına “kırılma” denir. Kırılmanın karakteri malzemedan malzemeye değişir ve uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma Mekanizması genel olarak üç aşamadan oluşur. Birinci aşama çatlak oluşması, ikinci aşama ise oluşan çatlağın ilerlemesi ve üçüncüsü ise parçanın kırılmasıdır. Kırılma, genellikle yapısında Şekil 1.1'deki gibi bir çatlak ya da çentik bulunduran parçaya, sürekli ve tekrar eden yüklemeler sonucunda oluşur. Kırılma ayrıca çok nadir de olsa hasarsız malzeme üzerinde öngörülme aşırı yük durumlarında da oluşabilmektedir.



Şekil 2.1. Yapısal çatlak örneği

Yapı tasarımı anlayışları geleneksel olarak bir komponentin tasarımı için malzeme mukavemeti yaklaşımını kullanır. Bu yaklaşım çatlakların varlığına bağlı olarak yükselmiş gerilme düzeylerini öngöremez. Böyle gerilmelerin varlığı yapıyı yıkıcı bir hataya götürebilir.

Kırılma Mekaniği bir yapıdaki çatlak ve hataların sebebine açıklama getirir. Kırılma Mekaniği yaklaşımı yapı tasarımında hata boyutunu (flaw size) önemli bir değişken kabul eder ve uygun malzeme parametresi olarak malzeme mukavemeti yerine kırılma tokluğu seçilir.

Kırılma analizi genellikle enerji kriteri veya gerilme-şiddet faktörü kriteriyle uygulanır. Enerji kriteri kullanıldığında, çatlağın birim ilerlemesi için gerekli enerji (enerji RELEASE miktarı) kırılma tokluğunu karakterize eder. Gerilme-şiddet faktörü kriteri kullanıldığında, gerilme genliğinin kritik değeri ve deformasyon bölgeleri kırılma tokluğunu karakterize eder. Belli koşullar altında iki kriter eşdeğerdir.

Kırılma ile ilgili tanıtıcı ek başlıklar:

- Kırılma Modları
- Kırılma Mekaniği Parametreleri
- Gerilme Yığılması
- Çatlak İlerleme Mekanizması

### 2.2.1. Kırılma modları

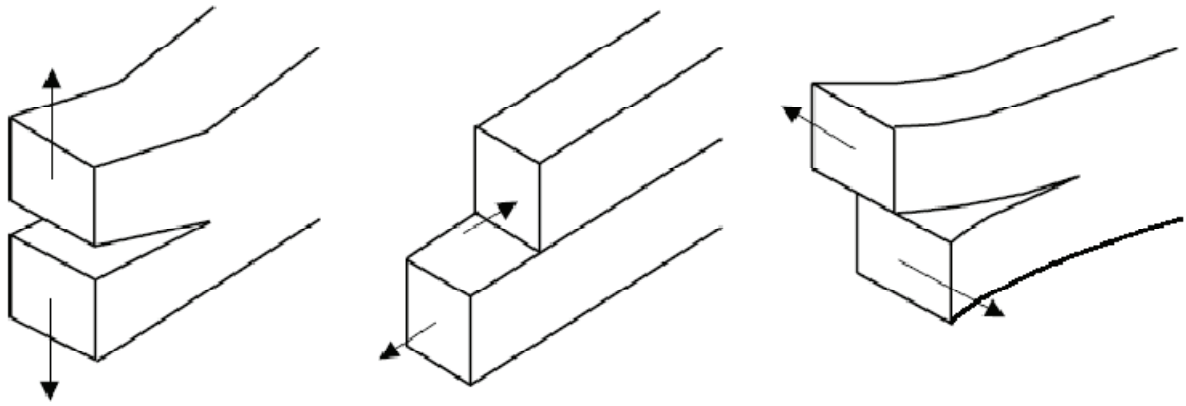
Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak malzemedeki mevcut çatlaklar üç şekilde ilerleyebilir. (Şekil 2.2)

Mod I – Açma veya Çekme Modu (Açılma modu)

Mod II – Kesme veya Kayma Modu (düzlem içi kayma modu)

Mod III – Yırtma veya Düzlem Dışı Mod (düzlem dışı kayma modu)

Bu kırılmalarda mod I ile ilgili gerilme şiddeti faktörüne  $K_I$ , mod II olana  $K_{II}$ , mod III ile ilgili olana  $K_{III}$  denir.



Mod I (Açılma)

Mod II (Kayma)

Mod III (Yırtılma)

Şekil 2.2 Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu.

Çatlak ilerlemesi, yükleme durumuna bağlı olarak, bu modların sadece birisiyle verilen türde olabileceği gibi farklı modların bir birleşimi şeklinde de ortaya çıkabilir. Bunların mod I, çekme altında oluştuğundan teknik olarak en önemlidir. Çünkü bu tür çatlak ilerlemesi en sık rastlanan ve en fazla hasara neden olan çatlak ilerleme modudur. Bu üç tür çatlak modu ile ilgili matematiksel bağıntılar ve mekanik inceleme mümkün olmakla beraber bundan böyle aksi belirtilmediği sürece sadece mod I türü çatlak ilerlemesi söz konusu olacaktır.

### 2.2.2. Kırılma mekaniği parametreleri

Tipik kırılma parametreleri hem enerji-salma miktarı veya gerilme genliği, hem de çatlak ucunun önündeki deformasyon bölgelerini tanımlar.

Aşağıdaki parametreler kırılma mekaniği analizinde yaygın kullanılır:

Gerilme-Şiddet Faktörü

Enerji-Salma Miktarı

J-İntegrali

Gerilme şiddet faktörleri ve enerji-salma miktarları lineer elastik kırılma mekaniğiyle sınırlıdır. J-integrali ise lineer elastik ve non-lineer elastik-plastik malzemelerin ikisine de uygulanabilir.

### 2.2.2.1. Gerilme şiddet faktörleri

Şu önemli nokta vurgulanmalıdır ki  $K$ 'nın değeri , gerilme gibi herhangi bir fiziksel parametreyi ifade etmeyip, çatlak ucundaki gerilme durumunu belirtmektedir. İşte bu noktada Kırılma Mekaniği, alışlagelmiş gerilme analizinden farklılık göstermektedir. Klasik gerilme analizinde gerilme şiddeti faktörü olarak da bilinen  $K$ 'nın değeri ise farklı geometriler için ve yükleme durumları için literatürde mevcuttur.

Mod I durumunda  $K_I$  için genel ifade

$$K_I = \lim_{\theta=0} \text{ için } r \rightarrow 0 \sigma_{xx} \sqrt{2\pi r} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir.

Griffith yaptığı açıklamalarda çatlak ucundaki gerilmelerin  $\sqrt{\pi a}$  ile orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Burada  $a$  çatlakın yarı uzunluğudur. Böylece en genel hali ile;

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada;

$Y$  : Parçanın geometrisine bağlı sabit bir katsayı,

$\sigma$  : Parçaya uygulanan gerilme,

$a$  : Çatlak uzunluğu,

$K$  : Gerilme şiddeti faktörü,

olarak verilir. Böylece  $K$  değeri, çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve elemanın geometrisi arasındaki bağıntıyı verir. Burada  $Y$  geometrik faktör,  $a$  merkezi çatlak durumunda yarı çatlak boyu; kenar çatlak durumunda ise tam çatlak uzunluğudur.  $K_I$  değerine gerilme şiddeti faktörü denir.

Gerilme şiddeti faktörünün ( $K_I$ ) bilinmesi durumunda çatlak ucundaki tüm gerilme ve genlemelerin (birim uzama) büyüklüğü tespit edilebilir. Bu gerilme ve genlemeler belirli bir kritik değere ulaştığında çatlak ilerler. Böylece  $K_I$  değeri belli bir kritik değere ulaştığında çatlak ilerler. İşte gerilme şiddeti faktörünün bu kritik değerine Kritik Gerilme Şiddeti Faktörü denir. Kırılma tokluğu olarak bilinen bu büyüklüğün birimi  $MNm^{-3/2}$  olarak bulunur ve  $K_{IC}$  ile gösterilir. Bu değer tıpkı sertlik, akma gerilmesi veya elastik modülde olduğu gibi bir malzeme parametresidir.

Mod II hali için oluşan elastik gerilme alanı  $K_{II}$  şu bağıntı ile verilir.

$$K_{II} = \lim_{\theta=0} \text{ için } r \rightarrow 0 \sigma_{xz} \sqrt{2\pi r} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir.

Mod III hali için oluşan elastik gerilme alanı  $K_{III}$  şu bağıntı ile verilir.

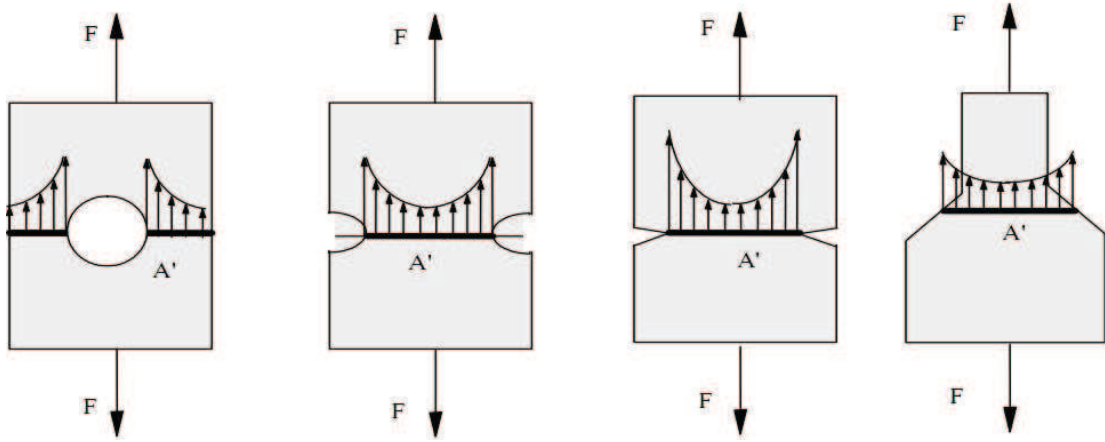
$$K_{III} = \lim_{\theta=0} \text{ için } r \rightarrow 0 \sigma_{yz} \sqrt{2\pi r} \quad (2.4)$$

bağıntısı ile verilir.

### 2.3. Gerilme Yığılması

Kuvvet etkisi kalan elemanlarda gerek iç kısımlarda gerekse kenarlarında bir süreksizlik bulunabilir. Bazı durumlarda da bu elemanların kesitlerinde yavaş veya ani bir kesit değişimi olabilir. Bu gibi elemanlarda oluşacak gerilmelerin üniform olmadığı görülür. Parçaların imalatı sırasında oluşabilecek boşluk, çatlak ve diğer birikintiler ile meydana gelmiş çok küçük boşluklarda gerilme üniform olarak dağılmayabilir. Bazı hallerde oluşacak gerilmeler, ortalama gerilmeler ( $F/A$ ) ' dan çok farklı olacaktır. Bazı bölgelerde gerilmeler maksimum değerine ulaşırlar. İşte gerilmelerin ortalama değerlerinden ayrılarak bazı bölgelerde maksimum değerine erişmesine gerilme yığılması denir ve bu çentik etkisi diye de adlandırılır. (Şekil 2.3)

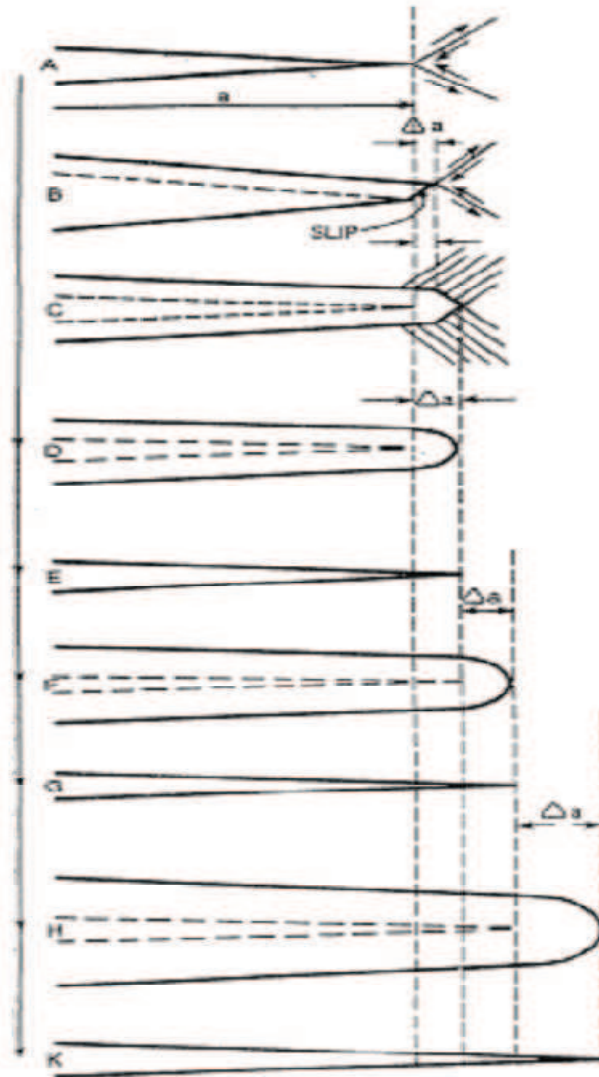




Şekil 2.3. Basit Çekme Durumunda Çentikli Kısımlarda Oluşan Yığılmaları

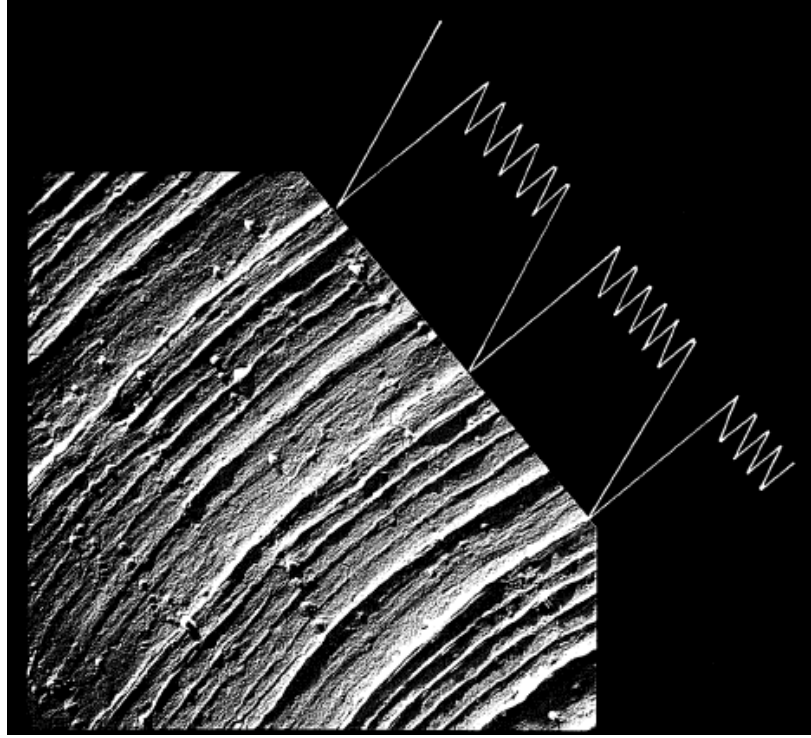
#### 2.4. Çatlak İlerleme Mekanizması

Düşük servis yüklerinde dahi çatlak ucu civarında malzemede gerilme yığılmasından kaynaklı plastik deformasyon olacaktır. Plastik deformasyon çatlak ucunda oluşan kayma gerilmeleri sonucunda oluşur. Devam eden kayma gerilmeleri sonucunda küt bir çatlak ucu meydana gelir. Yüklemenin kaldırılması sırasında bu uç tekrar keskin bir hal alır. Normal mekanizma ilerlemesinde aslında yükün kaldırılması ilerleyen  $\Delta a$  çatlak boyunun geri kapanmasına neden olacaktır. Fakat kayan düzlemler sonucu açılan malzeme yüzeyi oksitlenme sonucu geri kapanamamakta ve çatlak ilerlemektedir. Diğer yükleme çevrimlerinde bu süreç tekrar etmekte ve çatlak ilerlemektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Çatlak ucu ilerleme mekanizması

Çatlak ucunun tekrar eden kütleşip keskinleşme süreci sonucu oluşan izler çatlakın büyütme oranı yüksek bir elektron mikroskopunda gözlenmesine olanak tanır. Bu izlere yorulma çizgileri (fatigue striations) denir (Şekil 2.5)



Şekil 2.5 Yorulma Çizgileri

Gerilme korozyonu sonucu çatlak ilerlemesi de yavaş ilerleyen bir süreçtir. Çatlak uç bölgesinde korozif etki sonucu genellikle tane sınırları boyunca ilerler. Bu etki yüksek gerilme ve devam eden atomik düzensizlikler sonucu oluşur. Sürünme çatlaklarının genel mekanizması ise, atomik boşlukların difüzyonu ve kümeleşen bu boşlukların malzeme içerisinde bir delik haline gelerek çatlak ucuyla birleşmesi şeklinde olur.

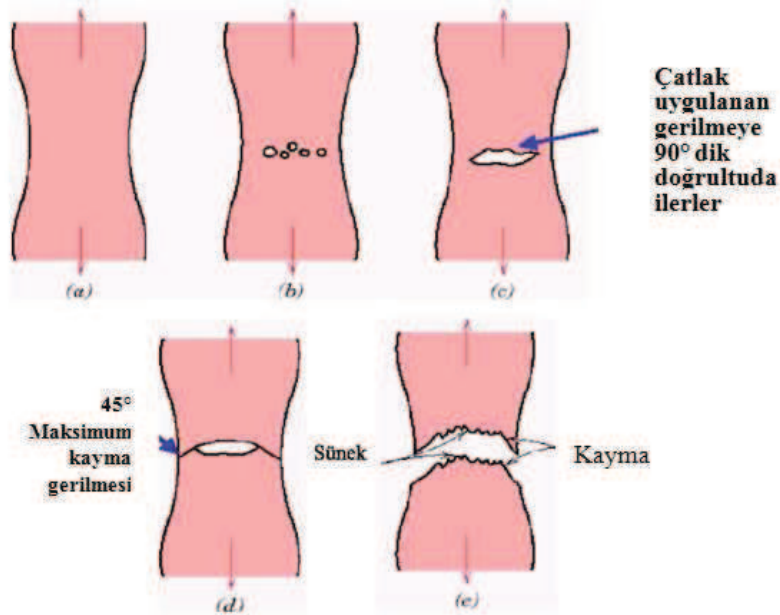
## 2.5.Kırılma Türleri

Malzemenin yükleme sonucu kırılması ikiye ayrılarak incelenebilir. Bunlar şekil değişimin oldukça belirgin olduğu sünek kırılma ve şekil değişimin oldukça sınırlı olduğu gevrek kırılma veya ayrılma kırılma olmak üzere iki ana grupta toplanabilir.

### 2.5.1.Sünek kırılma

Genel anlamda gevrek kırılmanın tersidir. Sünek kırılmada çatlak etrafında büyük oranda deformasyonlar ve buna bağlı olarak ta gözlemlenebilir ölçüde çatlak ucu

körleşme meydana gelir. Genellikle çatlakların oluşması ve ilerlemesi için büyük enerjiler gerekli olup "sünek malzeme" den ziyade sünek davranış söz konusu olur.



Şekil 2.6. Sünek kırılmada hasar oluşumu, (a) Bel verme, (b) Boşluk oluşumu, (c) Çatlak başlatmak üzere boşluk birleşmesi, (d) Çatlak ilerlemesi, (e) Kırılma

Sünek kırılmada büyük oranda plastik deformasyonun yanında önemli miktarlarda enerji absorpsiyonu da gerçekleşir. Bu özelliklere bağlı olarak sünek kırılmada;

- Çatlak ilerlemesi yavaş olur
- Çatlak ilerlemesi kararlı olur, bazı durumlarda çatlakların ilerlemesi için daha fazla gerilmeye ihtiyaç duyulur,

Sünek kırılmanın gerçekleşme aşamaları Şekil 2.6.'den görülebileceği gibi;

- a) Başlangıç boyun vermesi
- b) Boşluk oluşumu,
- c) Boşlukların çatlakları oluşturması,
- d) Çatlak ilerlemesi
- e) Son kayma

Son kayma olayı, kayma gerilmesinin maksimum olduğu 45°'lik düzlemde oluşur.

### 2.5.2. Gevrek kırılma

Gevrek kırılma, keskin bir çatlak ilerleyerek bir malzemeyi çatlak ucunda oluşan küçük lokal deformasyonlarla kırması olarak tanımlanabilir. Bu ise genelde sünek kırılmaya göre daha düşük tokluk değerlerinde ortaya çıkar. Ancak inorganik bir cam ve yüksek mukavemetli bir çelik gevrek kırılarak hasara uğramakla birlikte biri diğerine göre çok daha toktur. Genel olarak bir "gevrek malzeme" tanımını yapmadan ziyade her bir malzemenin uygun şartlar yerine geldiğinde gevrek bir davranış gösterebileceği esas alınmalıdır.

Gevrek kırılma parçada herhangi bir plastik deformasyon meydana getirmez ve hasar düşük enerji absorpsiyonu sonucu ortaya çıkar. Böylece gevrek kırılma;

- Çatlak ilerlemesi bir kerede ve hızlı gerçekleşir,
- Kuvvete dik yönde ilerleyen çatlak sonucu oldukça düz bir kırılma yüzeyi ortaya çıkar.

Malzemelerde ortaya çıkan gevrek kırılma aşağıdaki nedenlerin bir veya birkaçının bir araya gelmesi sonucu oluşur.

- Üç boyutlu gerilme hali
- Yüksek genleme hızları
- Düşük sıcaklıklar

Gevrek kırılma uygulanan gerilmeye dik doğrultuda gerçekleşir ve büyük ölçüde düz ve pürüzsüz bir çatlak yüzeyi meydana getirir.

Bu tezin inceleme alanı ise çatlak ilerlemesi sonucunda oluşan kırılmadır. Kırılma mekaniği bu tür problemlere iki türlü yaklaşım öngörmektedir. Bunlar;

1. Griffith Enerji Dengesi
2. Irwin Teoremi

dir. Kırılma mekaniği problemlerinin çözümlerinde de kullanmakta olduğumuz "K" (gerilme şiddeti katsayısı) Irwin'in çatlak ucu için türettiği bir ifadedir. Bu katsayı malzemedeki çatlak boyuna ve malzemenin yükleme şartlarına bağlıdır.

Çatlak ilerleme hızı, çatlak ucundaki lokal çekme gerilmelerine bağlıdır. Çekme gerilmesinin kritik değerleri aşması ile çatlak ilerlemesi hızlanarak kırılmaya yol açar. Kırılmaya yol açan bu kritik gerilme değeri malzemenin kırılma tokluğu değerini verir.

Kırılma tokluğu, malzemenin kırılmaya direnç gösterebilme kabiliyetidir. Herhangi bir yapıda yükleme şartlarına göre dengeli bir gerilme dağılımının söz konusu olması için, malzemenin yapısal özelliklerinden akma gerilmesi ve kırılma tokluğu ters orantılı olarak optimize edilmelidir. Böylece yüksek akma gerilmesine ve düşük kırılma tokluğuna sahip malzemeler yada yüksek kırılma tokluğuna ve düşük akma gerilmesine sahip malzemeler yapılar için uygun seçim olacaktır. [1,2,3,4,7]

### **BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS**

ANSYS paket programı ile statik, dinamik, lineer, non-lineer, termal ve magnetik gibi çok geniş spektrumlu modelleme ve analiz yapılabilmektedir. Program genel olarak ön işlemci, çözüm ve son işlemci olmak üzere üç kısımdan oluşur. Modelin oluşturulması ve sınır şartları ön işlemci kısmında oluşturulur. Çözüm kısmında; problemin çözümü gerçekleştirilir. Son işlemci kısmında ise elde edilen sonuçlar değerlendirilir.

ANSYS gibi ticari amaç için hazırlanmış yazılımların en önemli özelliği; probleme yönelik özel eleman içeriyor olmasıdır. Böylece bu tür elemanlar kullanılarak yapılan modellemeler gerçek şartlara daha yakın olmakta ve daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

ANSYS sonlu elemanlar programında analizi yapılacak parça aşağıdaki işlem basamakları uygulanarak analizi yapılır;

- Bütün (düğüm noktaları ile) parçalara bölünür,
- Her elemanın fiziksel özelliklerine göre davranışları tanımlanır,
- Bütün, denklemlerin yaklaşım sistemlerine göre, elemanlar düğüm noktalarından birbiriyle bağlanır,

Oluşturulan denklem, bilinen değerlere bağlı olarak bilinmeyen değerler için çözülür, istenen özelliklerin simülasyonu yapılır. Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. 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 akısı, akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük, alanın almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen pratikte özel bir önem içerir. Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar nod adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebri bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. [7]



## **BÖLÜM 4. KÖŞE KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ DÜZLEMSEL YAPILARIN KIRILMA ANALİZİ**

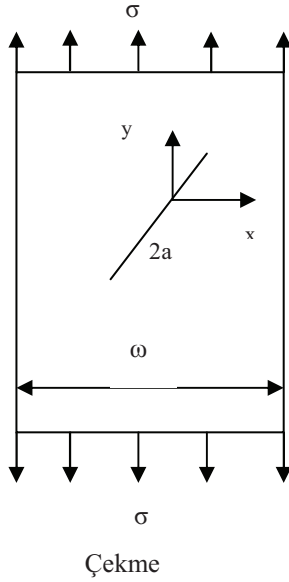
Bu tezin amacı köşe kaynağı ile birleştirilmiş plakaların sonlu elemanlar yöntemini kullanarak lineer elastik kırılma mekaniğinin parametresi olan gerilme şiddet faktörlerinin bulunmasını, deformasyon ve gerilme durumlarının incelenmesini içermektedir. Model üzerinde kaynak ağzı açılması, kaynak alt ve üst ayaklarının boylarının değiştirilmesi, kaynak bölgesine içbükeylik ve dışbükeylik verilmesi, kaynak yapılacak parçaların yarıçaplarının ve kalınlıklarının değiştirilmesi gibi değişiklikler yaparak farklı sınır şartları için analizler incelenecek ve gerilme şiddet faktörleri karşılaştırılacaktır. Daha sonra çatlak ilerlemesi incelenecektir.

### **4.1. Problemin Tanımlanması**

Eksenel simetriye sahip olan modelimiz 2 boyutlu olup modelin dörtte birinin alınması ile analizlerin daha kısa sürede çözülmesini, bilgisayar hafızasının daha verimli kullanılmasını ve karmaşık modellemenin önüne geçilmesini sağlamaktadır. Malzeme olarak  $E=200\text{GPa}$   $\nu=0.3$  olan çelik kullanılmıştır. Kaynak malzemesi de birleştirilen parçalarla aynı kabul edilmiştir.

Eksenel çekme kuvvetine maruz köşe kaynağı ile birleştirilmiş düzlemsel yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme ve deformasyon analizleri yapılacaktır. Benzer analizler kaynak ağzı açılarak köşe kaynağı yapılmış düzlemsel elemanlar için tekrarlanacaktır. Kaynak ağzı açılmış ve açılmamış bağlantılardaki deformasyon ve gerilme davranışları karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Bunlara ilave olarak, kısmi kaynak ağzı açılmış ve açılmamış köşe kaynak bağlantılarındaki gerilme şiddet faktörlerinin değişimi farklı kalınlık, genişlik ve sınır şartları için belirlenecektir. Çatlak oluşması muhtemel noktalara çatlak başlatılarak ilerleme davranışı belirlenecektir. Yapılan bu çalışmada kalıntı gerilmeler göz önünde bulundurulmamıştır.

#### 4.1.1. Çözümü bilinen örnek problem



Geniş bir çelik levha, ortasında kalınlık boyunca 8 mm uzunluğunda  $20^\circ$  eğik bir çatlak bulundurmaktadır. Uygulanan gerilme 200 MPa olması durumunda levhanın hasara uğrayıp uğramayacağını hesaplayınız. Çeliğin kırılma tokluğu  $K_{Ic} = 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$  alınacak.

$$K_I = \sigma_{yy} \sqrt{\pi a} = \sigma \sin^2 20^\circ \beta \sqrt{\pi a}$$

$$K_I = 200 \text{ MPa} \sin^2 20^\circ \sqrt{\pi 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$K_I = 7.67 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{I \text{ ANSYS}} = 7.91 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{II} = \sigma_{xy} \sqrt{\pi a} = \sigma \cos \beta \sin \beta \sqrt{\pi a}$$

$$K_{II} = 200 \text{ MPa} \cos 20^\circ \sin 20^\circ \sqrt{\pi 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$K_{II} = 7.21 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{II \text{ ANSYS}} = 7.07 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

$$K_{Ic}^2 = K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{E'(1+\nu)K_{III}^2}{E}$$

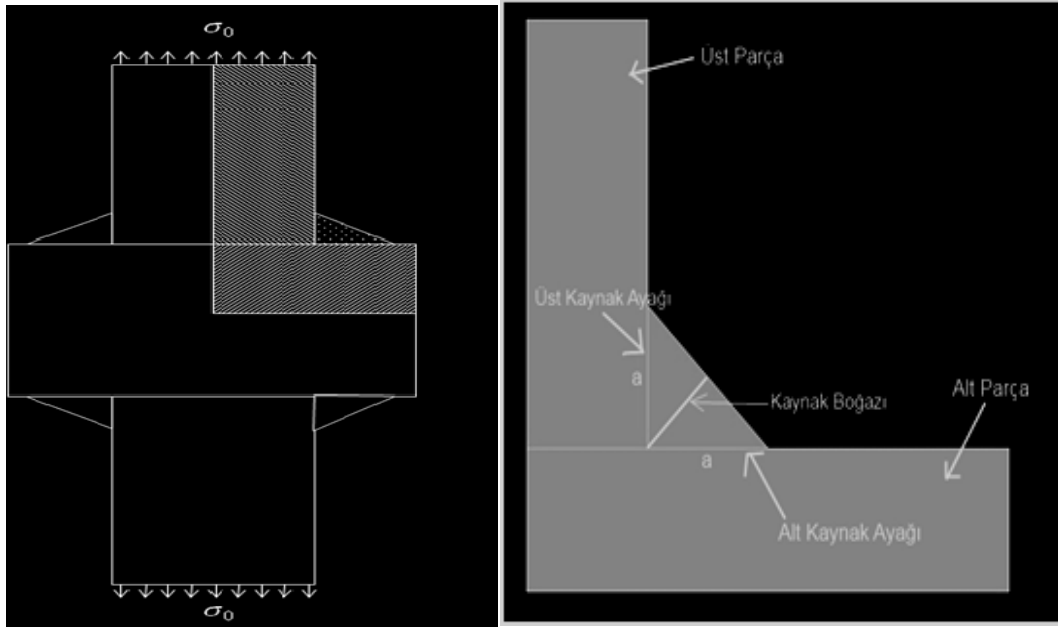
$$K_{Ic} = \sqrt{(7.67)^2 + (7.21)^2}$$

$$K_{Ic} = 10.53 \text{ MPa}\sqrt{m} \leq K_{Ic}$$

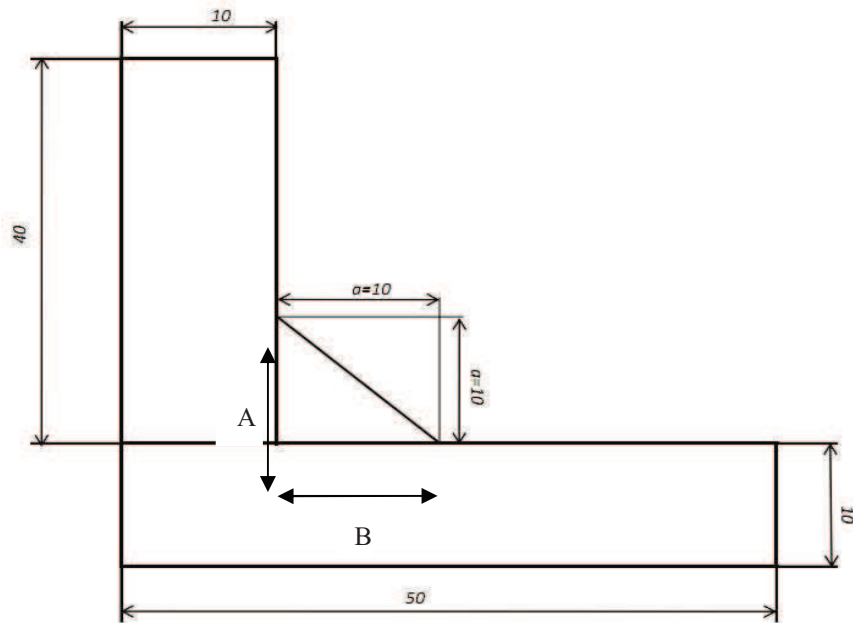
Böylece  $K_{Ic} > 10.53 \text{ MPa}\sqrt{m}$  olduğundan levha hasara uğramayacaktır. [1]

## 4.2. Modelin Oluşturulması

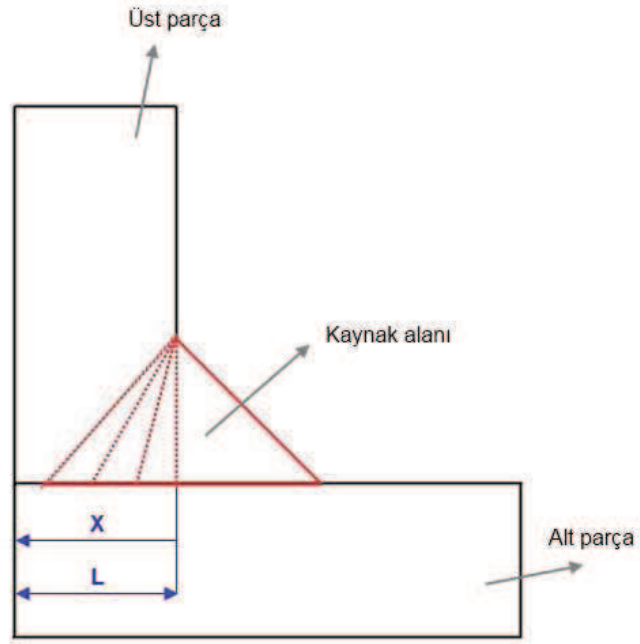
Analizde kullanılacak olan parçanın malzemesi yapı çeliğidir. Modelin tam kesiti ve bölgeleri Şekil 4.1’de, Modelin boyutları Şekil 4.2’de, Kaynak ağız tanımlama Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Modelin tam kesiti ve bölgeleri



Şekil 4.2 Modelin boyutları ( $\times 10^{-3}$ )



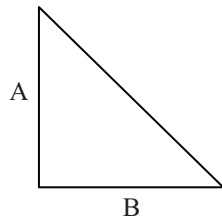
Şekil 4.3 Kaynak Ağız Tanımlama

X : Kaynak ağız uzunluğu,

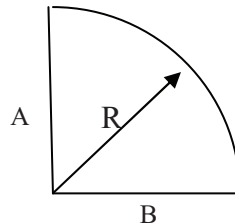
L : Üst parçanın eni,

A : Kaynak üst kolu

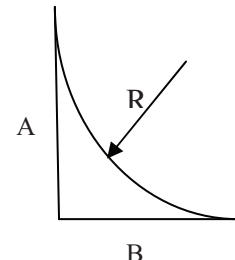
B:Kaynak alt kolu



Base



Dış bükey



İç bükey

Kaynak ağız tanımlarken X'i 1'er birim azaltarak 10'dan 1 değerlerine kadar azaltılmıştır. (X\L) oranına göre kaynak ağız tanımı yapılmıştır.

Tablo 2.1. Kaynak Ağız Tanımlama

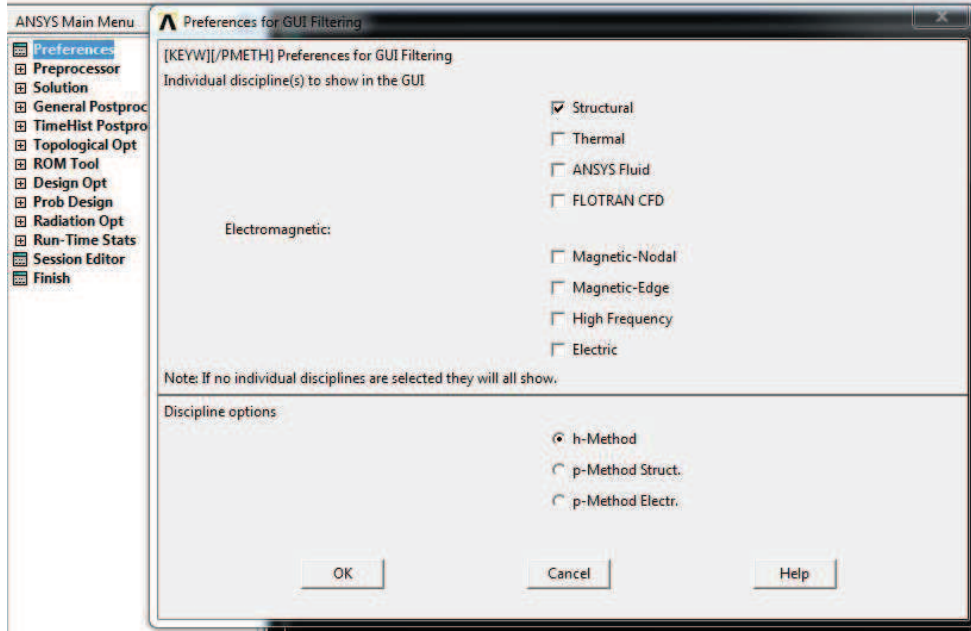
	$X(m) \times 10^{-3}$	$X \setminus L(m) \times 10^{-3}$
X1	10	1
X2	9	0,9
X3	8	0,8
X4	7	0,7
X5	6	0,6
X6	5	0,5
X7	4	0,4
X8	3	0,3
X9	2	0,2
X10	1	0,1

### 4.3. Analiz Tipinin Belirlenmesi

Bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS programında,

[Main Menu>Prefences>Structural]

Yolu izlenerek Şekil 4.4’de gösterilen biçimde structural seçilir. Bunun seçilmesinin nedeni yapılacak analizin yapısal bir analiz olduğudur.

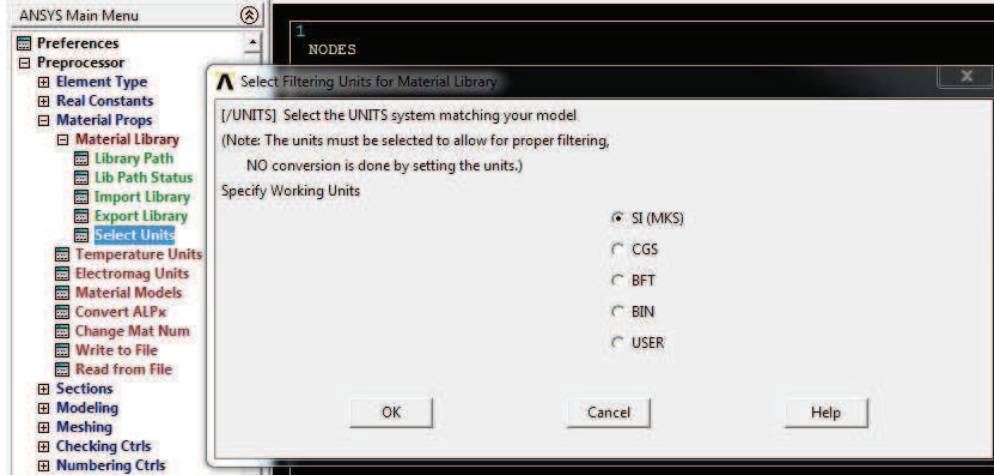


Şekil.4.4. Analiz Tipinin Belirlenmesi

### 4.4. Birim Sisteminin Belirlenmesi

Modelimizi oluştururken ve elde edeceğimiz değerlerin hangi birim sistemine göre değerleri girilmek isteniyorsa ona uygun birim sistemini belirtilen komutla seçeriz.

[Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Library > Select Units> User> Ok] Bu uygulamada SI (MKS) birim sistemi seçilmiştir. (Şekil.4.5.)

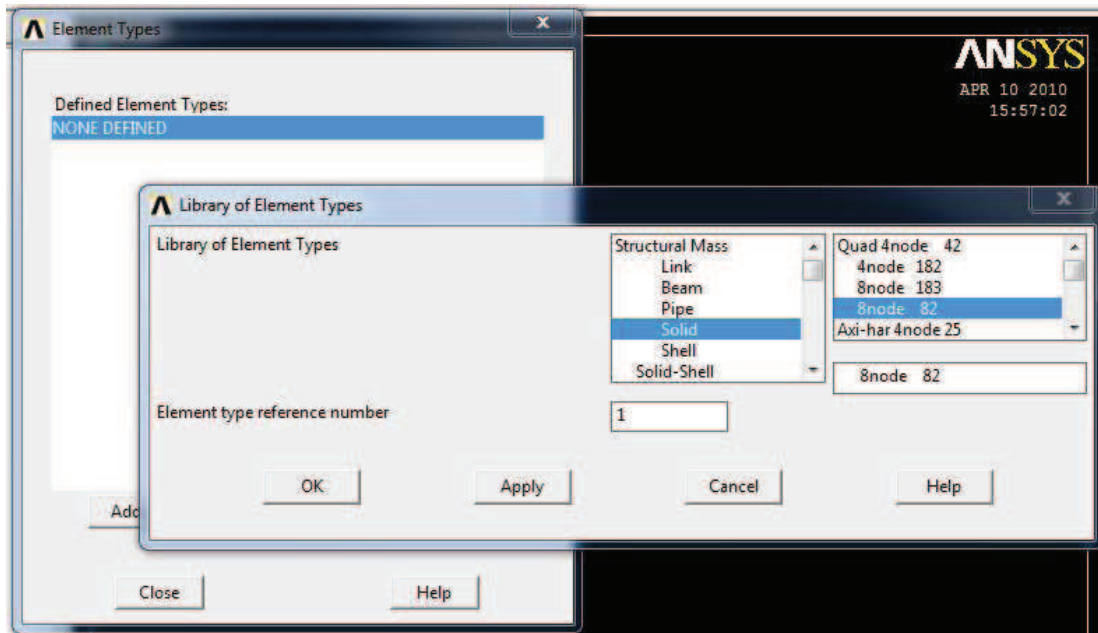


Şekil.4.5. Birim Atama

#### 4.5. Eleman Tipinin Belirlenmesi

Yapacağımız gerilme analizi iki boyutta olacağı için ve çelik malzeme kullanılacağı için element tipi Solid altında 8node 82 olarak seçilmiştir. (Şekil 4.6.)

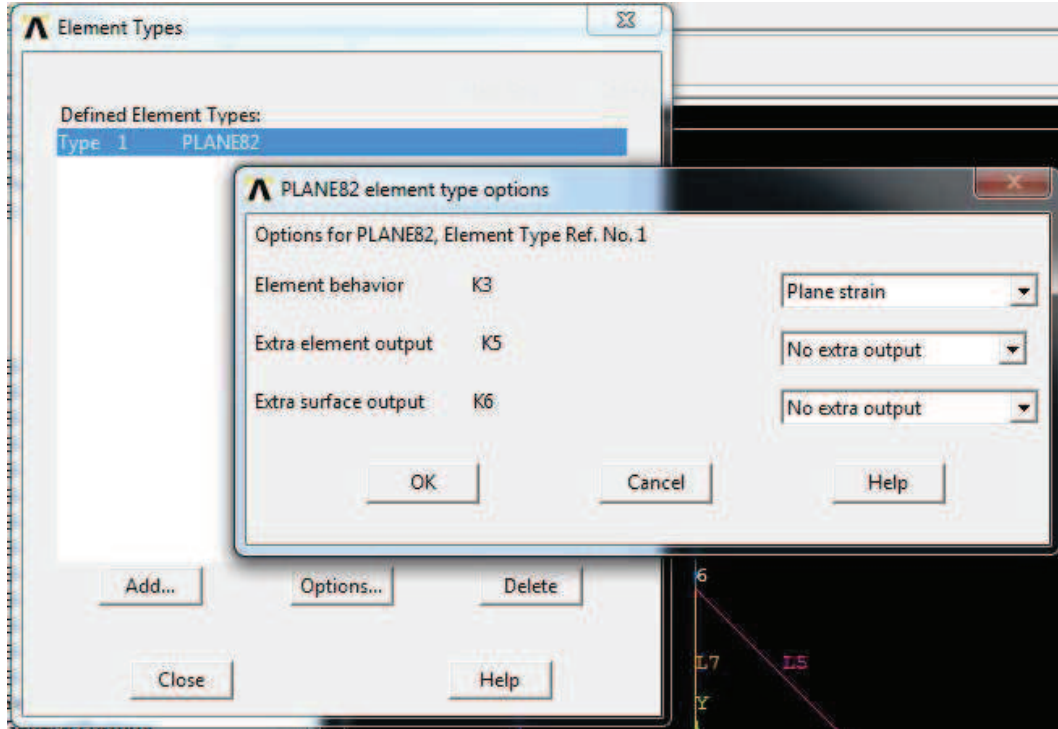
[Main Menu> Preprocessor>Element Type> Add> Solid-8node 82>Ok]



Şekil 4.6. Eleman Tipinin Belirlenmesi

8node 82 eleman tipi seçildikten sonra “Options” butonundan element davranışı “Plane Strain” olarak seçilir. (Şekil 4.7.)

[Main Menu> Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete>Options> Plane Strain> Ok]

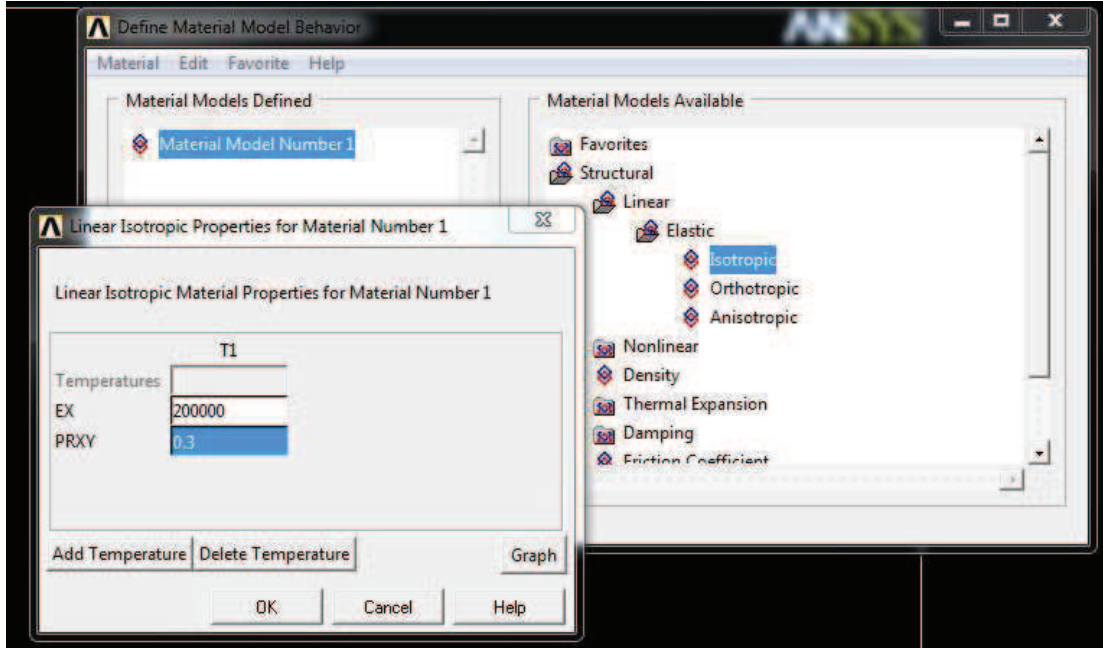


Şekil 4.7. Element Davranışı Seçimi

#### 4.6. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Analizde kullanılan malzeme tüm doğrultularında aynı özelliği gösteren (izotropik), yükleme sonucu kalıcı deformasyon göstermeyen (elastik) ve tek eksenli yüklemde gerilme-şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki bulunan (lineer) bir malzemedir. Bu malzeme özelliklerinin analizde kullanılması için aşağıdaki yol izlenerek programa girişi yapılır. Malzememizin elastisite modülünü ve poisson oranını girerek Ok’yi tıklıyoruz. ( Şekil 4.8 )

[Main Menu> Preprocessor> Material Props>Material Models> Structural> Linear> Elastic> Isotropic]



Şekil 4.8. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 4.7. Geometrik Modelin Oluşturulması

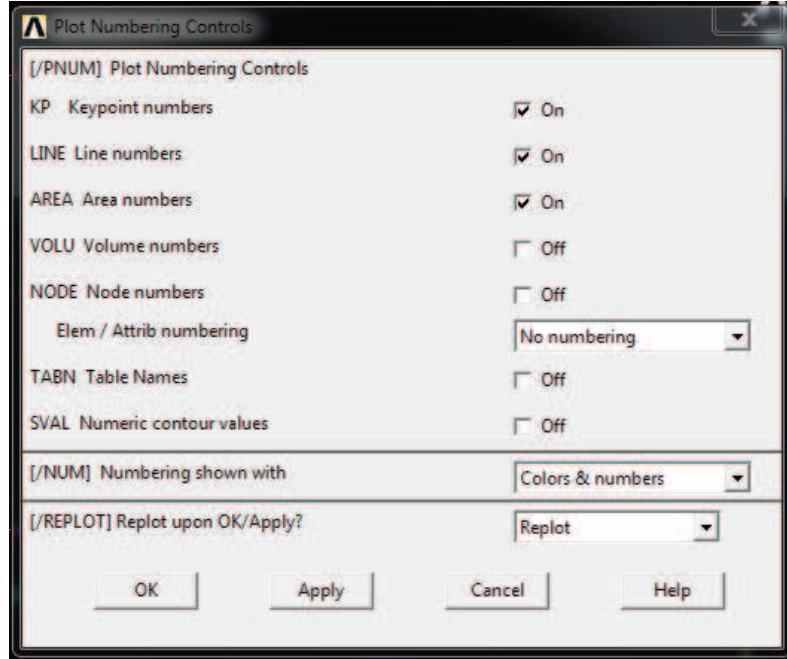
Geometrik model oluşturmadaki en temel yöntem keypointlerden (anahtar noktalar) çizgiler, çizgilerden alanlar oluşturmaktır. Bu çizgilerin oluşturulması için de çatlak kısmında aynı koordinatlara sahip iki adet keypoint oluşturulması gerekmektedir.

ANSYS programında oluşturduğumuz noktaları , çizgileri ve alanları numaralanmış bir biçimde görmek istiyorsak ;

[Utility Menu> PlotCtrls > Numbering ] komutuyla açılan pencereden aşağıda anlatılan işlemler yapılır.

Bu sekmeden KP , LINE , AREA numaralarının gözükmeleri için “Off “ seçili alanlar seçilerek “ On” Konumuna getirilir. (Şekil 4.9.)





Şekil 4.9. KP, LINE, AREA numaralandırılışı

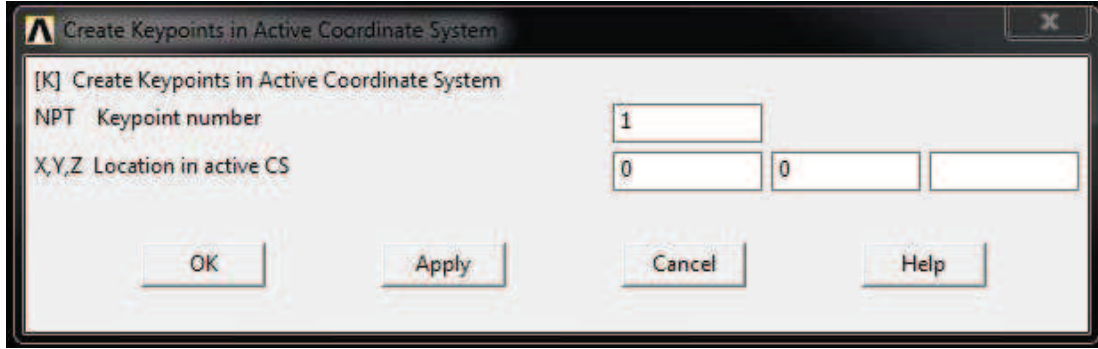
#### 4.7.1. Keypointlerin Oluşturulması

Keypointleri oluşturmak için aşağıdaki yol izlenir. ( Şekil 4.10. )

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> On Active Cs ]

Tablo 4.1. Oluşturulan keypointlere ait koordinatlar

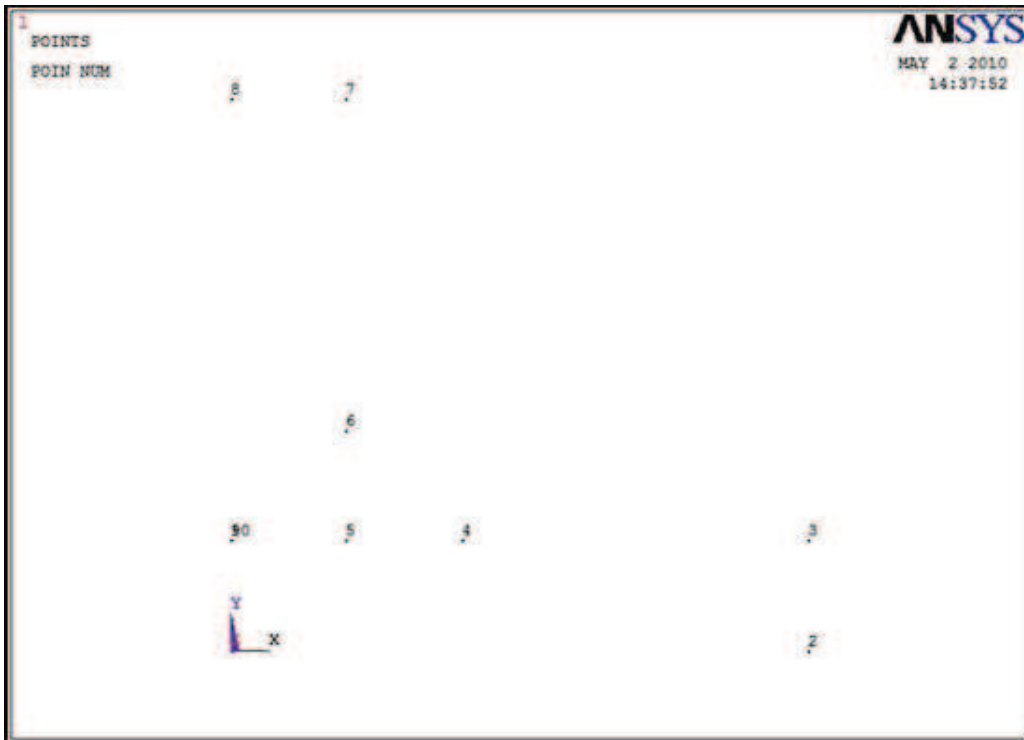
Düğüm Noktası No.	X	Y	Z
1	0	0	0
2	$50 \times 10^{-3}$	0	0
3	$50 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	0
4	$20 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	0
5	$10 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	0
6	$10 \times 10^{-3}$	$20 \times 10^{-3}$	0
7	$10 \times 10^{-3}$	$50 \times 10^{-3}$	0
8	0	$50 \times 10^{-3}$	0
9	0	$10 \times 10^{-3}$	0
10	0	$10 \times 10^{-3}$	0



Şekil 4.10. Keypoint Oluşturma

Açılan menüdeki ilk kısma oluşturulacak keypoint numarası yazılır. Diğer kısımlara ise sırasıyla X, Y ve Z koordinatları yazılır. Bu analiz 2 boyut (2-D) üzerinde yapılacağından sadece X ve Y koordinatları kullanılacaktır.

1 den 10'a kadar olan bu koordinatlar yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi "Apply" komutu ile sırasıyla girilir ve son keypointin koordinatları girildikten sonra "OK" komutuyla keypoint oluşturma işlemi tamamlanır. ( Şekil 4.11. )

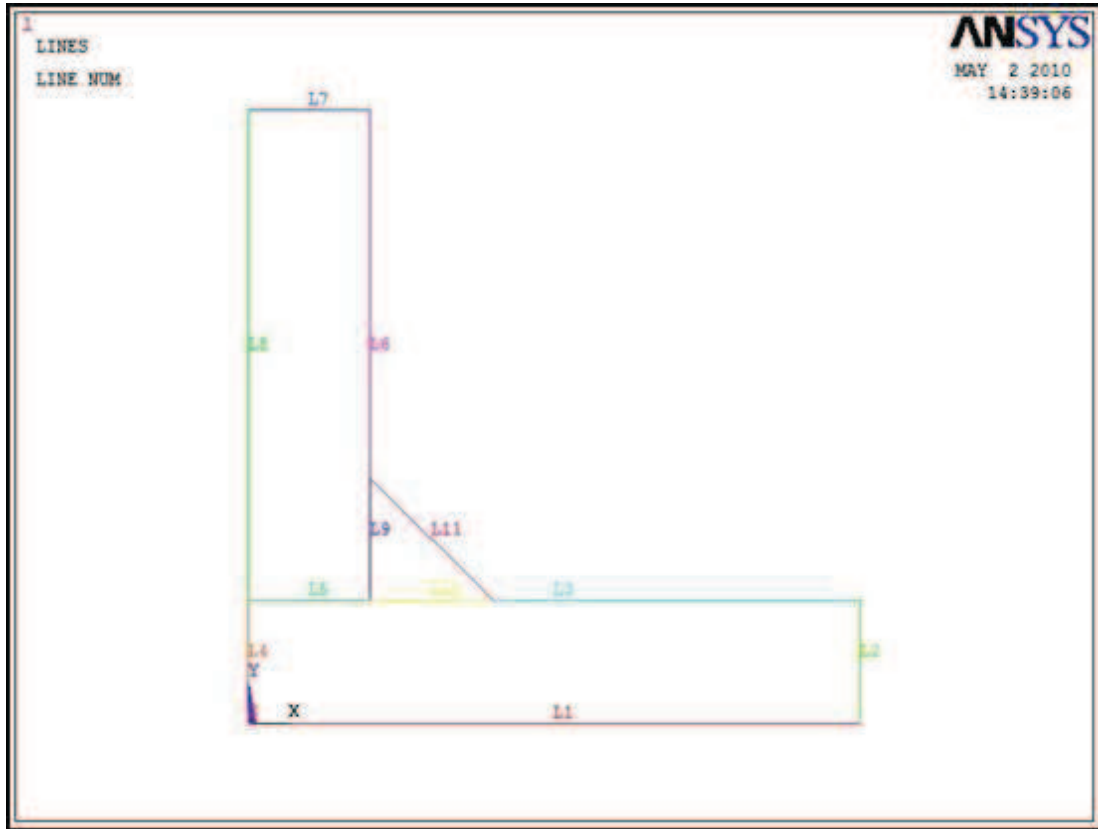


Şekil 4.11. Keypointlerin çalışma düzlemine yerleşimi

#### 4.7.2.Çizgilerin oluşturulması

Bu adımda dikkat edilmesi gereken çatlak bölgesinde iki adet üst üste doğru meydana getirmektir. Oluşturulacak modelde bu doğrular 3-10 ve 5-9 noktaları arasındaki doğrulardır.

[Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Straight Line ]



Şekil.4.12.Çizgilerin Oluşturulması

Şekil 4.12 'da gösterilen L5 ve L3 çizgilerini oluşturmak için 9 ve 10 noktaları seçilmesi gerekir. Ancak bu noktalar aynı koordinatlara sahip olduğundan program, hangi noktanın seçilmesi gerektiğini ufak bir pencere açarak soracaktır.

#### 4.7.3.Alanların oluşturulması

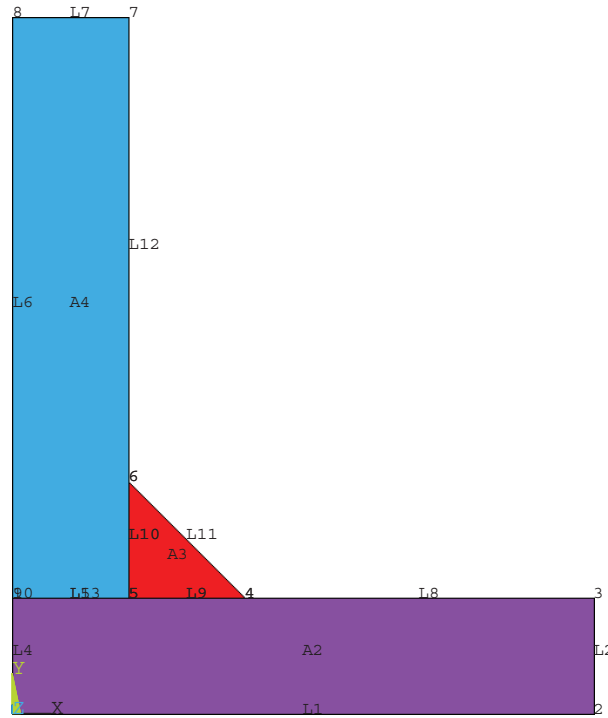
Çizgilerimizden yararlanarak üç adet alan belirleyeceğiz.

[ Main Menu>Preprocessor> Modeling>Create>Arbitrary>By Lines ]

Alanlardan A4 ile A3, A3 ile A2 yi birbirine yapıştıracağız. ( Şekil 4.13 )

[Main menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue ]

Böylece farklı çizgiler ve ortak çizgiler üzerinde oluşan bu üç alan arasında çekme kuvveti ve burulma uyguladığımız zaman oluşan boşluk bize çatlaklarımızı verecek.

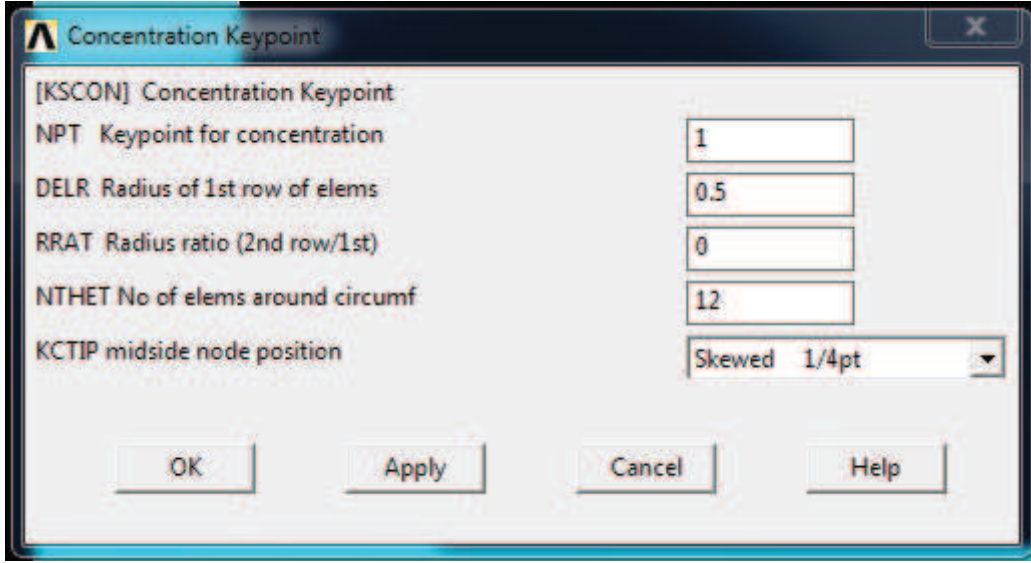


Şekil.4.13. Alanların Oluşturulması

#### 4.8. Elemanlara Ayırma (Meshing) İşlemi

Analizin doğru bir şekilde yapılabilmesi için oluşturulan model daha küçük elemanlara ayrılması gerekir. Bu işleme “meshleme” yani “elemanlara ayırma” denir. İlk olarak çatlak çevresinde üçgen elemanların tanımlaması yapılmalıdır. Kırılma mekaniğinde, sonlu elemanlar modelinde çatlak etrafındaki elemanların çevre boyunca üçgen elemanlar (singular) olması gerekir. Bunun için aşağıdaki komut kullanılarak çatlak dibindeki keypoint seçimi yapılır. ( Şekil 4.14 )

[Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrl> Concenrats KPs> Create ]

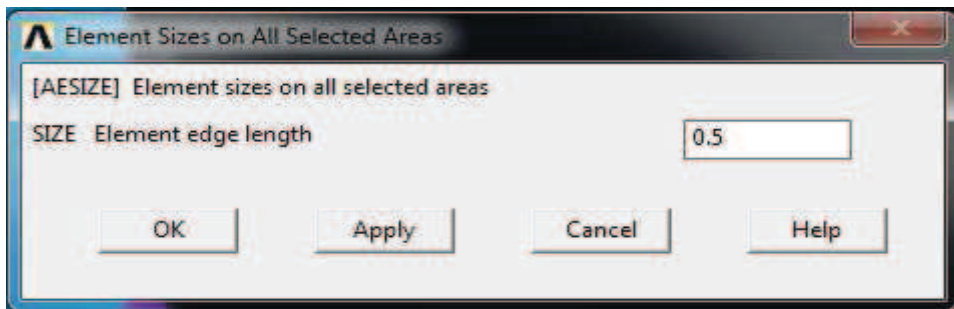


Şekil.4.14.Çatlak Ucunun Yoğunlaştırılması ( Meshleme işlemi için değerlerin girilmesi )

Bu pencerede ilk değer çatlak dibinde seçtiğimiz keypoint'in numarasıdır. İkinci değer çatlak etrafında oluşturduğumuz dairenin yarıçapını verir. Üçüncü değer ikinci elemanın birince elemana olan oranını belirtir. Dördüncü değer ise merkezin etrafındaki eleman sayısını belirler. Beşinci değer midside node position olarak tanımlanan, skewed 1/4 pt seçmemizin sebebi merkez nokta etrafındaki ilk 4 sıra geometrisinde simetriyi bozmamaktır. Skewed 1/2 pt seçilirse 2. sıra elemanlardan sonra geometriyi bozarak üçgen elemanlardan dörtgen elemanlara geçiş sağlanır. Bu tanımlandıktan sonra;

Üçgen elemanları oluşturduktan sonra eğer daha hassas sonuçlar almak isteniyorsa aşağıdaki komut kullanılarak elemanların boyutu belirlenebilir. Bu çalışmada tüm modeller için eleman boyutu "0.5" olarak seçilmiştir. (Şekil 4.15.)

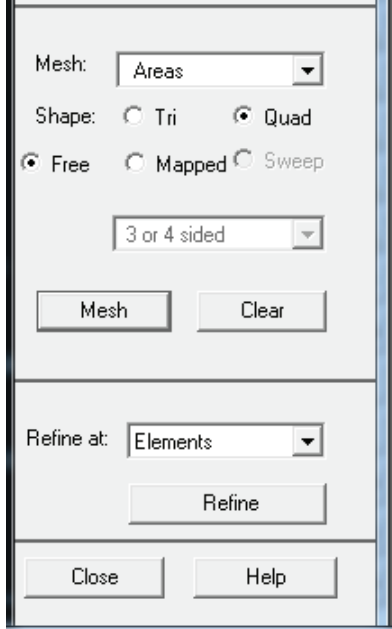
[Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrls> ManuelSize> Areas> All Areas]



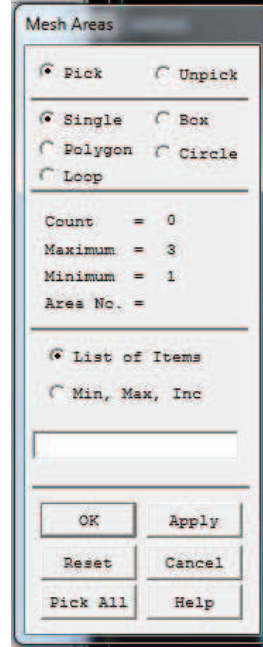
Şekil.4.15.Alanların Mesh Büyüklüğü

Eleman boyutunu belirledikten sonra da mesh işlemine geçilir.

[Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool > Mesh]

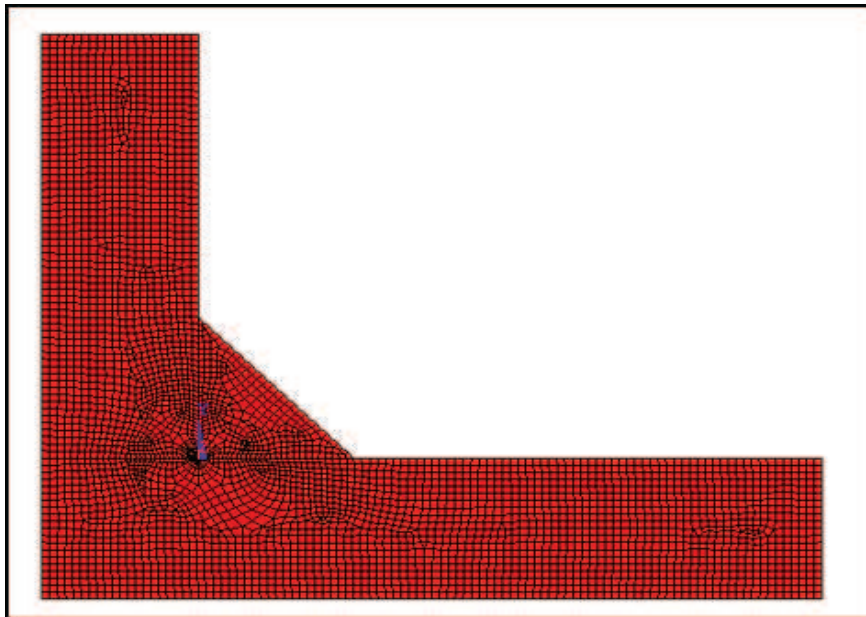


Şekil 4.16. Mesh Komutu

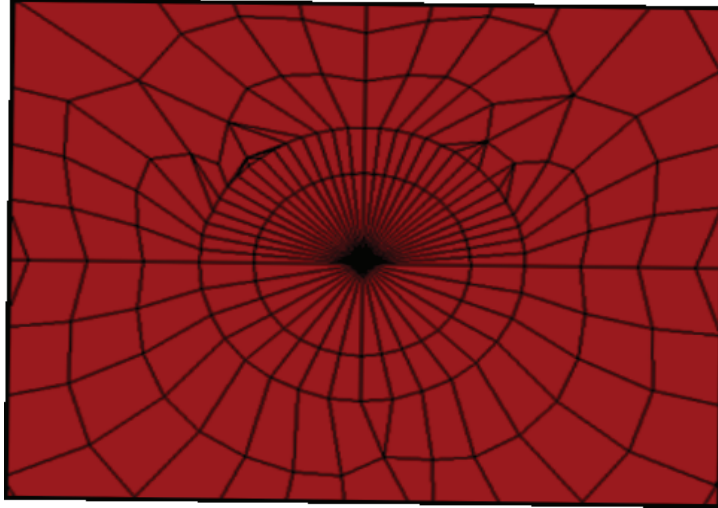


Şekil 4.17. Meshlenecek Alanların Seçimi

Mesh” seçilir ve Mesh Areas ekranı açılır bu ekrandan “Pick All” işaretlendikten sonra oluşturduğumuz parça elemanlara ayrılır. (Şekil 4.17)

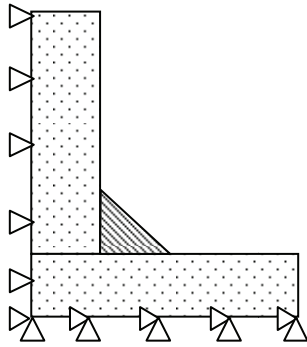


Şekil.4.18. Meshleme işlemi sonrası modelin görünümü

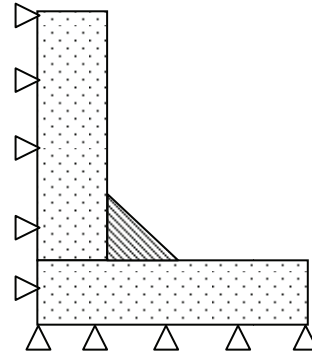


Şekil.4.19. Çatlak Bölgesi Yoğunlaştırılmış

#### 4.9. Sınır Şartları ve Yüklerin Uygulanması



Şekil 4.20. Ankastre sınır şartı



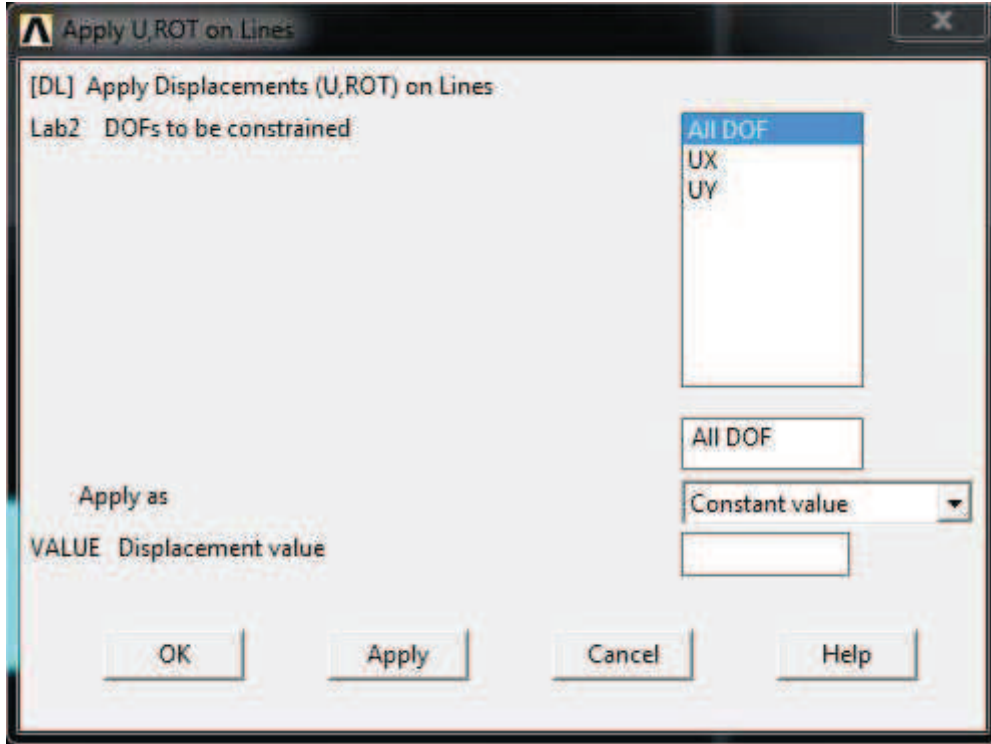
Şekil 4.21. Simetrik sınır şartı

##### 4.9.1. Sınır şartlarının uygulanması

İlk olarak, analizde bir hata oluşmaması için model sabitlenir.

[Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Lines]

Açılan pencerede Şekil 4.20’de gösterildiği gibi “All DOF” seçilir ve OK butonu tıklanır.



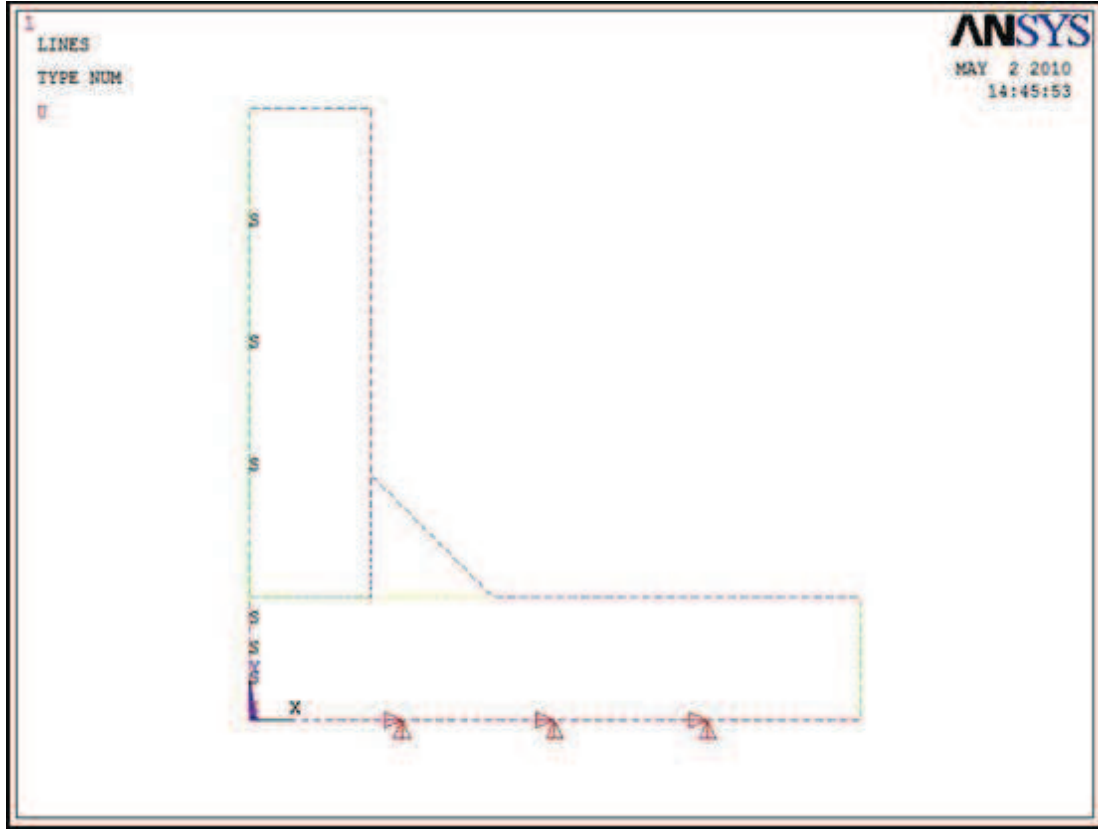
Şekil.4.22. Sınır Şartlarının Uygulanması. Modelin Sabitletmesi

#### 4.9.2. Simetri seçimi

Modelin y-y eksenine göre simetrik olduğu kabul edilecek ve bu eksen üzerinden simetri işlemi uygulanacaktır. Bu işlemin uygulamak için aşağıdaki komut kullanılır.

[ Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Symmetry B.C.> On Lines] (Şekil 4.23 )





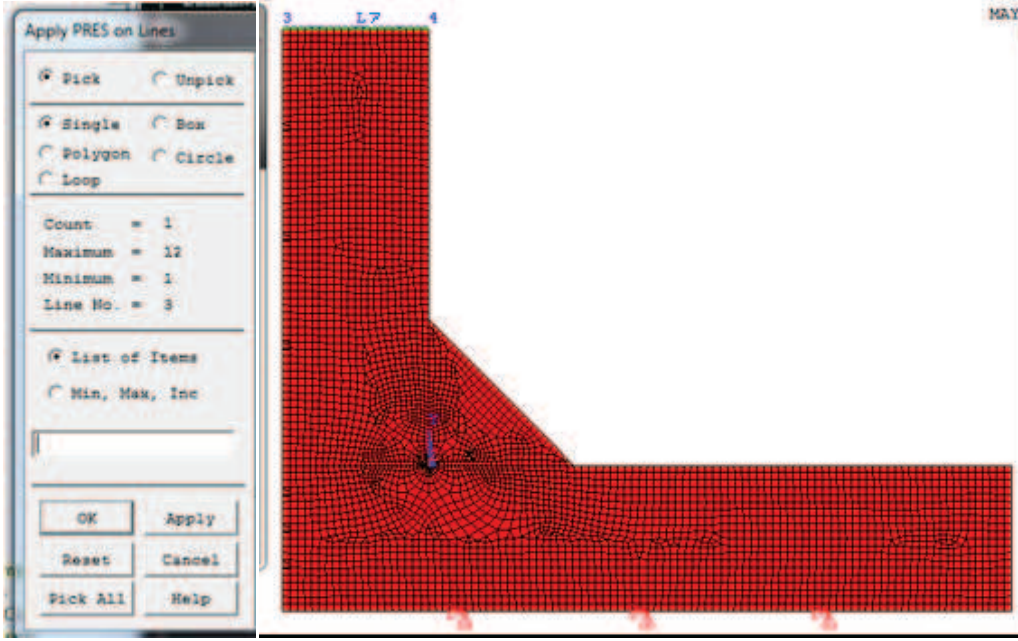
Şekil 4.23. Sabitleme ve simetri alma işlemlerinden sonra modelin son durumu

L4 ve L6 çizgileri seçilerek y-y eksenine göre modelin simetriği alınmış olur.

#### 4.9.3. Kuvvetin uygulanması

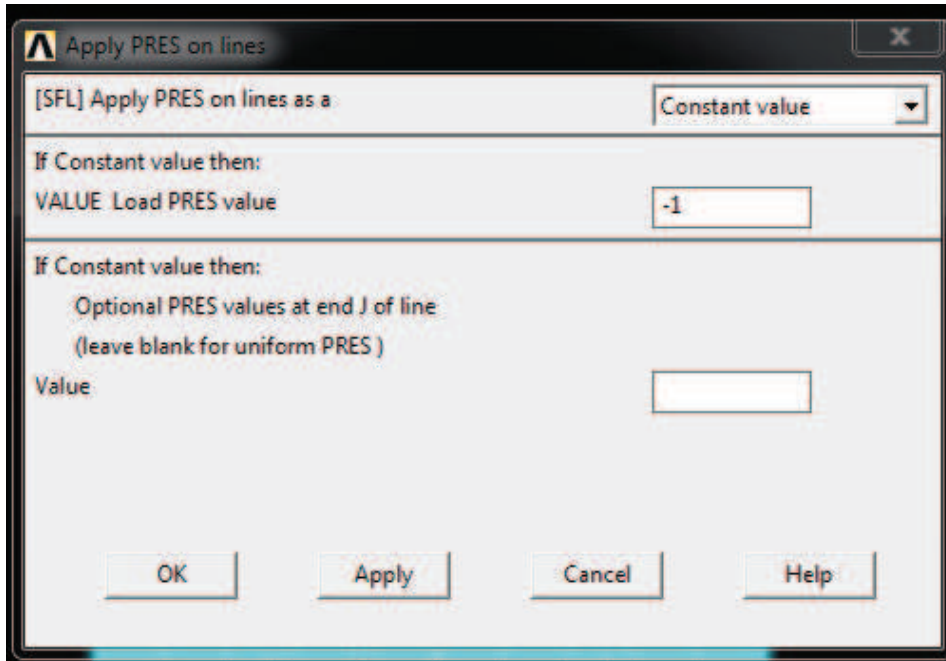
Yapılacak olan analizde modelin en üst noktasından 1 MPa 'lık çekme yükü uygulanacaktır. Bunu program aracılığı ile modele aktarmak için aşağıdaki komut yolu kullanılır.

[ Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Pressure> On Lines],  
L7 çizgisi seçilir ve "OK" butonu tıklanır. ( Şekil 4.22. )



Şekil 4.24. Üst Parçada Çekme Oluşturma

“OK” butonu tıklandıktan sonra açılan pencerede “VALUE Load PRES value” kısmına -1 değeri girilir. Pressure (Basma) , sekmesinde çalıştığımız için çekme uygularken (-) değer vermemiz gerekir. ( Şekil 4.25.)

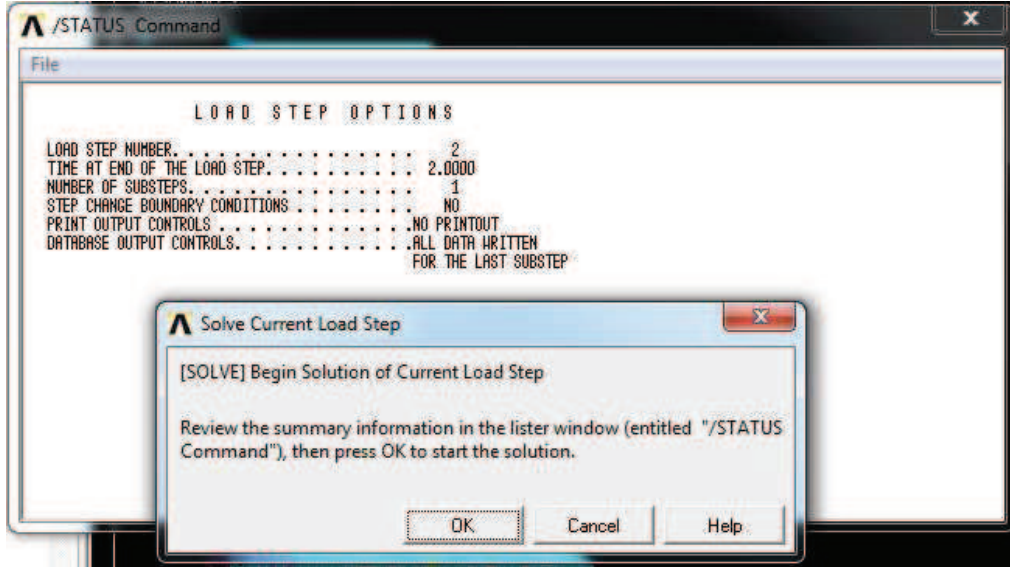


Şekil 4.25. Çekme yükü değerinin girilmesi

#### 4.10. Analizin Çözümünün Başlatılması

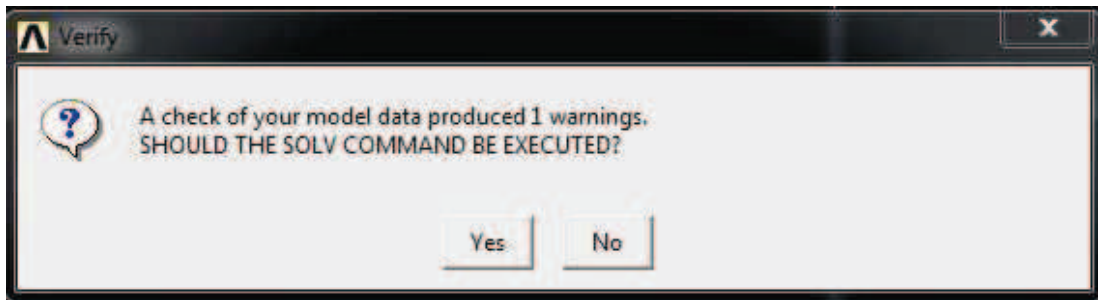
Analize ait tüm veriler girildikten sonra son işlem olarak çözümleme işlemi yapılır. Bu, aşağıdaki komut kullanılarak gerçekleştirilir.

[ Main Menu> Solution> Solve> Current Ls] ( Şekil 4.26 )



Şekil 4.26. Analizin Çözümü

Komutun çalıştırılmasından sonra çıkan doğrulama penceresinde “OK” butonu tıklanır ve analiz çözülür.



Şekil 4.27. Analiz Sonrası Uyarı

Bu esnada açılan uyarı ve bilgilendirme pencereleri göz ardı edilip “Yes” seçilir.

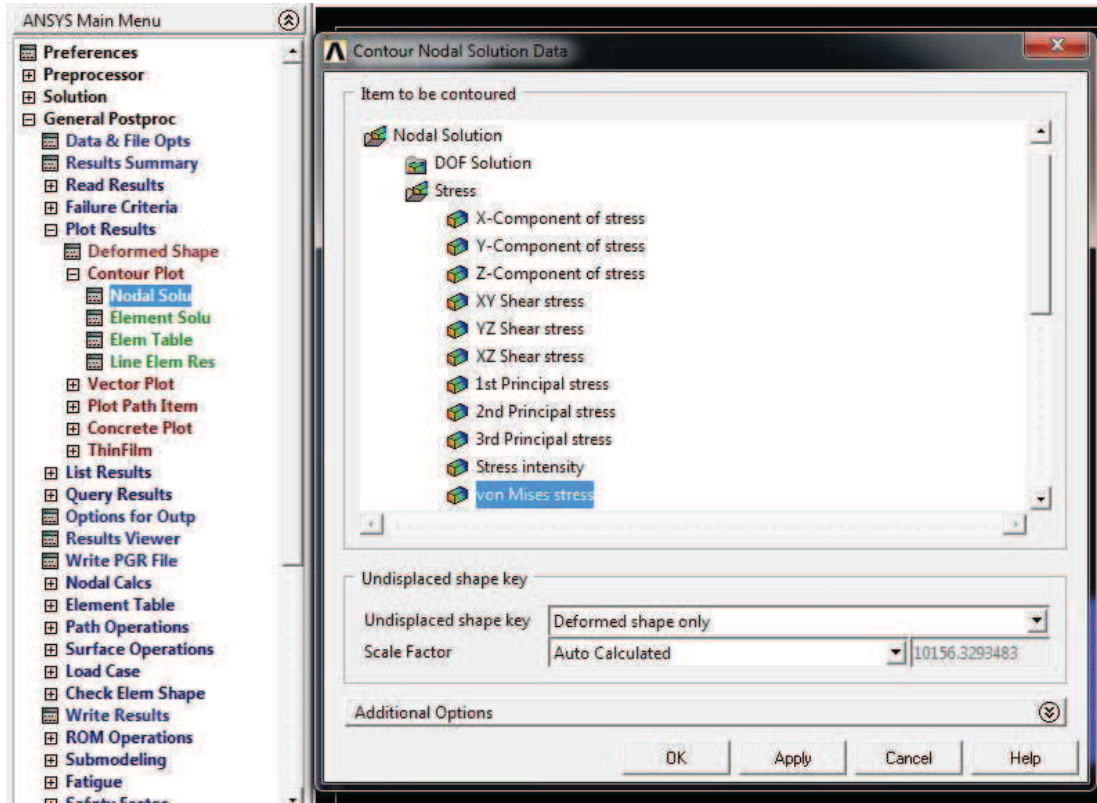
#### 4.11.Sonuçların İncelenmesi

Çözümü yapılan problemin analiz sonuçları gerilme veya deformasyon olarak aşağıdaki komutlar yardımıyla incelenebilir.

Model üzerindeki gerilmeleri görmek için;

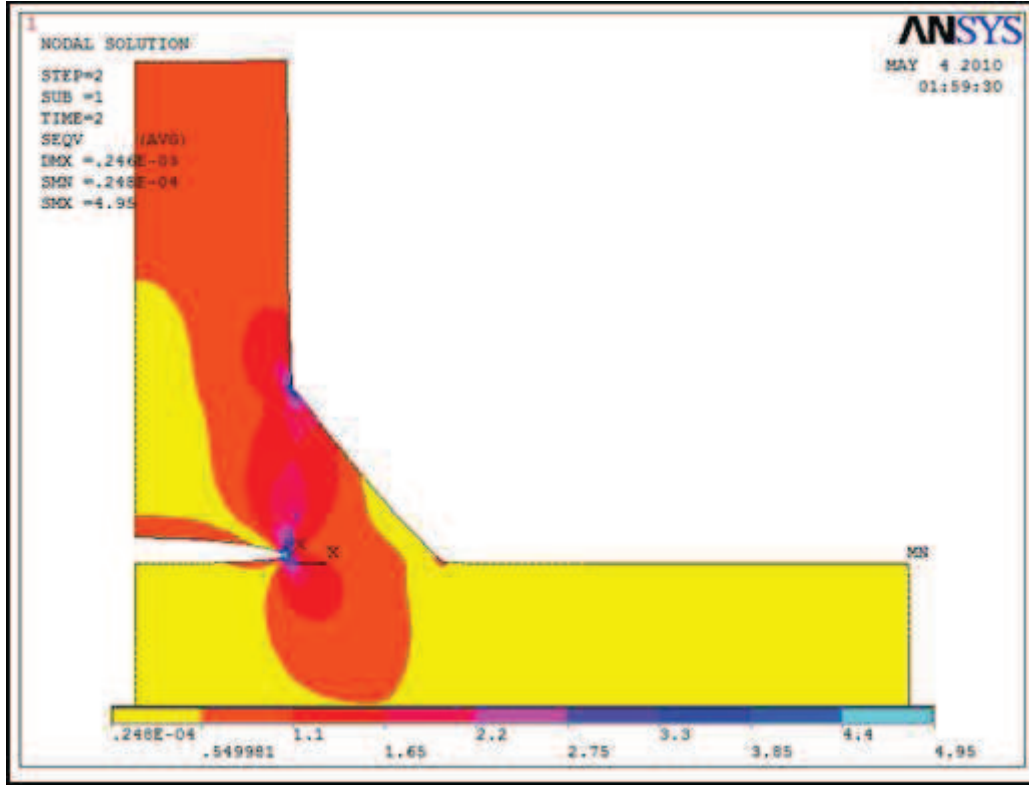
[General PostProc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu]

komutuyla açılan pencereden istenilen gerilme kuramına göre modelde oluşan gerilmeler görülür.



Şekil 4.28. Gerilme Tipi Gösterimi Seçimi

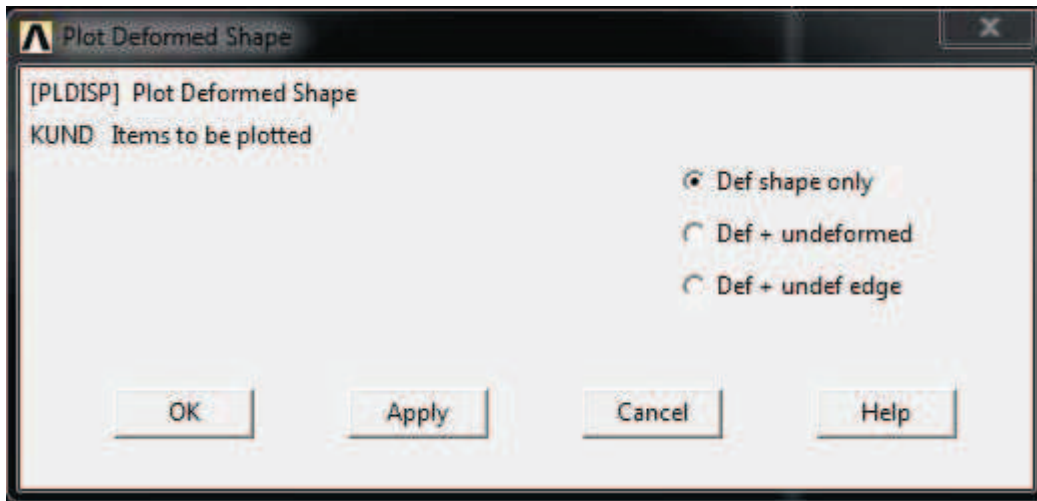
Von Mises kuramına göre oluşan gerilmeyi göstermesi için Şekil 4.28' deki yolu takip ederiz.



Şekil 4.29. Von Mises kuramına göre oluşan gerilmenin gösterimi.

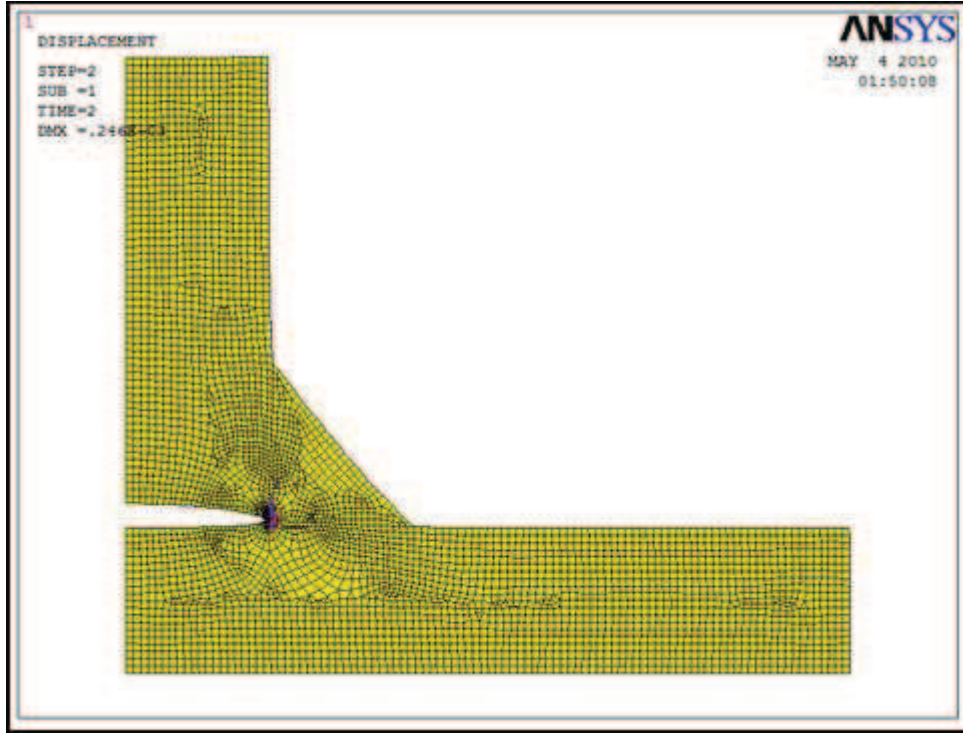
Model üzerindeki deformasyonları görmek için ise,

[ Main Menu> General Postproc> Plot results> Deformed Shape] komutu kullanılır.



Şekil 4.30. Deformasyon Gösterimi Seçimi

Def shape only sekmesi seçildikten sonra modelde oluşan deformasyon ve çatlak oluşumu gözükmemektedir.



Şekil 4.31. Oluşan Deformasyon

## 4.12. Gerilme Şiddet Faktörünün (K) Hesaplanması

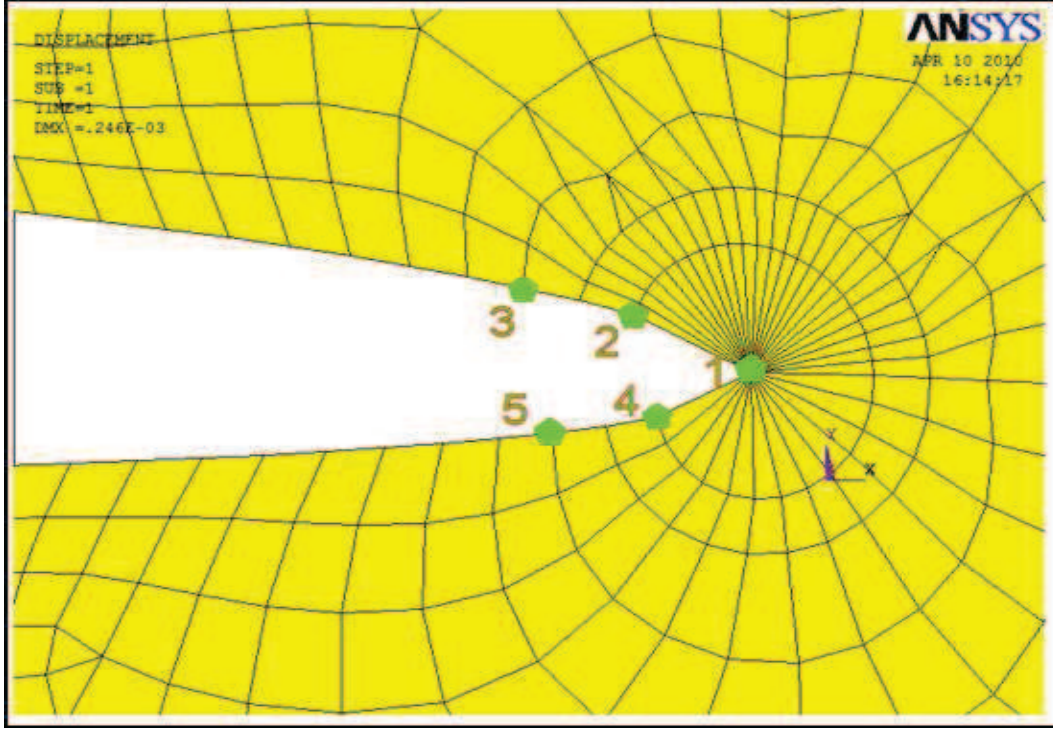
### 4.12.1. K İçin yörünge tanımlanması

K, gerilme şiddet faktörünü belirlerken çatlak yüzeyinde yörünge saptaması yapılır. Çatlak merkezinden uç kısma doğru node yani nokta seçimi yapılarak, çatlak yüzeyi tanımlanır. Bu tanımlamayı yapmak için aşağıdaki komut kullanılır.

[Main Menu> General Postproc> Path Operation > Define Path> By Nodes]

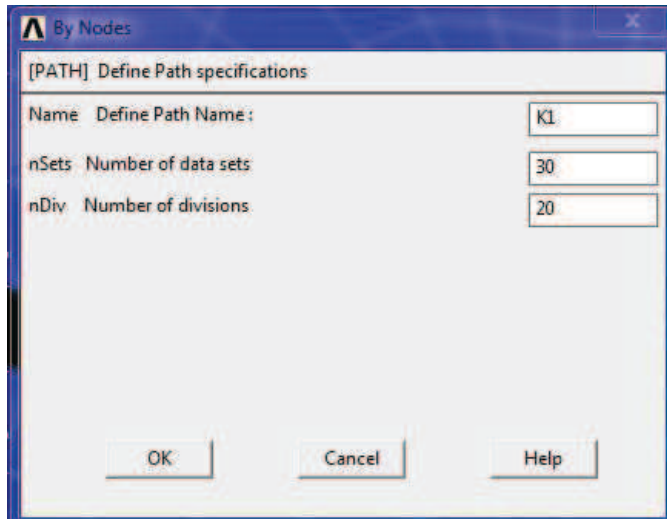
Komutu uygulandıktan sonra çatlak bölgesine zoom yaparak 5 tane node seçeriz. (Şekil 4.32)





Şekil 4.32. Node Seçimi

Yukarıdaki düğümleri şekildeki numara sırasına göre tıklanması gerekir (yani tıklama 1, 2, 3, 4, 5 sırasına göre olmalıdır. Düğümlerin kendine ait numaralarının önemi yoktur). Her hangi bir path (yörünge) ismi tanımlanır ve OK tıklanır. Bu çalışmada K1 yazılmıştır. (Şekil 4.33 )

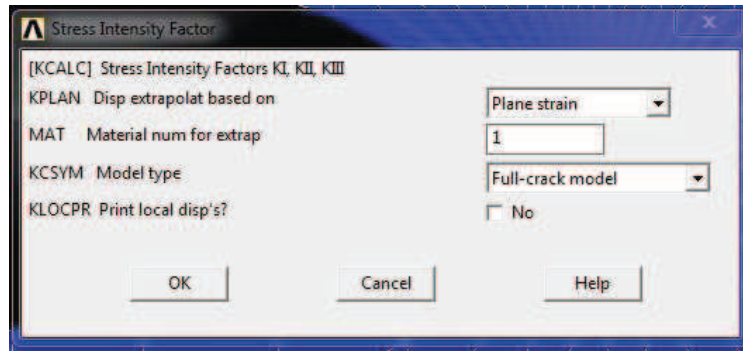


Şekil 4.33. K değerine İsim Tanımlama

#### 4.12.2. K Değerinin Hesaplanması

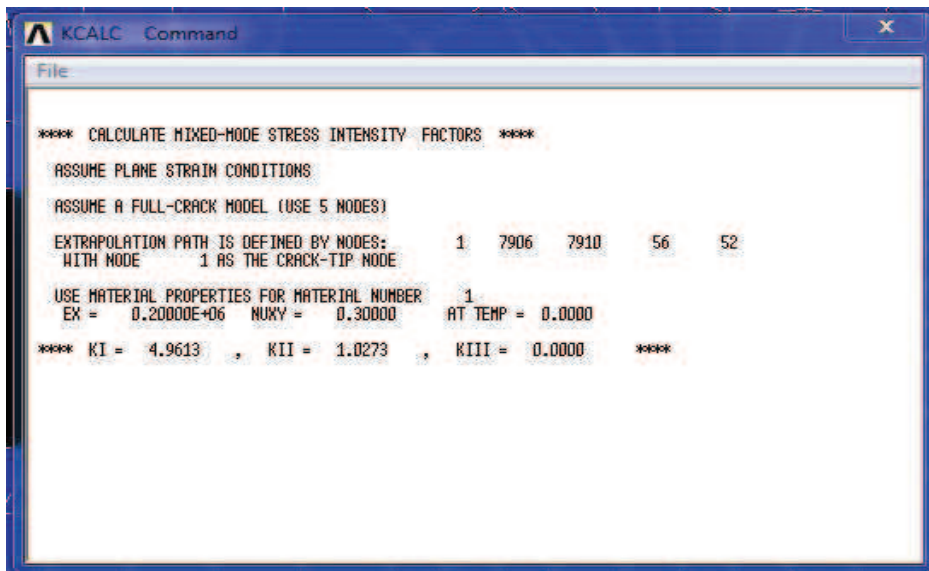
Yörünge tanımlaması yaptıktan sonra sıradaki işlem K yani gerilme şiddet faktörünün bulunmasıdır. Bu işlem için aşağıdaki komut sırası takip edilir.

[Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Stress Int Factr] (Şekil 4.34)



Şekil 4.34. Plane Strain Seçimi

Açılan penceredeki ilk satırda bulunan değer “Plane strain”, üçüncü satırdaki değer yani model tipi “Full-crack model” olarak değiştirilir ve OK butonu tıklanır. Karşımıza çıkan pencerede , ve değerleri hesaplanmış olarak gösterilmiştir. Buradaki en kritik K değeri genelde ’dir.



Şekil 4.35. Çözüm Sonrası Bulunan K ( Gerilme Şiddet Faktörü )değerleri

- K1 değeri çekme durumunda oluşan gerilme şiddet faktörüdür.
- K2 değeri kayma durumunda oluşan gerilme şiddet faktörüdür
- K3 değeri ise burulma durumu için gerilme şiddet faktörüdür, bu çalışmada sadece çekme durumu incelenmiştir. Bu nedenle K3 değeri “0” olmaktadır.



## BÖLÜM 5. ÇATLAK İLERLEME DOĞRULTUSU

Gerilme etkisi altında bulunan bir çatlakın ilerleme yönünün belirlenmesi konusunda farklı teoriler önerilmiştir.

Çatlak yönlenmesi ve dallanması kırılmanın ilgi çeken özelliklerinden biridir. Yükteki veya malzeme özelliğindeki değişimler bu tür bir oluşumlardan olabilir.

Çatlak doğrultusunun belirlenmesi konusunda bir çok yaklaşım olmakla birlikte maksimum gerilme, maksimum genleme enerji yoğunluğu ve maksimum genleme enerji salıverme oranı gibi teoriler bu konuda önde gelenlerdir. Bu teorilerden bazıları aynı sonucu vermekle birlikte bazıları da sayısal olarak birbirine yakın sonuçlar vermektedir.

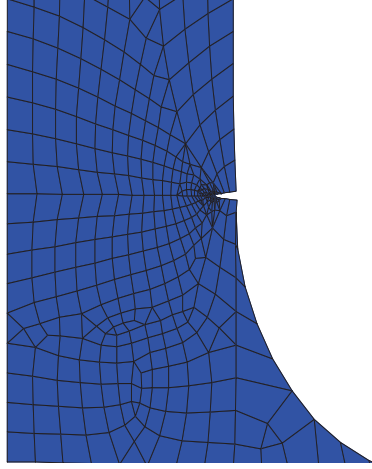
Üzerinde çalıştığımız modelin  $L/X = 0.25$ , ve, 1 mm değerleri için  $R=10$  mm iken içbükey model üzerinde şekilde gösterildiği gibi 1mm bir çatlak verilmiş bu çatlakın doğrultusu bulunmuştur. Her adımda  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerleri aşağıdaki denklemde;

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\left( \frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \right]$$

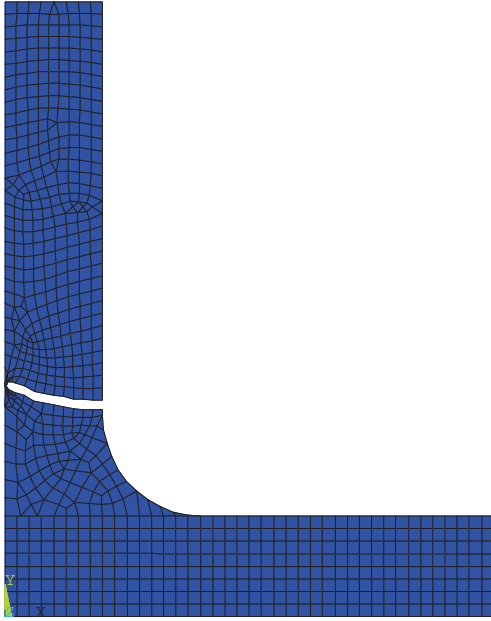
yerine koyularak yayılma açısı hesaplanmış daha sonra o açı yönünde 1mm çatlak daha ilave edilmiştir. 10 adım sonunda kesitin neresine geleceği görülmüştür. Kaynak ağzı açılmasının çatlakın ilerlemesine nasıl bir etki yaptığı araştırılmıştır. Günümüze kadar yapılan çalışmalar Lineer elastik kırılma mekaniği şartları altında çatlak ucundaki gerilme dağılımından ve deplasman değerlerinden yola çıkılarak çatlakın yayılma doğrultusunun tespit edilebileceği saptanmıştır.

Çatlak boyundaki artış ile birlikte  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddeti faktörleri de değişmektedir. Her 2 model için çatlak aynı yönde ilerlemiştir ama kaynak ağzı

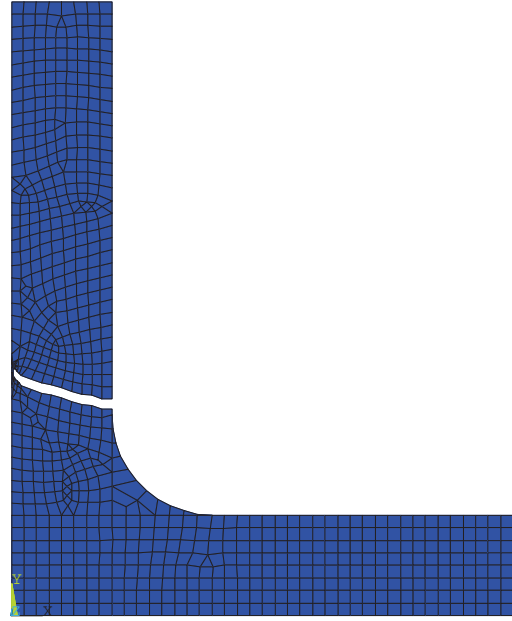
açılmasıyla birlikte GŞF lerin düşmesi ilk adımlarda daha ufak açılarda elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil.5.1. Çatlak başlangıcı



Şekil 5.2.  $X/L=0.25$  çatlak ilerlemesi



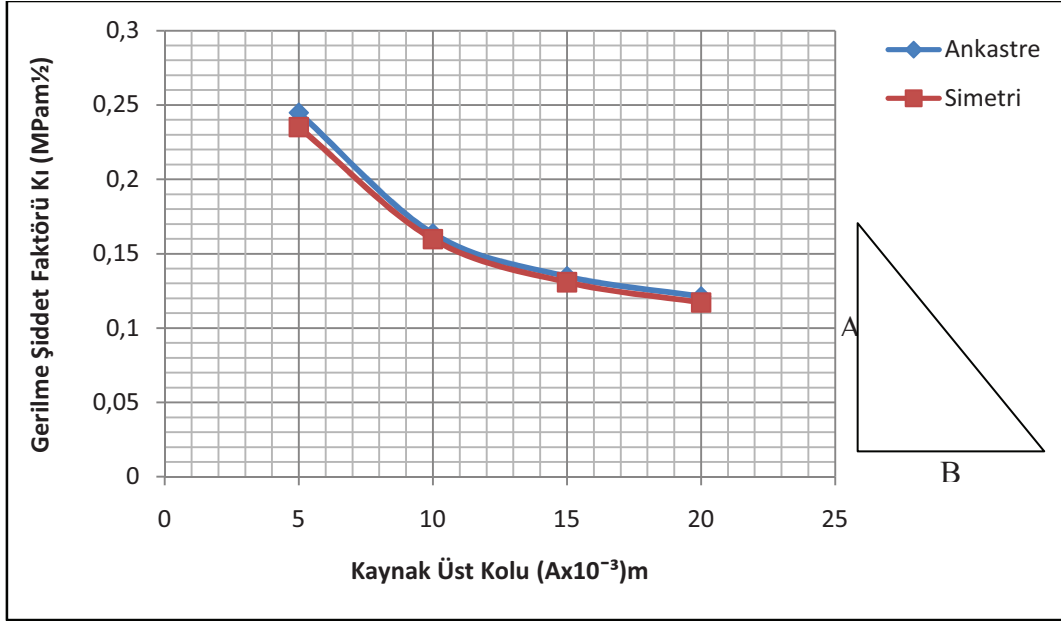
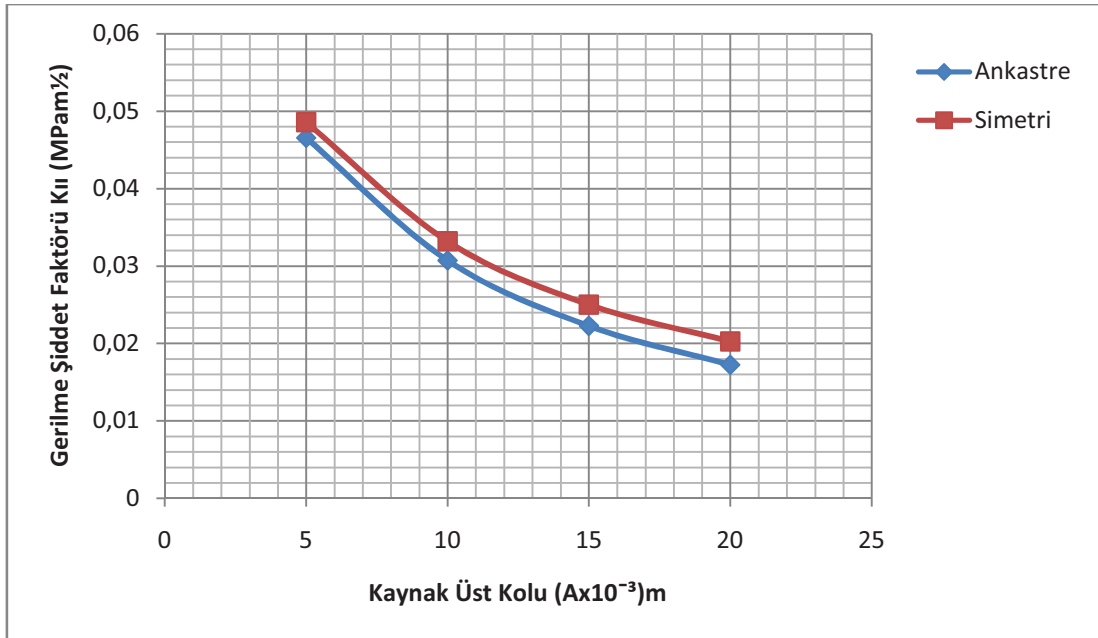
Şekil 5.3.  $X/L=1$  çatlak ilerlemesi

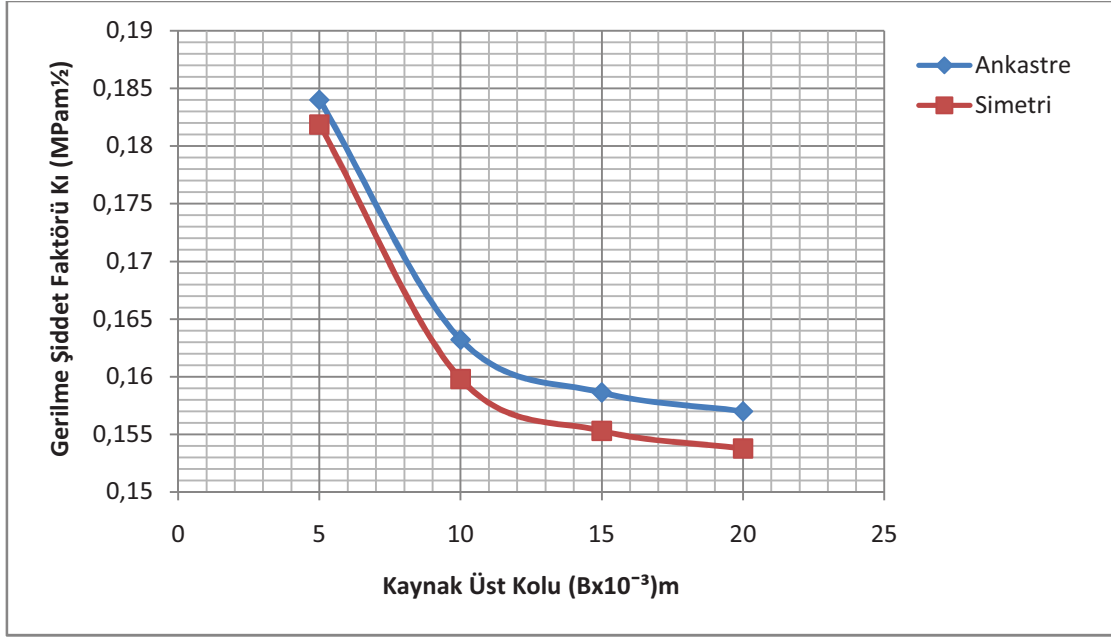
## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu bölümde kaynak kökündeki gerilme şiddet faktörleri değerlerinin yapılan konstrüktif değişikliklere bağlı GŞF  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerleri tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Grafikler ilk önce  $K_I$  değerleri için sonra  $K_{II}$  değerleri için sıralanmıştır. Yapılan analizler sonucunda varılan sonuçlar ve yorumları, grafiklerden sonra verilmiştir.

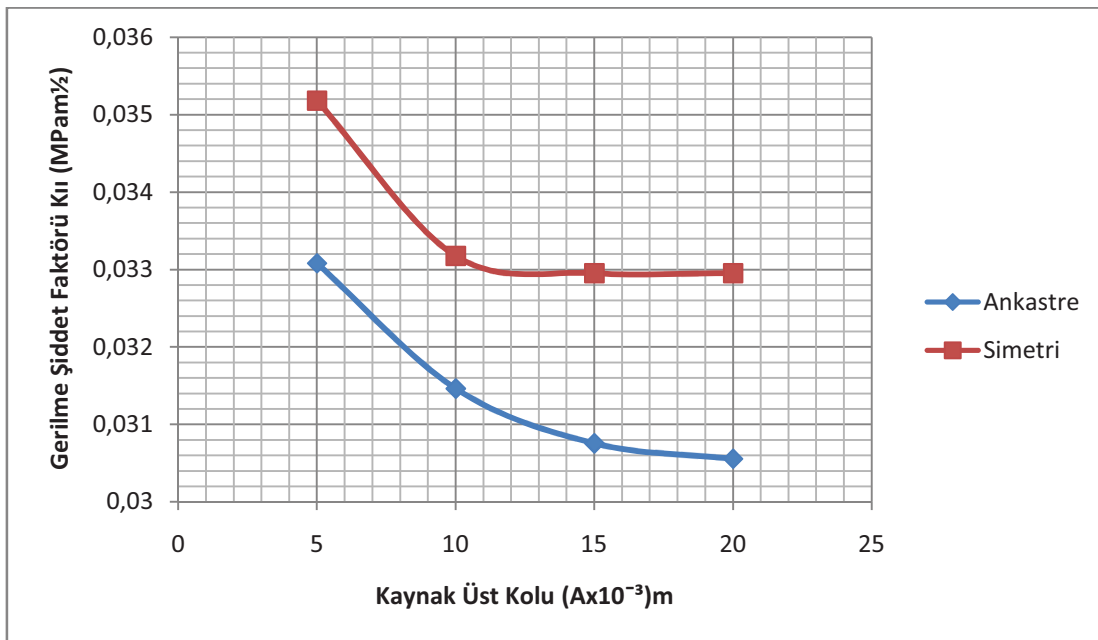
Tablo 6.1. Ankastr ve Simetrik, alt ve üst kol uzunluk değişimi ile Düz Tip Kaynak Formunda Analiz Sonucu Bulunan K değerleri

ANKASTRE					SİMETRİ				
Kaynak üst kolu $A(m) \times 10^{-3}$	Kaynak Alt kolu $B(m) \times 10^{-3}$	$L(m) \times 10^{-3}$	$K_I$	$K_{II}$	Kaynak üst kolu $A(m) \times 10^{-3}$	Kaynak Alt kolu $B(m) \times 10^{-3}$	$L(m) \times 10^{-3}$	$K_I$	$K_{II}$
5	10	10	0,24479	0,046542	5	10	10	0,2351	0,04855
10	10	10	0,16361	0,03071	10	10	10	0,1597	0,03317
15	10	10	0,13464	0,022252	15	10	10	0,1308	0,025
20	10	10	0,12120	0,017223	20	10	10	0,1172	0,02024
10	5	10	0,18399	0,033077	10	5	10	0,1818	0,03518
10	10	10	0,16320	0,031461	10	10	10	0,1597	0,03317
10	15	10	0,15861	0,030755	10	15	10	0,1553	0,03295
10	20	10	0,15699	0,030555	10	20	10	0,1537	0,03295

Şekil 6.1. Kaynak üst kolu için K<sub>I</sub> değişimiŞekil 6.2. Kaynak üst kolu için K<sub>II</sub> değişimi



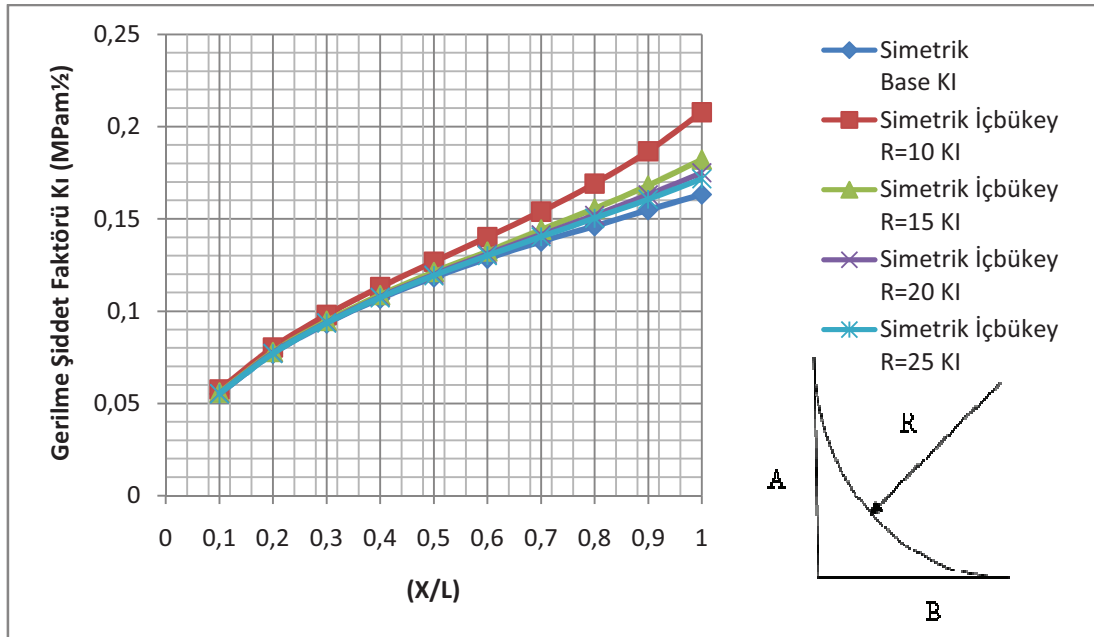
Şekil 6.3. Kaynak alt kolu için  $K_I$  değişimi



Şekil 6.4. Kaynak alt kolu için  $K_{II}$  değişimi

Tablo 6.2.Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_I$  değerleri

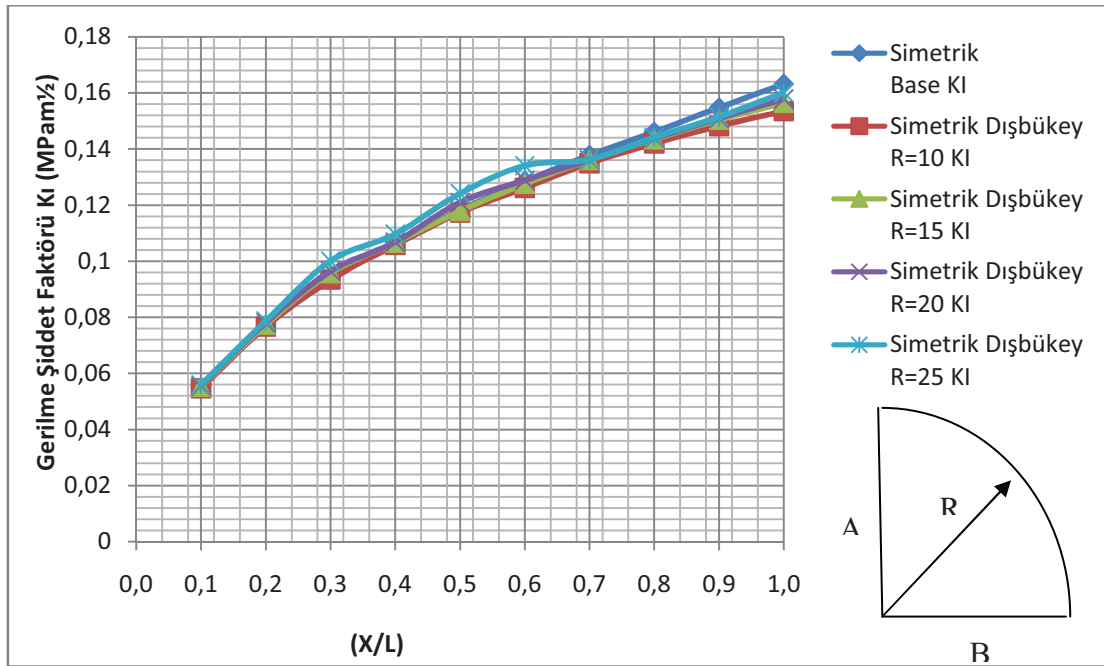
$(X/L \times 10^{-3})$ m	Simetrik Base $K_I$	Simetrik İçbükey R=10 $K_I$	Simetrik İçbükey R=15 $K_I$	Simetrik İçbükey R=20 $K_I$	Simetrik İçbükey R=25 $K_I$
0,1	0,05518	0,0576	0,05577	0,05540	0,055265
0,2	0,07694	0,080342	0,07785	0,07730	0,07709
0,3	0,0933	0,097955	0,09466	0,09391	0,09361
0,4	0,10676	0,113032	0,10875	0,10774	0,107326
0,5	0,1183	0,126816	0,12125	0,11987	0,119287
0,6	0,12848	0,140165	0,13231	0,13091	0,130087
0,7	0,13772	0,153955	0,14408	0,14144	0,140287
0,8	0,14608	0,169084	0,15563	0,15196	0,150316
0,9	0,1548	0,1866	0,16812	0,16299	0,160645
1	0,16321	0,2078	0,18215	0,17504	0,171723



Şekil 6.5. Simetrik içbükeylikte  $K_I$  değişimi

Tablo 6.3. Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_I$  değerleri

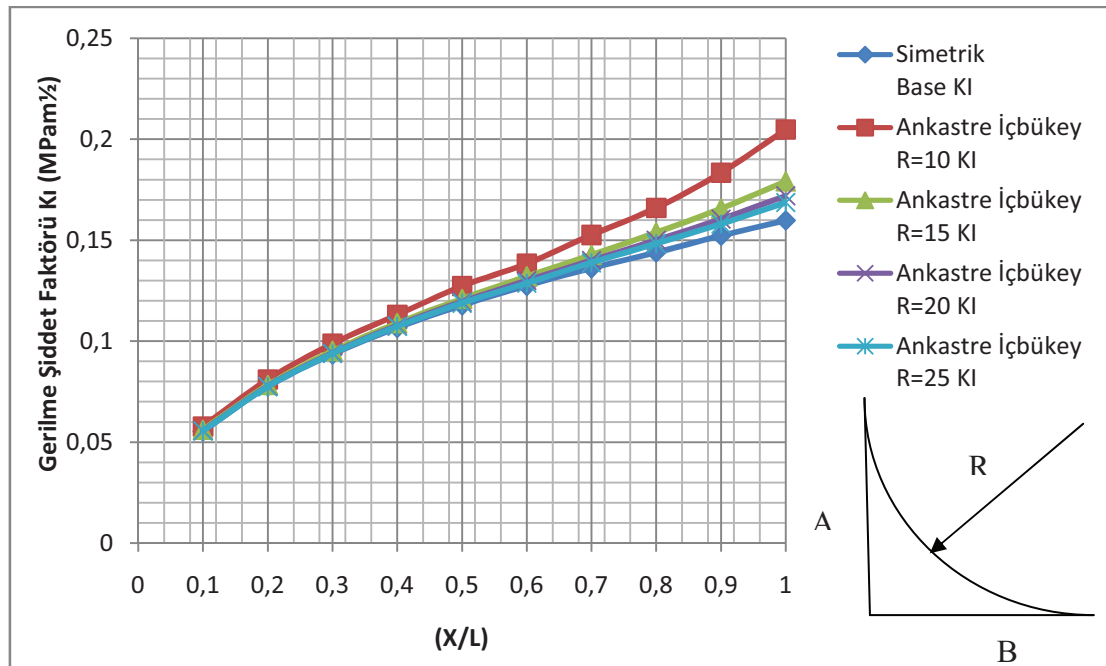
$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Simetrik Base $K_I$	Simetrik Dışbükey R=10 $K_I$	Simetrik Dışbükey R=15 $K_I$	Simetrik Dışbükey R=20 $K_I$	Simetrik Dışbükey R=25 $K_I$
0,1	0,055184	0,0547	0,0553	0,055568	0,05601
0,2	0,076939	0,076758	0,077368	0,078045	0,078761
0,3	0,093303	0,093523	0,095832	0,096458	0,10009
0,4	0,106765	0,105874	0,106619	0,106806	0,109719
0,5	0,118297	0,117342	0,117874	0,121039	0,124245
0,6	0,128477	0,126168	0,127571	0,128861	0,134065
0,7	0,137719	0,13499	0,1361	0,136184	0,136329
0,8	0,146081	0,142048	0,143519	0,143829	0,144187
0,9	0,154803	0,148223	0,150429	0,150984	0,151432
1,0	0,163206	0,153516	0,156497	0,157842	0,160148



Şekil 6.6. Simetrik dışbükeylikte  $K_I$  değişimi

Tablo 6.4. Ankastre, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_I$  değerleri

$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Simetrik Base $K_I$	Ankastre İçbükey R=10 $K_I$	Ankastre İçbükey R=15 $K_I$	Ankastre İçbükey R=20 $K_I$	Ankastre İçbükey R=25 $K_I$
0,1	0,055445	0,057726	0,056181	0,055758	0,05559
0,2	0,077635	0,081055	0,078361	0,077735	0,077487
0,3	0,093484	0,098848	0,095081	0,094242	0,093903
0,4	0,106652	0,113081	0,108906	0,107797	0,107342
0,5	0,117777	0,127316	0,120981	0,119516	0,118877
0,6	0,127429	0,138387	0,132035	0,130042	0,128755
0,7	0,136142	0,152619	0,142758	0,140032	0,138835
0,8	0,143965	0,166061	0,153758	0,150013	0,148326
0,9	0,152203	0,183458	0,165697	0,160513	0,158129
1	0,159794	0,20481	0,1792	0,172048	0,16871

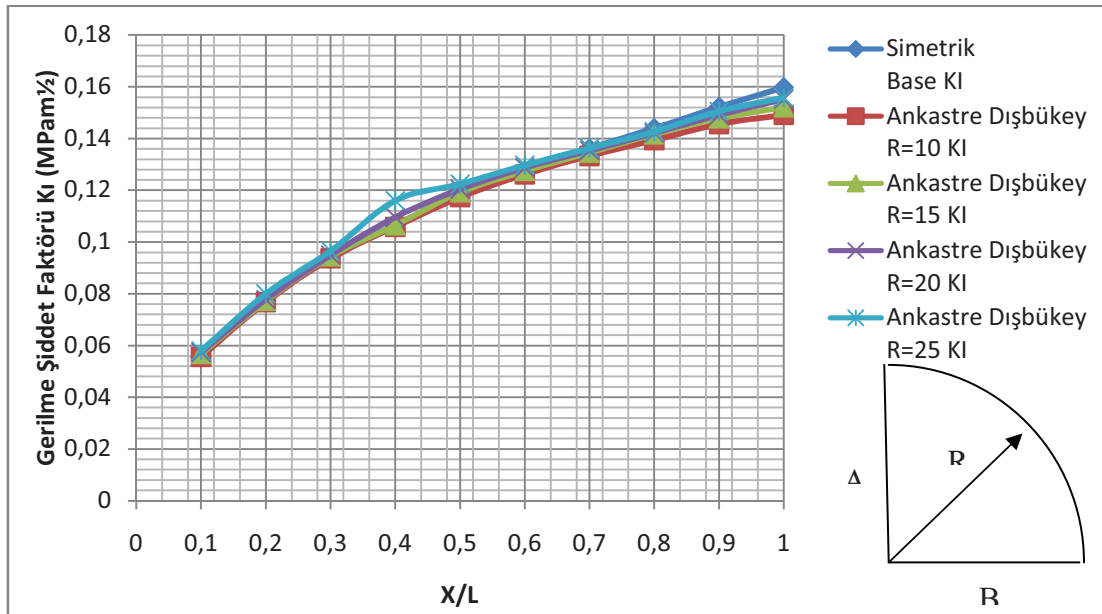


Şekil 6.7. Ankastre içbükeylikte  $K_I$  değişimi



Tablo 6.5. Ankastre Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_1$  değerleri

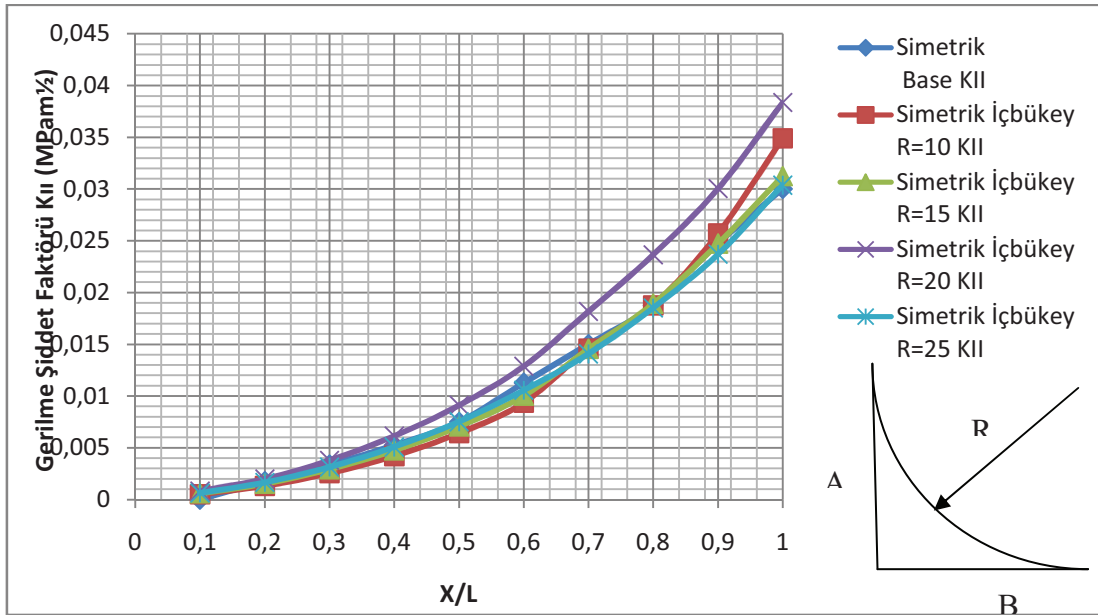
$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Simetrik Base $K_1$	Ankastre Dışbükey R=10 $K_1$	Ankastre Dışbükey R=15 $K_1$	Ankastre Dışbükey R=20 $K_1$	Ankastre Dışbükey R=25 $K_1$
0,1	0,055445	0,055584	0,056768	0,057345	0,057955
0,2	0,077635	0,076758	0,077252	0,077803	0,080016
0,3	0,093484	0,093697	0,09441	0,094952	0,096558
0,4	0,106652	0,105871	0,106435	0,109568	0,116006
0,5	0,117777	0,117342	0,119203	0,120432	0,122384
0,6	0,127429	0,126165	0,127413	0,128716	0,129726
0,7	0,136142	0,133223	0,134516	0,135365	0,13629
0,8	0,143965	0,139397	0,141552	0,142058	0,142645
0,9	0,152203	0,145574	0,147703	0,149074	0,150523
1	0,159794	0,149103	0,1521	0,155213	0,155774



Şekil 6.8. Ankastre dışbükeylikte  $K_1$  değişimi

Tablo 6.6. Simetrik, Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_{II}$  değerleri

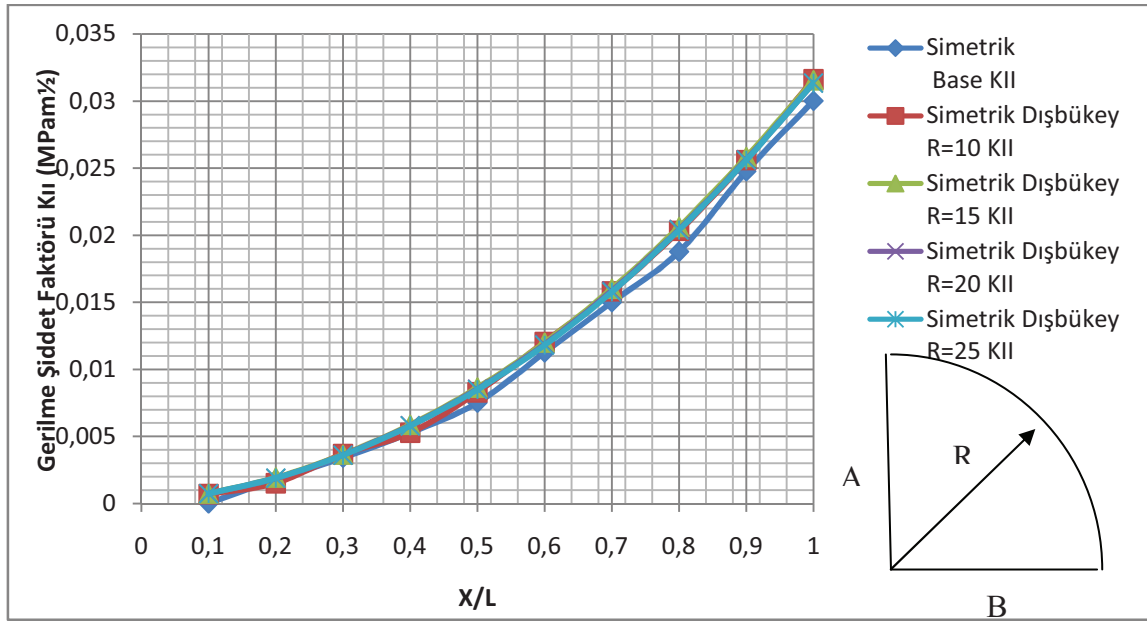
$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Simetrik Base $K_{II}$	Simetrik İçbükey $R=10$ $K_{II}$	Simetrik İçbükey $R=15$ $K_{II}$	Simetrik İçbükey $R=20$ $K_{II}$	Simetrik İçbükey $R=25$ $K_{II}$
0,1	0,000006	0,000523	0,000619	0,000823	0,000645
0,2	0,001787	0,001326	0,001526	0,001994	0,001652
0,3	0,0034	0,002548	0,002916	0,0038	0,003145
0,4	0,005255	0,00421	0,004732	0,006145	0,005081
0,5	0,007506	0,006413	0,007058	0,009123	0,007523
0,6	0,011258	0,009365	0,010032	0,012877	0,010574
0,7	0,01501	0,014587	0,014539	0,018174	0,014074
0,8	0,018765	0,018755	0,0189	0,023655	0,018516
0,9	0,024768	0,025703	0,024713	0,030045	0,023703
1	0,030023	0,034894	0,031255	0,038358	0,030368



Şekil 6.9. Simetrik içbükeylikte  $K_{II}$  değişimi

Tablo 6.7. Simetri, Düz ve Dış bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_{II}$  değerleri

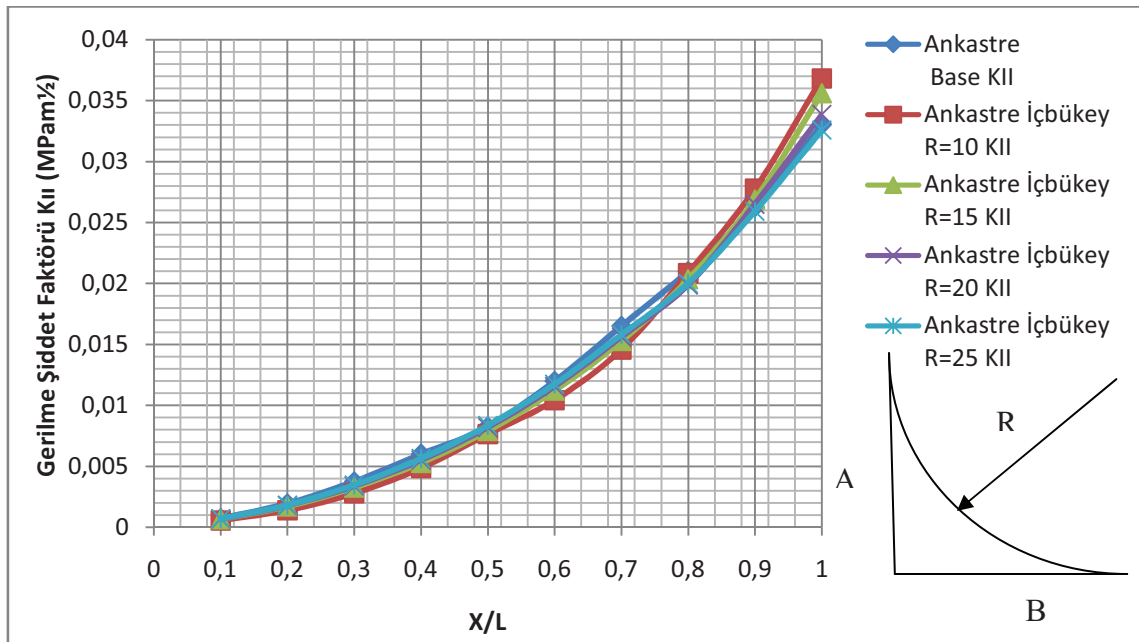
$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Simetrik Base $K_{II}$	Simetrik Dışbükey R=10 $K_{II}$	Simetrik Dışbükey R=15 $K_{II}$	Simetrik Dışbükey R=20 $K_{II}$	Simetrik Dışbükey R=25 $K_{II}$
0,1	0,000006	0,0007	0,000739	0,000732	0,000729
0,2	0,001787	0,001506	0,001913	0,001884	0,00189
0,3	0,0034	0,00369	0,003648	0,00361	0,003594
0,4	0,005255	0,005271	0,005871	0,005803	0,005777
0,5	0,007506	0,008284	0,008623	0,008526	0,00849
0,6	0,011258	0,012048	0,01199	0,011865	0,011813
0,7	0,01501	0,015813	0,01601	0,015852	0,015768
0,8	0,018765	0,020332	0,020619	0,020442	0,020384
0,9	0,024768	0,025603	0,025845	0,025642	0,025594
1	0,030023	0,031626	0,031532	0,031355	0,031339



Şekil 6.10. Simetrik dışbükeylikte  $K_{II}$  değişimi

Tablo 6.8. Ankastre Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_{II}$  değerleri

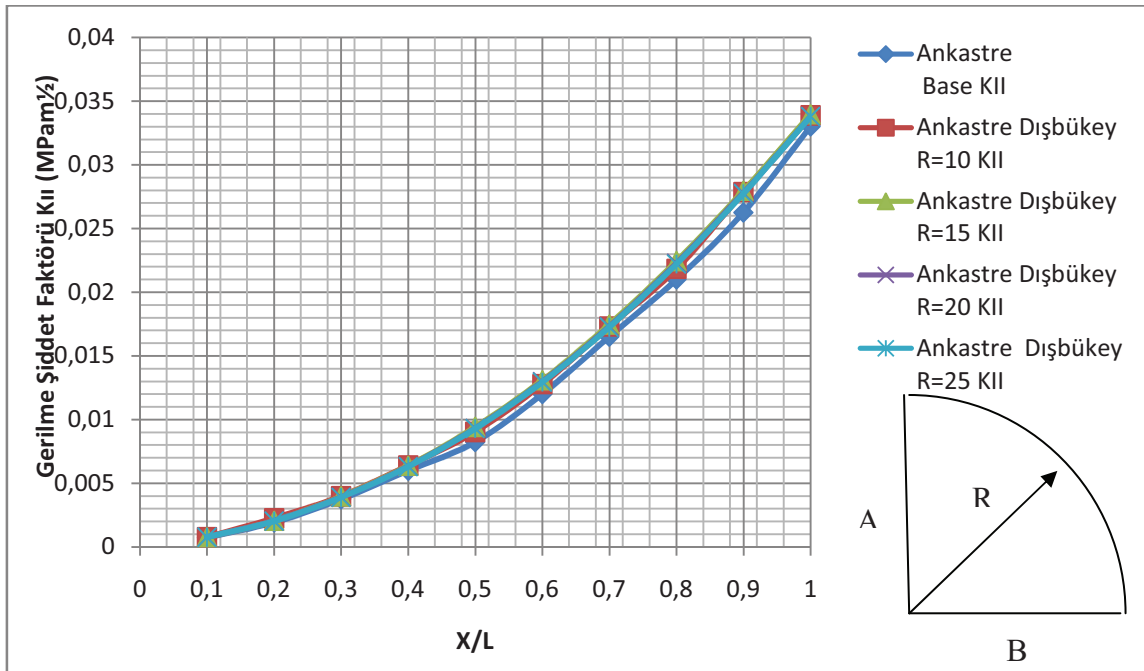
$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Ankastre Base $K_{II}$	Ankastre İçbükey R=10 $K_{II}$	Ankastre İçbükey R=15 $K_{II}$	Ankastre İçbükey R=20 $K_{II}$	Ankastre İçbükey R=25 $K_{II}$
0,1	0,000735	0,000555	0,000652	0,000677	0,000694
0,2	0,001948	0,00139	0,00169	0,001774	0,001816
0,3	0,003752	0,002777	0,003245	0,003394	0,003474
0,4	0,006003	0,004861	0,005287	0,005513	0,005632
0,5	0,008255	0,007642	0,007897	0,008194	0,008355
0,6	0,01201	0,010419	0,011203	0,011548	0,011732
0,7	0,016513	0,014587	0,015271	0,015623	0,015813
0,8	0,021016	0,020842	0,020352	0,019884	0,019997
0,9	0,026268	0,027787	0,026894	0,026513	0,025923
1	0,033023	0,036819	0,035616	0,033877	0,03259



Şekil 6.11. Ankastre içbükeylikte  $K_{II}$  değişimi

Tablo 6.9. Ankastre Düz ve İç bükey Tip Kaynak Formu Üzerinden Analiz Sonucu Bulunan  $K_{II}$  değerleri

$[X/L \times 10^{-3}]$ m	Ankastre Base $K_{II}$	Ankastre Dışbükey R=10 $K_{II}$	Ankastre Dışbükey R=15 $K_{II}$	Ankastre Dışbükey R=20 $K_{II}$	Ankastre Dışbükey R=25 $K_{II}$
0,1	0,000735	0,00079	0,000784	0,000777	0,000774
0,2	0,001948	0,002258	0,002074	0,002055	0,002045
0,3	0,003752	0,00399	0,003961	0,003926	0,00391
0,4	0,006003	0,0064	0,006394	0,006332	0,00631
0,5	0,008255	0,009035	0,009419	0,009332	0,009297
0,6	0,01201	0,0128	0,013103	0,012987	0,012945
0,7	0,016513	0,017319	0,017471	0,017323	0,017252
0,8	0,021016	0,021835	0,022426	0,022287	0,02221
0,9	0,026268	0,027861	0,027971	0,027787	0,027748
1	0,033023	0,033884	0,033968	0,033803	0,033803

Şekil 6.12. Ankastre dışbükeylikte  $K_{II}$  değişimi

## 6.1.Yorumlar

Bu çalışmada iki çelik düzlemsel yapı üç farklı kaynak formu dikkate alınarak, her bir kaynak formu için kaynak ağzı boyutu değiştirilmek suretiyle iç bükey ve dış bükey kaynak formlarına 10,15,20,25 mm ölçülerinde eğrilik yarıçapı vererek, alt ve üst kaynak kollarının ölçülerinin 5,10,15,20 mm ölçüleri verilerek ayrı ayrı kaynak modeli oluşturulmuş ve ANSYS'de analize tabi tutulmuştur. Her bir kaynak formu için 10 analiz modeli olmak üzere toplam 186 ayrı analiz modeli üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Grafik ve tablolarda görüldüğü gibi kaynak ağzı boyutuna bağlı olarak gerilme şiddet faktörü(GŞF) değişmektedir. Kaynak kökündeki GŞF; Kaynak ağzı açılması ile azaltılmıştır. X/L değerinin küçülmesi yani çatlak boyunun kısılması ankastre ve simetrik sınır şartları için bulunan değerler, birbirine yaklaşmaktadır. Kaynak ağzı boyutu büyüdükçe gerilme şiddet faktörü azalmaktadır. Kaynak ağzı boyutu büyüdükçe, malzeme daha iyi nüfuziyet sağlandığından, gerilme şiddet faktörü değeri azalmakta ve dolayısıyla çatlak oluşma ihtimali azalmaktadır.

Kaynak alt ve üst kollarından biri sabitken diğerinin büyümesi GŞF değerlerini düşürmüştür. Kaynak kollarının uzun tutulması kaynak kökündeki GŞF değerlerini önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır.

Her bir kaynak formuna ve kaynak ağzı boyutuna göre elde ettiğimiz K değerlerinden yola çıkarak, kaynak ağzı boyutu büyüdükçe her üç durumunda da gerilme şiddet faktörlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak kaynak formu da gerilme şiddet faktörü değerlerini doğrudan etkilemektedir. Düz, İçbükey ve Dışbükey kaynak formlarını karşılaştırdığımızda, içbükey köşe kaynağında kuvvet çizgileri çatlak ucuna daha yakın olduğu için GŞF büyürken, dışbükey köşe kaynağında çatlak ucundan uzaklaştığı için GŞF'leri azalmaktadır. Aynı eğrilik yarıçapları için iç bükeylik dış bükeyliğe göre daha büyük değişimlere sebep olmaktadır. İçbükey ve dışbükey köşe kaynak yapılması  $K_I$  değeri üzerinde daha etkilidir.  $K_{II}$  de büyük değişimlere neden olmamaktadır. Kaynak kolları sabitken içbükey köşe kaynağında eğrilik yarıçapının artması GŞF azaltmıştır. Dışbükey köşe kaynağında eğrilik yarıçapının artması GŞF değerlerini artırmıştır.

Gerilme şiddet faktörünün yüksek olması parçanın kırılmaya karşı hassasiyetinin yüksek olması demektir. Böylece parça gerilmeler altında sünek bir davranış sergiler. Gerilme şiddet faktörü değerlerinin azalmasıyla parçanın kırılma hassasiyeti azalır ve gerilmeler altında gevrek bir davranış sergilemeye başlar.

Bu yapılan tespitler doğrultusunda en düşük GŞF değerinin dışbükey kaynak formunda oluştuğu görülmüştür. İçbükey olması durumunda ise en yüksek değer çıkmaktadır. Düz kaynak formunda oluşan gerilme şiddet faktörü değerleri ise, dışbükey durumda oluşan değerlere yakın olmakla birlikte, biraz daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuç ise bize, kaynak formunun etkisini göstermektedir. Kaynağın mukavemetini arttırmak için, kaynak bölgesini aşırı derecede doldurmanın gerilme şiddet faktörünü yükselttiği sonucuna varabiliriz.

## KAYNAKLAR

- [1] YAYLA, P., “Kırılma Mekaniği”, Çağlayan Kitapevi, 2006.
- [2] ZOR, M., “İki Boyutlu Kırılma Mekaniği Notları”, 2007.
- [3] KARAOĞLU, S., KARAOĞLU, Ç., “T-Bağlantılarda Kaynak Eşiğindeki Gerilme Yığılması Faktörünün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi”, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 4, Sayı 2, Sayfa 107-112, 2002.
- [4] ERKOCA, A., “Ansys ile “KIC” Hesabı ve Değişik Çatlak Geometrileri Üzerine Analizi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2007.
- [5] ÖZBAŞLI, C. Ö., “Plane 42 Elemanı İle Aks-Simetrik Basınç Tankı Analizi”, <http://bidem-cae.blogspot.com>.
- [6] METRISIN, T. J., “Guidelines for Obtaining Contact Convergence”, International ANSYS Conference, 2008.
- [7] PELTEK, B., “Köşe Kaynak Bağlantılarında Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2003.
- [8] TENG, T.L., FUNG, C.P., CHANG, P.H., YANG, W.C., “Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78. 2001; 523-528.
- [9] NING, X., M.A., UEDA, Y., MURAKAWA, H. MAEDA, H., FEM analysis of 3D welding residual stresses and angular distortion in T-type fillet welds. *JWRI*, 24. 1995; 115-122.
- [10] MERİÇ C., OKUR A. (2000) Rutil elektrotlarla birleştirilmiş C22'nin kaynak bölgesinin kırılma tokluğunun incelenmesi ve uyumsuzluk (mismatch) faktörünün belirlenmesi. *Denizli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 2, Sayı: 1, s. 95-105.
- [11] MINGUEZ J. M. and VOGWELL J. (2003) The stress distribution over open and closed weld joints. *Engineering Failure Analysis*, Vol: 10, p. 103-111.
- [12] DONG P., (2001) A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints. *International Journal of Fatigue*, Vol: 23, p.865-876.



- [13] NGUYEN, T.N., WAHAB, M.A., The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Material Processing Technology*, 77. 1998; 201-208.

## ÖZGEÇMİŞ

Şaban KÜÇÜKGÜMRAH, 1974 yılında Ankara'da doğdu. İlk, Orta, Lise tahsilini Çankırı'da tamamladı. 1993 yılında Tedaş Çankırı İl Müdürlüğü'nde işçi olarak göreve başladı. 1994 yılında Ankara Üniversitesi Çankırı MYO Endüstriyel Elektronik Bölümünü bitirdi. 1995 yılında Kocaeli Körfez Elektrik Dağıtım A.Ş Genel Müdürlüğüne tayin oldu. 1997 yılında Tekniker ünvanını aldı. Hem çalışıp hem iş hayatını devam ettirdi. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğini bitirdi. 1999-2009 yılları arasında Mühendis ve Başmühendis olarak Çankırı Tedaş'da çalıştı. 2009 yılı Ocak ayında Çankırı Sanayi ve Ticaret İl Müdürlüğü'ne geçiş yaptı. Şu anda halen Çankırı Sanayi ve Ticaret İl Müdürü olarak görev yapmaktadır. Evli ve 2 çocuk sahibidir.