

120775



**YAPI ÇELİKLERİNİN KIRILMA  
TOKLUĞU ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Halil AYTEKİN**

**Danışman  
Prof. Dr. Galip SAİD**

**METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**Şubat 2005**

T.C.  
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI ÇELİKLERİNİN KIRILMA  
TOKLUĞU ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Halil AYTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman  
Prof. Dr. Galip SAİD

AFYON  
2005

.....Halil Aytekin.....'nın yüksek lisans / ~~doğtora~~ tezi olarak hazırladığı “.....Yapı...Geliklerinin...Kırılma...Tokluğu...Üzerine .Bir...Çalışma.....” başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

07/02/2005

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip SAİD  
(Başkan)

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip SAİD  
(Danışman)

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Aytekin HİTİT

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .22.02.2005.....Gün ve 2005/04:2..sayılı kararıyla onaylanmıştır.

  
Prof. Dr. Recep ASLAN  
Müdür ... ..

# YAPI ÇELİKLERİNİN KIRILMA TOKLUĞU ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

## ÖZET

Bu çalışmada, HMK kafes yapısına sahip yapı çeliklerinin kırılma tokluğunun çeşitli mekanik özelliklerle bağılığı göz önünde tutularak, yüksek kırılma tokluğunu elde etme imkanları araştırılmıştır. Metalik malzemelerin kullanıldığı alanlarda, özellikle makine parçalarında meydana gelen çatlakların ilerlemesi sonucunda yorulma hasarları görülmektedir. Çeşitli ısıtım işlem rejimleri uygulayarak, çeliklerin iç yapıları ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile kırılma tokluğunun artırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, malzemelerin kırılma mikro mekanizması (doğası) incelenmiştir. ASTM E-399 standardı, COD ve J-integral yöntemleri ile bu çalışmada incelenen yöntem arasındaki farklar verilmiştir. Ulu'nun (2004) yüksek lisans çalışmasında 4140, 8620, 1040 ve 1050 çeliklerine bir takım ısıtım işlemleri yapılmıştır. Bu çalışmada ise, bu çelikler üzerinde ısıtım işlem rejimlerine göre kırılma tokluğunun değişimi araştırılmıştır. Bu yöntemle yapılacak çözümün daha doğru ve daha hızlı yapılabilmesi için MATLAB adlı matematiksel programlama dilinde bir program geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kırılma Tokluğu, Kırılma Mikro Mekanizması, Isıtım İşlem, MATLAB

# **A STUDY ON FRACTURE TOUGHNESS OF STRUCTURAL STEELS**

## **ABSTRACT**

In this study, fracture toughness of structural steels having a bcc crystal structure dependence with different mechanical properties are considered, obtaining possibility of high fracture toughness is investigated. Metallic materials experience fracture damage by the advancing crack growth which leads to the failure of parts. Enhanced fracture toughness of the steels was aimed through developing microstructure and mechanical properties of the steels.

In this study, materials of fracture micromechanism are investigated. A comparison between ASTM E-399 standard, COD and J-integral methods and the method used are given. Some heat treatments on 4140, 8620, 1040 and 1050 steels are performed. The change in fracture toughness in relation to heat treatment regimes are also investigated. A program was developed for calculation of fracture toughness with MATLAB.

**Anahtar Kelimeler:** Fracture Toughness, Fracture Micromechanism, Heat Treatment, MATLAB

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KIRILMA TOKLUĞUNUN SAPTANMASINDA GELİŞTİRİLMİŞ YÖNTEMİN KULLANILABİLİRLİĞİ .....	2
3. KIRILMA MEKANİĞİ İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER.....	5
3.1 Gerilim Konsantrasyonları.....	5
3.2 Çatlak İlerlemesinde Çatlak Enerjisinin Korunumu (Griffith Çözümü) .....	10
3.3 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları .....	14
3.4 ASTM E-399 Standardı .....	17
3.5 COD ve J-İntegral Yöntemleri.....	23
3.6 Kırılma Tokluğunun Malzemenin Mekanik Özellikleri ile Bağımlılığı .....	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	37
4.1 Kırılma Tokluğunu Saptama Yöntemi.....	37
4.2 Tane Boyutunu Tayin Etme .....	41
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	51
5.1 İncelenen Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Saptanan Parametreler .....	51
5.2 Sonuçlar.....	77
KAYNAKLAR.....	78
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Makine elemanlarında bulunan bazı gerilim konsantrasyonlarının modelleri.....	6
Şekil 3.2. Elips (a) ve romb (b) şeklindeki gerilim konsantrasyonları (şema).....	7
Şekil 3.3 Eliptik delikteki ( $a = 3b$ ) gerilim konsantrasyonu bölgesindeki gerilimler .....	8
Şekil 3.4 Çatlak ilerleme modeli (şema) .....	11
Şekil 3.5. İdeal gevrek malzemelerin gerilim-şekil değişme grafiği.....	11
Şekil 3.6. Çatlak ilerlemesinde elastik enerjilerdeki değişim. ....	12
Şekil 3.7. Griffith'e göre (cam için) çatlakın ilerlemesi ile elastik ve yüzey enerjilerinin değişimi ve buna bağlı toplam enerji (Lawn ve Wilshaw 1975). .....	13
Şekil 3.8 Düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon durumları (şema) .....	14
Şekil 3.9 Kırılma tipleri (şema).....	15
Şekil 3.10 Kritik gerilim şiddet katsayısının, numune kalınlığı ile değişim grafiği (Broek 1974). ....	16
Şekil 3.11 Dinamometrenin montaj metodu ve klips ölçüleri (şema).....	17
Şekil 3.12 3 tip kuvvet-çatlak açılma ( $P - V$ ) grafiği. ....	18
Şekil 3.13 $K_{Ic}$ 'nin saptanması için gerekli eğme numunesi (şema) .....	19
Şekil 3.14 ASTM standardına göre I. Tip numune şekli (şema).....	19
Şekil 3.15 ASTM standardına göre II. Tip numune şekli (şema).....	20
Şekil 3.16 ASTM standardına göre III. Tip numune şekli (şema). ....	21
Şekil 3.17 ASTM standardına göre IV. Tip numune şekli (şema).....	22
Şekil 3.18 Akma geriliminin, HMK ve YMK kafesine sahip metal ve alaşımlarda, sıcaklıkla değişimi. ....	25
Şekil 3.19 HMK kafesli metal ve alaşımlar için tek eksenli çekme deneylerinde elde edilen kuvvet-deformasyon grafiklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri (şema) .....	25

Şekil 3.20 Akma ( $\sigma_y$ ), çekme ( $\sigma_{max}$ ) gerilimleri, kopma mukavemeti ( $S_k$ ) ve % daralma ( $\psi$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi (IOFFE şeması).....	26
Şekil 3.21 Bazı çalışma şartlarının sünek – gevrek geçiş sıcaklık sınırına etkisi (IOFFE şeması). .....	27
Şekil 3.22 Akma geriliminin atermik ( $\sigma_0$ ) ve termoaktivasyon kısımlarını ifade eden bir şema.....	30
Şekil 3.23 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ 'nın, çeşitli deformasyon hızlarında, sıcaklıkla değişimi.....	30
Şekil 3.24 $\frac{S_{kop}}{\sigma_y}$ 'in sıcaklığa göre değişimi.....	34
Şekil 3.25 Kırılma tokluğunun sıcaklığa göre değişimi (şema).....	35
Şekil 4.1 Akma geriliminin $\beta_y$ ile ilişkisini gösteren grafik (Makhutov 1973)...	37
Şekil 4.2 Akma geriliminin atermik ( $\sigma_0$ ) kısmını değerlendirme üzerine bir şema. ....	38
Şekil 4.3 Örnek bir numunenin kesitlere bölünmüş olan P- $\Delta$ l grafiği .....	39
Şekil 4.4 $\ln \sigma_i - \ln \epsilon_i$ logaritmik değişimi.....	41
Şekil 4.5. 870 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x).....	43
Şekil 4.6. 800 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x).....	44
Şekil 4.7. 735 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x).....	44
Şekil 4.8. 810 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (100x).....	45
Şekil 4.9. 765 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (200x).....	45
Şekil 4.10. 735 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (200x).....	46
Şekil 4.11. 810 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).....	46
Şekil 4.12. 765 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).....	47
Şekil 4.13. 735 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).....	47
Şekil 4.14. 800 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).....	48
Şekil 4.15. 750 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).....	48
Şekil 4.16. 735 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).....	49



Şekil 4.17. 810 °C’de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısından (100x) tane çapının belirlenmesi. ....	49
Şekil 5.1. 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	57
Şekil 5.2. 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.....	57
Şekil 5.3. 870 °C’de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	58
Şekil 5.4. 870 °C’de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	58
Şekil 5.5. 870 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	59
Şekil 5.6. 870 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	59
Şekil 5.7. 800 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	60
Şekil 5.8. 800 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	60
Şekil 5.9. 735 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	61
Şekil 5.10. 735 °C’den su verilmiş ve 650 °C’de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	61
Şekil 5.11. 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	62
Şekil 5.12 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.....	62
Şekil 5.13. 810 °C’de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)’e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	63
Şekil 5.14. 810 °C’de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)’e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	63

Şekil 5.15. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	64
Şekil 5.16. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	64
Şekil 5.17. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	65
Şekil 5.18. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	65
Şekil 5.19. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	66
Şekil 5.20. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	66
Şekil 5.21. 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	67
Şekil 5.22. 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	67
Şekil 5.23. 800 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	68
Şekil 5.24. 800 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	68
Şekil 5.25. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	69
Şekil 5.26. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	69
Şekil 5.27. 750 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	70
Şekil 5.28. 750 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	70
Şekil 5.29. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	71

Şekil 5.30. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	71
Şekil 5.31. 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	72
Şekil 5.32. 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.....	72
Şekil 5.33. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	73
Şekil 5.34. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	73
Şekil 5.35. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	74
Şekil 5.36. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	74
Şekil 5.37. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	75
Şekil 5.38. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	75
Şekil 5.39. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi. ....	76
Şekil 5.40. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi. ....	76

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan değerler. ....	52
Çizelge 5.2 Ek'te verilmiş olan MATLAB programıyla elde edilen değerler. ....	53
Çizelge 5.3. İncelenen çeliklerin gerçek Gerilim - Gerinim ve akma geriliminin sıcaklıkla değişimini gösteren formülleri. ....	55



## 1. GİRİŞ

Kırılma tokluğunu saptamak için, HMK kafes yapısına sahip yapı çelikleri üzerine uygulanan ve akma geriliminin sıcaklıkla ve deformasyon hızı ile değişimi esasında bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanarak, kırılma tokluğunun ısıtılma işlem rejimleri ile (mekanik özellikleri değiştirerek) değişimi incelenmiştir. Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan ASTM E-399 standardı ve bu standarda alternatif COD ve J-integral yöntemleri incelenerek, yetersiz tarafları ortaya konulmuştur.

Bu tezde incelenmiş (kırılma tokluğunu saptamak için kullanılan) olan yöntemle, kırılma mikro mekanizması ve plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisi kısmını açıklayarak, kırılma tokluğu malzemenin mekanik özelliklerine bağlama temelinde, ısıtılma işlem rejimlerinin kırılma tokluğuna etkisi araştırılmıştır. Bu yöntem 4140, 8620, 1040 ve 1050 çelikleri üzerinde incelenmiştir. Bu çeliklere uygulanan ısıtılma işlemlerden elde edilen bazı değerler Ulu'nun (2004) yüksek lisans çalışmasından alınmıştır. Bu alınan değerler ile kırılma tokluğunun saptanması için gerekli diğer parametreler hesaplanmış ve çıkarılan kırılma tokluğu formülünde bu parametreler yerine konularak hesaplamalar yapılmıştır.

Böylece uygulanmış olan yöntemle, incelenen çelikler üzerinde istenen mekanik özelliklere karşılık istenen bir kırılma tokluğu elde etme amaçlanmıştır.

Kırılma tokluğunu saptamada kullanılan bu yöntemin kolay olması ve malzemenin kırılma doğasını göz önünde tutması açısından, malzemelerin kırılma tokluğunun geliştirilmesi için ne tür ısıtılma işlem yapılması gerektiği araştırılmıştır.

Bu yöntemle yapılacak çözümün daha doğru ve daha hızlı yapılabilmesi için MATLAB adlı matematiksel programlama dilinde bir program geliştirilmiş ve bu programla saptanan parametreler çizelge ve grafiklerde verilmiştir.

## 2. KIRILMA TOKLUĞUNUN SAPTANMASINDA GELİŞTİRİLMİŞ YÖNTEMİN KULLANILABİLİRLİĞİ

AŞağıdaki çalıŐmalarda, bu tezde incelenmiş olan yÖntem ile ilgili fikirler incelenmiştir. ÇalıŐmalarda, kırılma tokluğunun temel mekanik Özelliklerle iliŐkisine gÖre saptanan sonuçlar ile ASTM standardına gÖre deney sonuçları karŐılaŐtırılmıŐ ve yÖntemin geçerliliği kanıtlanmıŐtır.

Saidov'un bu çalışmasında, kırılma tokluğu ve mekanik Őzellik, tane yapısı, sıcaklık ve deformasyon hızı arasındaki bağlantı, metallerde plastik deformasyonunun termoaktivasyon analizinin temeli üzerinde analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, elde edilmiş olan ilişki, çoğu çeliğin standart çatlak numunelerinin iliŐkisine, yeterli doğrulukta tayin edilir. Çatlak bŧyŧmesine direnç gÖsteren yeni alaşımların geliŐtirilmesinde, bu ilişkiler bir araç olarak kullanılabilir (Saidov 1997).

Demir – karbon temel alınarak elde edilmiş HMK kafesli elik ve alaşımlarda sıcaklık ve deformasyon hızının deđiŐmesi mekanik Özelliklerin, Özellikle akma dayanımının, deđiŐmesine neden olarak, malzemenin gevrek kırılma ihtimalini arttırmaktadır. Eğer, metal konstrŧksiyonlarda sÖz konusu kristal yapıya sahip az karbonlu dŧŐŧk alaşımlı çeliklerin kullanıldığı ve bu konstrŧksiyonların imalatında kaynak teknolojisinin geniŐ bir alanda uygulanması gÖz Őnŧnde tutulursa, bŧyle bir konstrŧksiyonun emniyetini ve Őmŧr uzunluğunu sağlamak için yapılacak olan projelerin gerçekleŐtirilmesinde malzemenin kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) temel olarak ortaya çıkmaktadır. Gŧnŧmŧzde kullanılan ASTM E-399-74 standardına gÖre, sÖz konusu olan elik ve alaşımların  $K_{Ic}$  değerini elde etmek için bŧyŧk kalınlığa sahip olan çatlaklı numuneler deneye tabi tutulmalıdır. Ayrıca, sÖz konusu olan standart  $K_{Ic}$  değerini saptamak için çatlak ucunda gerçekleŐen kırılma mikro mekanizmalarını gÖz Őnŧnde tutmamaktadır ve bu nedenle  $K_{Ic}$  malzeme seçiminde ancak kalite kontrol gÖrevini yerine getirmektedir. Bu çalışmada, yazar tarafından ileri sŧrŧlmŧŐ ve bir çok farklı çeliklerin deneyleriyle ispat edilmiş olan hipotez temelinde,  $K_{Ic}$ 'in doğasını açıklamaya, yani kırılma tokluğu ile malzemenin temel mekanik Özellikleri ve iç yapıları arasındaki

bağımlılığı net olarak ortaya çıkarılması üzerinde durulmuştur. Bu amaçla çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyonun termoaktivasyon enerji analizi kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda hem kırılma tokluğu daha yüksek olan alaşımlar geliştirmek hem de HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğunu oldukça kolay bir yöntem ile saptamak amacı ile bir standart oluşturmak imkanı sağlamıştır (Said 1999).

Akma gerilimi sıcaklık ve deformasyon hızına çok hassas olan HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğunun saptanması için yeni bir metot önerilmiştir. Bu malzemelerin sıcaklık ile deformasyon karakteristikleri ve enerjileri değişir. Hipotezde ileri sürülen HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğu çatlak ucundaki plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisine exponansiyal olarak bağlanmıştır. Çalışmanın Teorik temeli iki açıdan ele alınır: (1) söz konusu alaşımların akma gerilimi ile sıcaklık grafiğindeki atermik ve termoaktivasyon bölgelerinin farkı. (2) kritik gerilim altında çatlak ucunda mikroçatlakların gelişmesi ve sonra çoğalarak ana çatlağın büyümesi ile çatlak çoğalma mekanizması. Kırılma tokluğu, temel mekanik özellikler ve çeliklerin mikro yapısı arasında elde edilen ilişkiler, ASTM standardına göre deneylerin sonuçları ve mevcut çalışmanın sonucu arasında uyuşma vermektedir (Said ve Taşgetiren 2000).

ASTM E399 standardına göre HMK kafesli çelik ve alaşımların kırılma tokluğunu ( $K_{Ic}$ ) saptamak amacıyla büyük boyutlara sahip olan çatlaklı numunelerin deney yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı günümüze kadar sadece az sayıdaki çelikler dışında büyük önem taşıyan çoğu konstrüksiyon (yapı) çeliklerinin kırılma tokluğu değerlendirilememiştir. Bunun dışında, ASTM standardı uyarınca  $K_{Ic}$ 'i değerlendirmede kabul edilmiş olan formalite şartlar bu temel karakteristiğinin mikro mekanizmasını açıklama ve dolayısıyla yüksek kırılma tokluğuna sahip olan çelik ve alaşımları elde etme imkanını sağlamaz. Bu çalışmada teorik araştırmaların sonuçları ve kabul edilmiş olan hipoteze göre ASTM standardına alternatif bir yöntem geliştirilmiş ve HMK kafesli metallerin kırılma tokluğunun doğası ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma sonuçları temel alınarak elde edilmiş olan teorik araştırmalar çerçevesinde "HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma

tokluğunun sıcaklık ve deformasyon hızı ile bağımlılığını saptama” adlı yöntem geliştirilmiş ve ASTM kuruluna Standart Projesi olarak sunulmuştur. Geliştirilmiş olan yöntemle göre HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) her hangi bir araştırma veya fabrika laboratuvarına oldukça düşük maliyet sarfiyatıyla gerçekleştirilmesi söz konusudur (Said 2001).





### 3. KIRILMA MEKANIĞI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

Kırılmanın dış faktörlerden kaynaklanan üç nedeni vardır. Bunlar;

- 1-) Kırılma, gerilim konsantrasyonu bölgesinde gerçekleşir.
- 2-) Kırılma tavırlarının tümü gevrek nitelik taşır.
- 3-) Kırılma anına uygun gerilim, akma geriliminden çok küçük olur.

Kırılma mekaniği esas olarak gevrek kırılma üzerinde durmaktadır. Gerilim konsantrasyonu olarak ise çatlak göz önünde tutulmaktadır. Kırılma mekaniği malzemenin en zor şartlarda kırılıp kırılmayacağını araştırmaktadır.

Kırılma mekaniğinin kriteri şu şekilde yazılır.

$$K_1 \leq K_{1c} \quad (3.1)$$

Burada:

$K_1$  - gerilim şiddet katsayısı

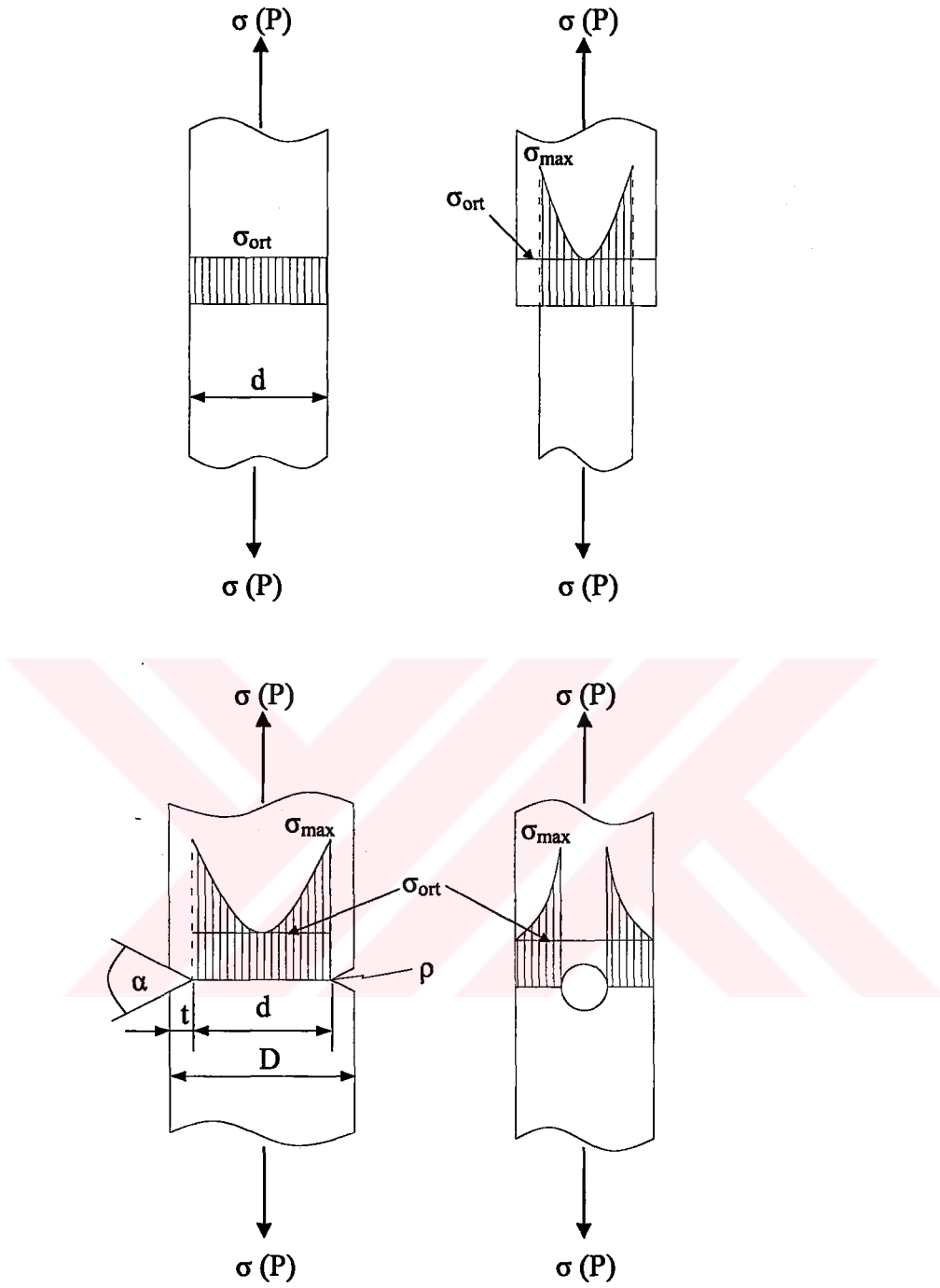
$K_{1c}$  - kritik gerilim şiddet katsayısı

Formül (3.1)'in sol tarafı konstrüksiyonu, sağ tarafı ise bu konstrüksiyonda kullanılan malzemeyi ifade etmektedir.  $K_{1c}$ 'nin elde edilmesi için ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir.

Malzemenin kimyasal bileşimi ve uygulanan ısıl işlemler  $K_{1c}$ 'ye önemli derecede etki etmektedir.

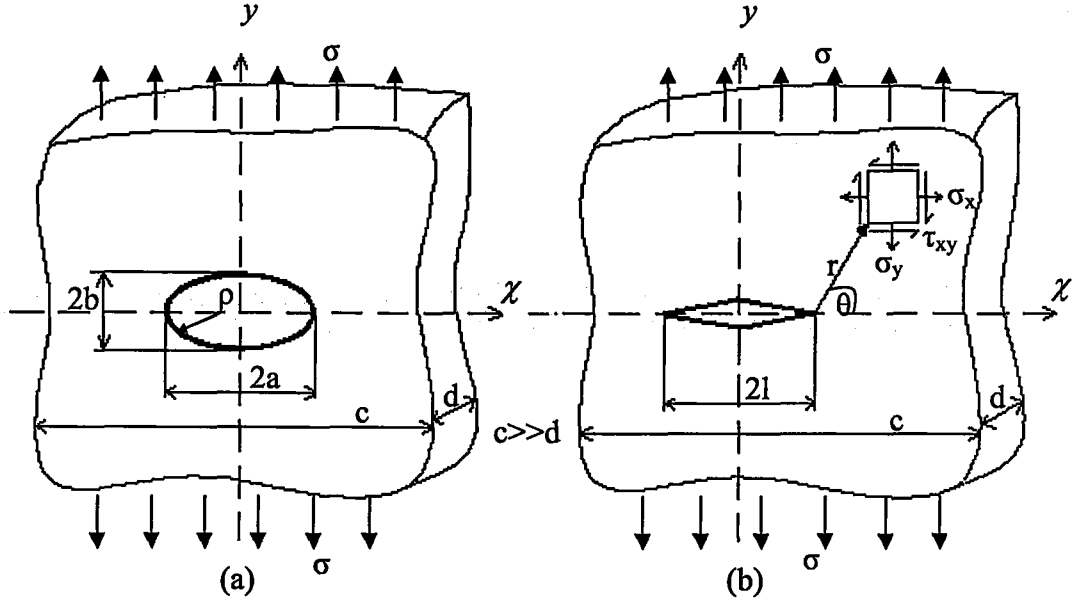
#### 3.1 Gerilim Konsantrasyonları

Makine parçaları karmaşık geometrilere sahip olmakla birlikte, bu geometriye bağlı olarak, makine elemanlarında bulunan gerilim konsantrasyonlarını temsil eden bazı modeller şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Makine elemanlarında bulunan bazı gerilim konsantrasyonlarının modelleri.

Şekil 3.2'de, gerilim konsantrasyonlarının matematiksel ifadesini açıklamak için şemalar gösterilmektedir (Makhutov 1973).



Şekil 3.2. Elips (a) ve romb (b) şeklindeki gerilim konsantrasyonları (şema).

Şekil 3.2, a ve b'deki düzlemsel gerilim şemasında, elips ve romb şeklindeki gerilim konsantrasyonları, dış gerilim  $\sigma$  altında yüklenmiştir.

Şekil 3.2, a'daki elips şeklindeki gerilim konsantrasyonunun ( $x$  eksenindeki) uç kısımlarında meydana gelen  $\sigma_y = \sigma_{\max}$  gerilimi, İngiliz formülüne göre şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_y = \sigma_{\max} = \sigma_{\text{ort}} \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{elipsin yarı çapı } \rho = \frac{b^2}{a}$$

$$\sigma_y = \sigma_{\max} = \sigma_{\text{ort}} \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (3.3)$$

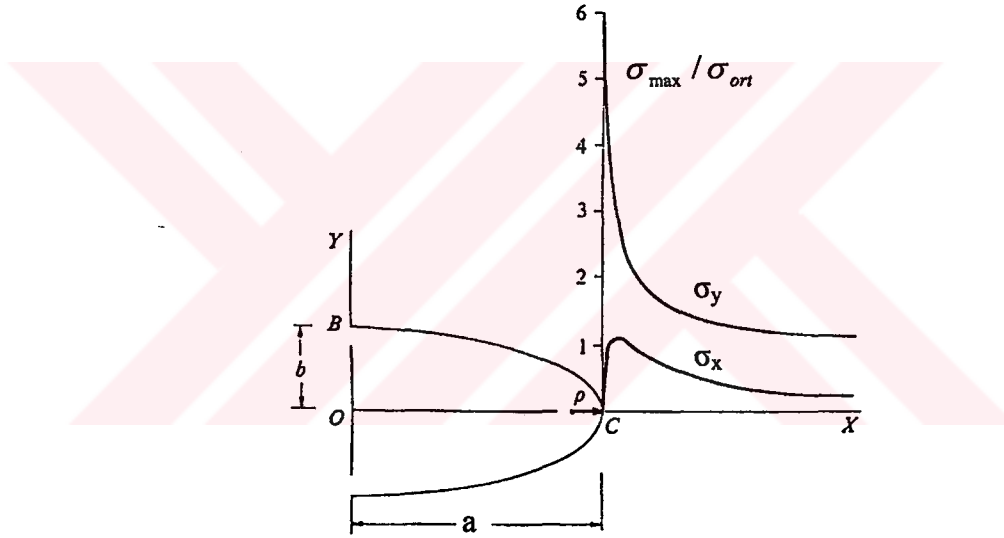
Formül (3.3)'den görüldüğü üzere,  $\sigma_{\max}$  gerilim değeri, elipsin büyük eksenindeki yarı çapı  $\rho$  ile oldukça bağlıdır. Eğer  $\rho$  sifira yaklaşırsa ( $\rho \rightarrow 0$ ) formül (3.3)'den görüldüğü gibi,  $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$  olmaktadır. Yani gerilim konsantrasyonu elipsten çatlağa dönüşürse, teorik olarak çatlak ucundaki gerilim sonsuza ulaşır. Bu

nedenle kırılma açısından çatlak, en tehlikeli gerilim konsantrasyonu sayılır. Gerilim konsantrasyonunun teorik katsayısı  $\alpha_\sigma > 1$  olur, yani

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ort}} = \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (3.4)$$

Gerilim konsantrasyonu olarak makine parçalarında bulunan delik alınırsa ( $a = \rho$ ) formül (3.4)'e göre  $\alpha_\sigma = 3$ , yani  $\sigma_{\max} = 3 \sigma_{ort}$  olur.

Şekil 3.3'de eliptik bir delikteki ( $a = 3b$ ) gerilim konsantrasyon bölgesindeki gerilimler ve bu gerilimlerin, gerilim konsantrasyonu bölgesindeki değişimleri şematik olarak gösterilmektedir (Lawn ve Wilshaw 1975).



Şekil 3.3 Eliptik delikteki ( $a = 3b$ ) gerilim konsantrasyonu bölgesindeki gerilimler

Çatlak ucunda dış kuvvet etkisinden meydana gelen gerilim dağılımını elde etmek için, sistemin enerjik denge açısından elde edilmiş olan Griffith çözümü ve elastikiyet teorisi esasında elde edilmiş olan Vestergard, Muskhelişvili çözümleri hemen hemen aynıdır. Ancak, Griffith çözümü elastik enerjideki denge durumu, diğer çözümler ise matematiksel usuller ile elde edilmiştir (Makhutov 1973).

Vestergard çözümüne göre, şekil 3.2, b'deki şemaya göre y eksenini boyunca gerilim aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_y = \sigma \frac{x}{\sqrt{x^2 - l^2}} = \frac{x/l}{\sqrt{(x/l)^2 - 1}} \quad (3.5)$$

Burada;

$l$  - çatlak uzunluğunun yarısı

$x$  - çatlağın ucundan itibaren , ilerleme yönünde (x ekseninde) alınan herhangi bir nokta (şekil 3.2, b)

$\frac{x}{l}$  - çatlağın nispi uzunluğu

$\sigma$  - etki eden dış gerilim

$\frac{x}{l} = 1$  olursa  $\sigma_y = \infty$  olur.

$$(\sigma_y)_{\lim_{x/l \rightarrow 1}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \text{ alınırsa} \quad (3.6)$$

$$K = \sigma_y \sqrt{2\pi} \sqrt{r} \quad (3.7)$$

Burada;

$r$  - çatlak ucundan incelenen noktaya kadar olan mesafe (şekil 3.2,b)

Irwin tarafından şekil 3.2, b'deki şemadaki gerilim şiddet katsayısı için şöyle bir formül elde edilmiştir.

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (3.8)$$

Formül (3.8), formül (3.7)'de yerine konulursa,

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{l}{2r}} \quad (3.9)$$

Formül (3.9), çatlak bulunan bir parçanın temel parametrelerini kapsamaktadır. Dış gerilim ( $\sigma$ ) sabit olduğu için, çatlak ucunda meydana gelen gerilim ( $\sigma_y$ ), çatlak uzunluğu ( $l$ ) ve radius vektörü ( $r$ ) ile bağlıdır.

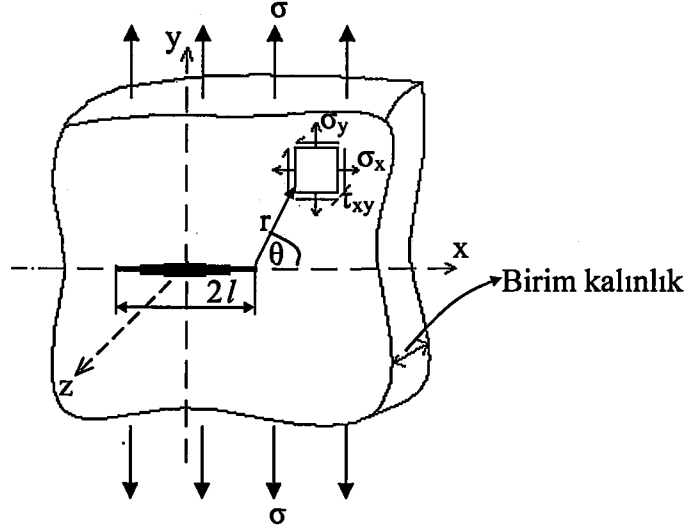
Şekil 3.2, b'deki şemada,  $\theta$  açısını da kapsayan, x - y koordinat alanında herhangi bir bölge için, dış gerilim etkisinden meydana gelen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  gerilimlerinin değeri, aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)\end{aligned}\tag{3.10}$$

### 3.2 Çatlak İlerlemesinde Çatlak Enerjisinin Korunumu (Griffith Çözümü)

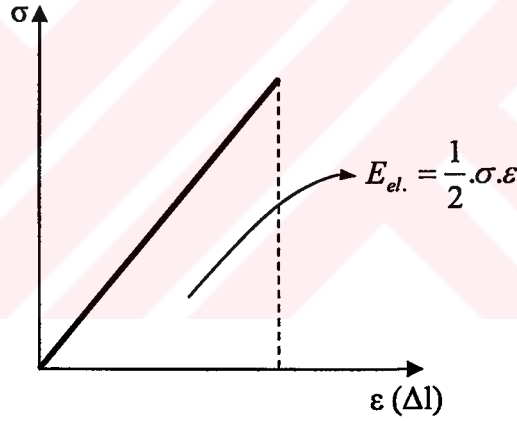
Griffith, malzemede çatlağın ilerlemesini elastik enerji değişimindeki denge açısından incelemiştir. Boyu ve eni sonsuz olan bir levhada, uzunluğu  $2l$ 'ye eşit bir çatlağın dış kuvvet etkisiyle büyümesini, (enerjinin değişme tavrına göre) şekil 3.4'deki şema ile modellemiştir (Griffith 1920).

Griffith tarafından elde edilmiş olan formül, çatlak ilerlemesinin başlangıcındaki kritik gerilim ve çatlağın kritik uzunluğu arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.



Şekil 3.4 Çatlak ilerleme modeli (şema)

Tam gevrek malzemeler için gerilim - gerinim grafiği şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İdeal gevrek malzemelerin gerilim-şekil değişme grafiği.

Griffith şekil 3.4’deki şemayı iki açıdan analiz ediyor.

a-) Şekil 3.4’de dış kuvvet etkisinden, numunede bulunan çatlakın çok az bir mesafeye ilerlemesi sonrasında, elastik enerjilerin değişimindeki farkı göz önünde tutulursa elastik enerjideki değişim, şekil 3.6’daki gerilim – gerinim grafiğindeki gibi olur ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

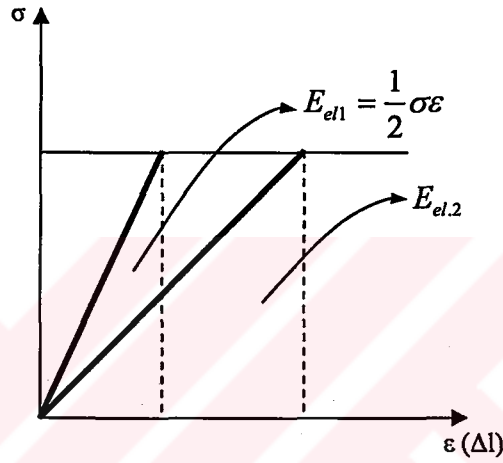
$$U_E = -\frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} \quad (3.11)$$

Burada;

$l$  - çatlak uzunluğunun yarısı

$\sigma$  - etki eden dış gerilim değeri

$E$  - Young modülü



Şekil 3.6. Çatlak ilerlemesinde elastik enerjilerdeki değişim.

Formül (3.11)'deki (-) işareti, çatlak ilerledikçe sistemin elastik enerjisinin azaldığını göstermektedir.

b-) Çatlak büyüdükçe, çatlağın açılan karşılıklı yüzeyleri de büyümektedir. Buna göre yüzey enerjisi,

$$U_s = 4l\gamma_s \quad (3.12)$$

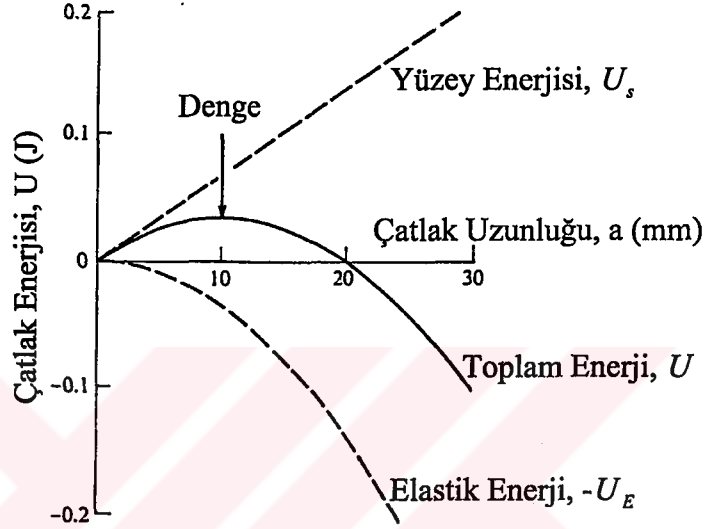
Burada;  $\gamma_s$  - yüzey enerjisi

Şekil 3.7'de çatlağın ilerlemesi ile elastik ve yüzey enerjilerinin değişimi ve toplam enerji gösterilmiştir. Çatlağın ilerleyebilmesi için, toplam enerjinin denge durumunun aşılması gereklidir (Lawn ve Wilshaw 1975).



Çatlağın ilerlemesi için elastik enerji ve yüzey enerjisinin toplamının, çatlak uzunluğuna göre 1. dereceden türevi kritik olarak sıfıra eşit olmalıdır (Griffith 1920).

$$\frac{d(U_E - U_S)}{dl} = 0 \quad (3.13)$$



Şekil 3.7. Griffith'e göre (cam için) çatlağın ilerlemesi ile elastik ve yüzey enerjilerinin değişimi ve buna bağlı toplam enerji (Lawn ve Wilshaw 1975).

Formül (3.11) ve (3.12), formül (3.13)'de yerine konularak bazı işlemler yapılırsa;

Hacimsel deformasyon ( $\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \sigma_z = 0, \epsilon_x \neq 0, \epsilon_y \neq 0, \epsilon_z \neq 0$ ) şartı için.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi l}} \quad (3.14)$$

Hacimsel gerilim ( $\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \epsilon_x \neq 0, \epsilon_y \neq 0, \epsilon_z = 0$ ) şartı için.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi l(1-\nu^2)}} \quad (3.15)$$

Burada,  $\nu$  - poisson katsayısı (metal ve alaşımlar için  $\nu \approx 0.28 - 0.33$ )

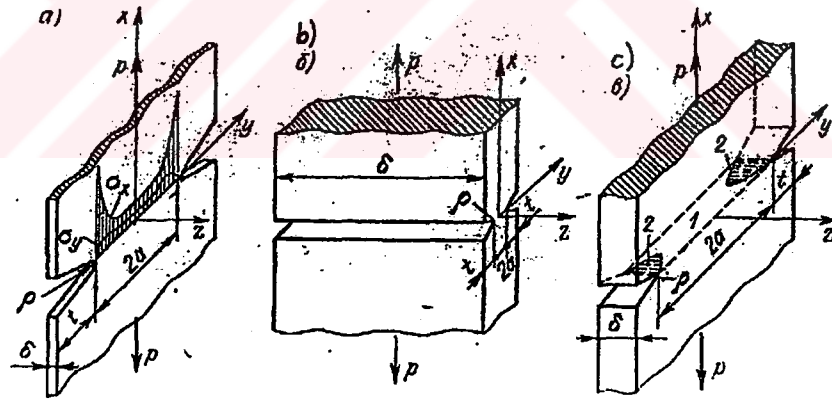
Formül (3.14) düzlemsel gerilime, formül (3.15) ise düzlemsel deformasyona ait ifadelerdir. Bu formüller, oldukça gevrek olan camdan yapılmış numuneler üzerinde kontrol edilmiştir. Ancak metalik malzemeler için yüzey enerjisi, cam yüzey enerjisinden oldukça büyüktür. Bundan dolayı  $\gamma = \gamma_{pl} + \gamma_s \approx \gamma_{pl}$  olarak kabul edilir ve formül (3.15) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_{pl}E}{\pi l(1-\nu^2)}} \quad (3.16)$$

Metaller ve alaşımları için yüzey enerjisini ( $\gamma_{pl}$ ) belirli doğrulukla hesaplamak zordur. Bu parametreyi ortadan kaldırmak amacıyla, Irwin tarafından formül (3.16)'da bazı değişiklikler yapılarak formül (3.8) elde edilmiştir.

### 3.3 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları

Şekil 3.8'de düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon durumlarını açıklamak için şemalar verilmiştir (Kopelman 1978).



Şekil 3.8 Düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon durumları (şema)

Şekil 3.8, a'da levhanın kalınlığı  $\delta$ , çentik ucunun yarıçapı  $\rho$ 'dan küçüktür. Bu durumda, malzeme üç ekseninde deforme olmaya müsaittir.

Şekil 3.8, b'de ise levhanın kalınlığı  $\delta$ , çentik ucunun yarıçapından çok büyüktür. Bu durumda, malzeme (z) ekseninde deforme olmaz ve  $\sigma_z$  gerilimi meydana gelir.

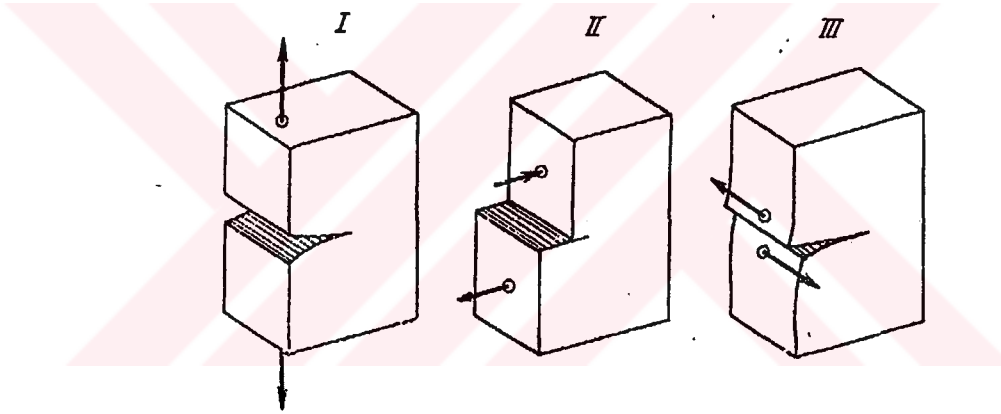
Şekil 3.8, a'da düzlemsel gerilim, şekil 3.8, b'de düzlemsel deformasyon durumları, şekil 3.8, c'de ise düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon arası durum gösterilmektedir. Şekil 3.8, c'de taranmamış bölge düzlemsel deformasyon, taranmış bölge ise düzlemsel gerilimi ifade etmektedir.

Kırılma mekaniğinde üç çeşit kırılma şeması söz konusudur. Bu şemalar şekil 3.9'da gösterilmiştir (Makhutov 1973).

I. tür; Normal kayma ( $K_I$ )

II tür; Çatlak yüzeyi boyunca kayma ( $K_{II}$ )

III tür; Çatlak yüzeyine ters yönde kayma ( $K_{III}$ )



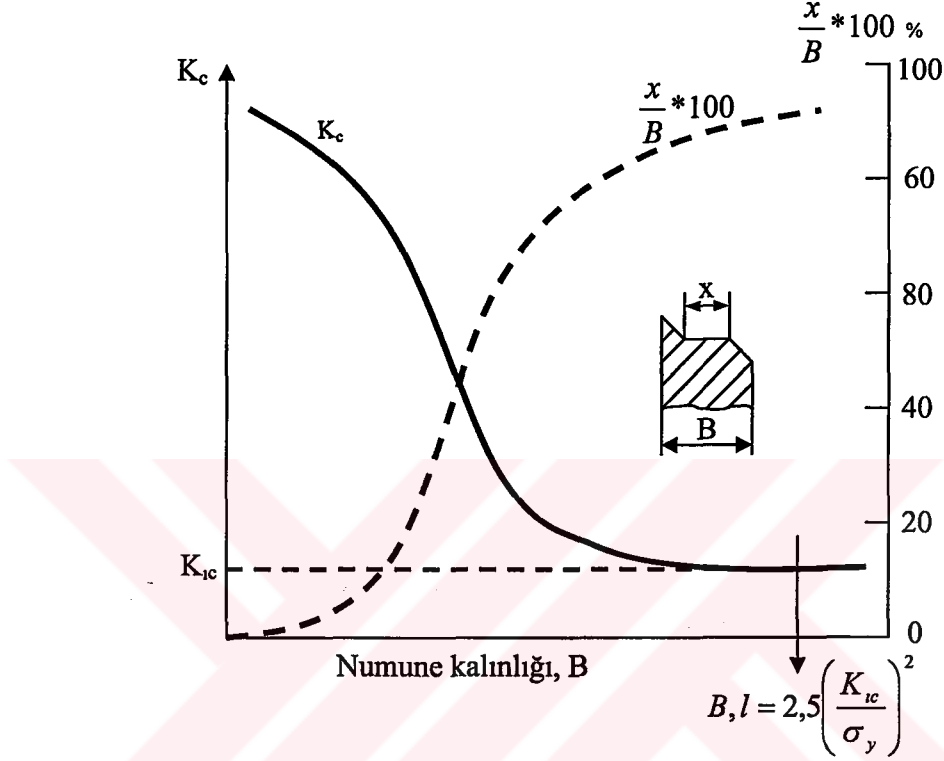
Şekil 3.9 Kırılma tipleri (şema)

Buraya kadar bahsedilmiş tüm fikirler, boyu ve eni sonsuz olan parçalara aittir. Çünkü elde edilmiş olan bu çözümlerde numune kenarlarının çatlak ucuna etkisi göz önünde tutulmamıştır.

Kırılma mekaniği gevrek kırılma üzerine odaklandığı için, aşağıda düzlemsel deformasyon üzerinde durulacaktır.

Çatlak ilerlemesi ve çatlak ucunda meydana gelen kritik gerilim durumu, kritik gerilim şiddet katsayısı  $K_c$  ile ifade edilir.  $K_c$  numunenin veya parçanın kalınlığı ile bağlıdır. Şekil 3.10'da  $K_c$ 'nin, numune kalınlığı ile bağlılığı gösterilmiştir (Broek 1974).

Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere numune kalınlığı arttıkça  $K_c$  değeri azalmakta ve numune kalınlığı belirli bir kalınlığa eriştiğinde  $K_c = K_{ic}$  olmaktadır. Bundan sonra kalınlık artsa da bu değer değişmez. Buna göre  $K_{ic}$  malzemenin sabiti sayılır. Aynı zamanda kırılma tavrı, plastikten ( $K_{cmax}$ 'dan), gevrek kırılmaya kadar değişmektedir.



Şekil 3.10 Kritik gerilim şiddet katsayısının, numune kalınlığı ile değişim grafiği (Broek 1974).

Düzlemsel deformasyon durumundaki kesit kalınlığında tam gevrek kırılma gerçekleşmekte ve kırılma tokluğu  $K_{ic}$  ile ifade edilmektedir.

Düzlemsel deformasyon durumunun (gevrek kırılma) gerçekleşmesi için ( $K_c = K_{ic}$  olması için) numune kalınlığı aşağıdaki formülle ifade edilir.

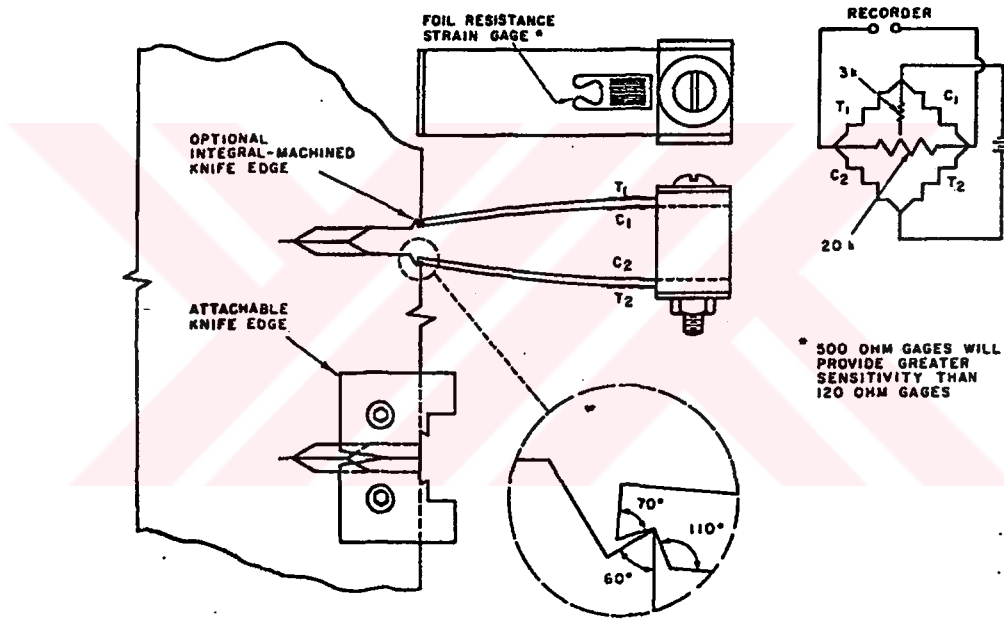
$$B, l \geq 2,5 \left( \frac{K_{ic}}{\sigma_{ag}} \right)^2 \quad (3.17)$$

$K_{ic}$ 'yi değerlendirmek için formül (3.17)'ye göre numune kalınlığının gerekli boyutlarda olması zorunludur.

### 3.4 ASTM E-399 Standardı

$K_{Ic}$ 'yi tayin etmek için ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir. ASTM standardı uyarınca, düşük akma gerilimine sahip çeliklerin kırılma tokluğunun tayin edilmesi için, düzlemsel deformasyon durumuna (gevrek kırılma) uygun büyük numunelerin deneye tabi tutulması gereklidir (ASTM, 2003).

Şekil 3.11'de kuvvet - çatlak açılma (P - V) grafiklerinin çatlak açılma koordinatının çizilmesi için kullanılan dinamometrenin şematik görünüşü verilmektedir (ASTM, 2003).



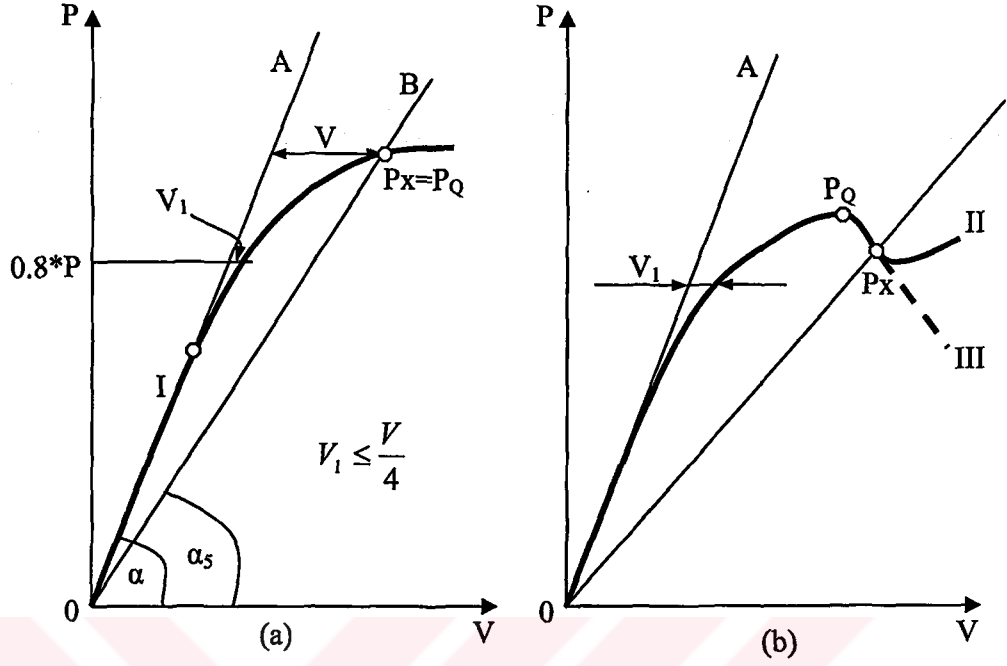
Şekil 3.11 Dinamometrenin montaj metodu ve klips ölçüleri (şema)

Deney esnasında kuvvet-çatlak açılma (P - V) grafikleri çizilir. Bu çizilen grafikler standarda göre özel yöntemlerle analiz edilir. Malzeme özellikleriyle bağımlı olan 1., 2. ve 3. tip grafikler şekil 3.12'de verilmiştir.

Standarda göre, şekil 3.12'deki grafiklerle  $K_{Ic}$ 'yi değerlendirmek için kullanılan  $P_Q$  kuvveti tayin edilmelidir (ASTM, 2003).

Şekil 3.12, a'daki grafikte elastik bölge çizgisi devam ettirilir ve bu çizginin açısı  $\alpha$ 'dan %5 daha az bir açıda OB çizgisi çizilir.

$$\text{Burada } V_1 \leq \frac{V}{4} \text{ olmalıdır.} \quad (3.18)$$



Şekil 3.12 3 tip kuvvet-çatlak açılma (P - V) grafiği.

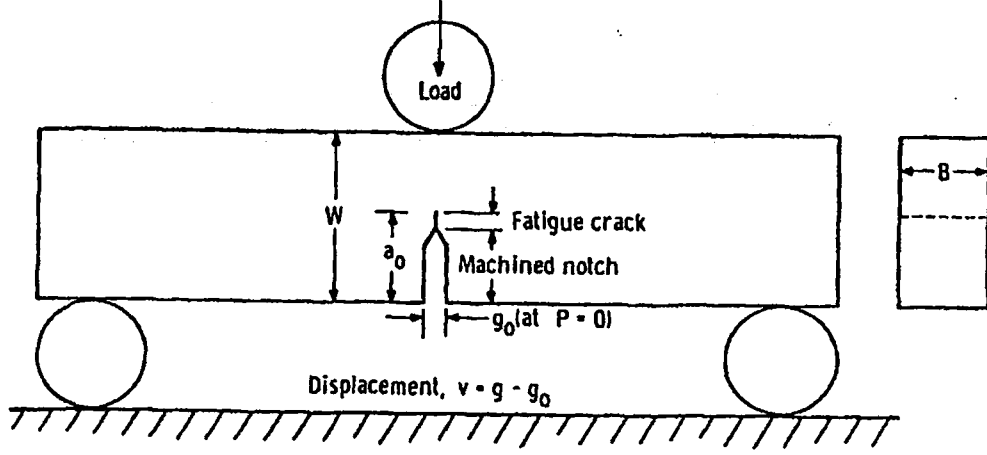
Formül (3.18) sağlanırsa, düzlemsel deformasyon gerçekleşmiş ve numune kalınlığı yeterli sayılır. Bu şart yerine getirildiğinde  $P_Q$  kuvveti şekil 3.12'deki gibi kabul edilir. Şekil 3.12, b'de ise 2. ve 3. tip grafiklerde  $P_Q$  kuvveti gösterilmiştir.

Elde edilmiş olan  $P_Q$  kuvvetine göre aşağıdaki durum yerine getirilirse, kırılma tokluğu  $K_Q = K_{Ic}$  olarak kabul edilir.

$$B, l \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ag}} \right)^2 \quad (3.19)$$

ASTM E-399 standardı uyarınca deneylere tabi tutulan numunelerde oluşturulan çatlaklar, gerilim konsantrasyonuyla başlar ve titreşim makinelerinde elde edilir. Çatlak, gerilim konsantrasyonunun ucundan itibaren ilerlemeye başlar ve istenen çatlak uzunluğu elde edilir. Deneyden sonra kırılmış numune üzerinden gerçek çatlak uzunluğu ölçülür.

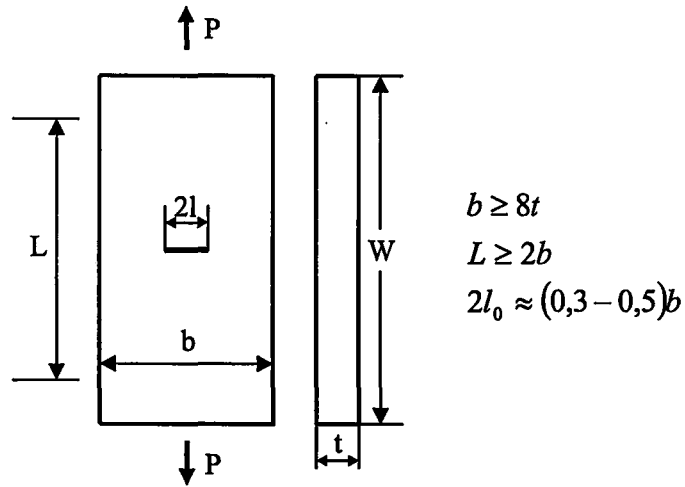
Şekil 3.13'de çatlak oluşturulmuş numunenin şematik görünüşü verilmiştir (Liebowitz 1969).



Şekil 3.13  $K_{Ic}$ 'nin saptanması için gerekli eğme numunesi (şema)

Bu standarda göre, aşağıdaki şekillerdeki 4 tip çentikli numune,  $K_Q$  parametresini değerlendirmek için deneye tabi tutulmaktadır (ASTM, 2003).

Şekil 3.14'de, numunenin orta kısmında bir gerilim konsantrasyonu ve daha sonra çatlak oluşturulmaktadır. Bundan sonra numune aksenal çekmeye tabi tutulmaktadır.



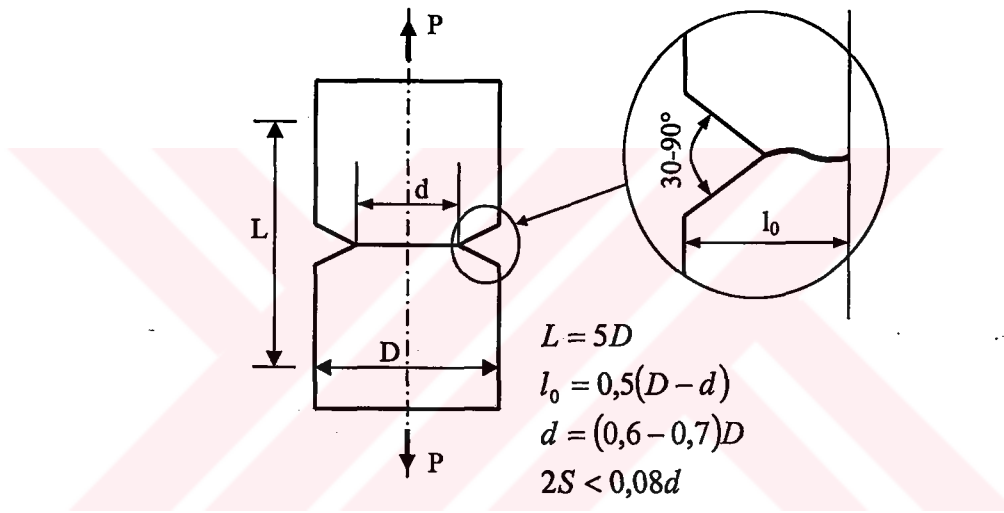
Şekil 3.14 ASTM standardına göre I. Tip numune şekli (şema).

I. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_1 \quad (3.20)$$

$$Y_1 = 0,380 \left[ 1 + 2,308 \left( \frac{2l_0}{b} \right) + 2,439 \left( \frac{2l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (3.21)$$

Şekil 3.15'deki numune silindriktir. Gerilim konsantrasyonu olarak çentik açılmakta ve Şekil - 10'daki gibi aksenal çekmeye tabi tutulmaktadır.



Şekil 3.15 ASTM standardına göre II. Tip numune şekli (şema).

II. tip numune için,

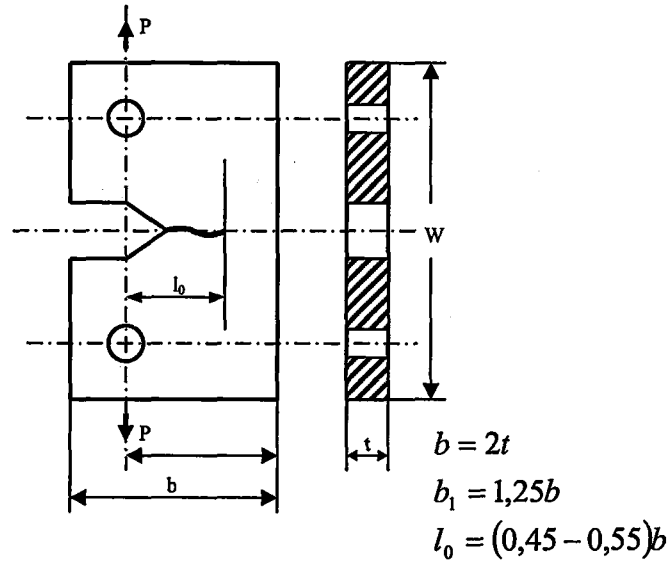
$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{D^3}} (Y_2' + Y_2'') \quad (3.22)$$

$$Y_2' = 6,53 \left[ 1 - 1,8167 \left( \frac{d}{D} \right) + 0,9167 \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (3.23)$$

$$Y_2'' = 3,1 \left( \frac{2S}{d} \right) \quad (3.24)$$



Şekil 3.16'daki numune eksantrik (eksenel kaçık) çekmeye tabi tutulmaktadır.



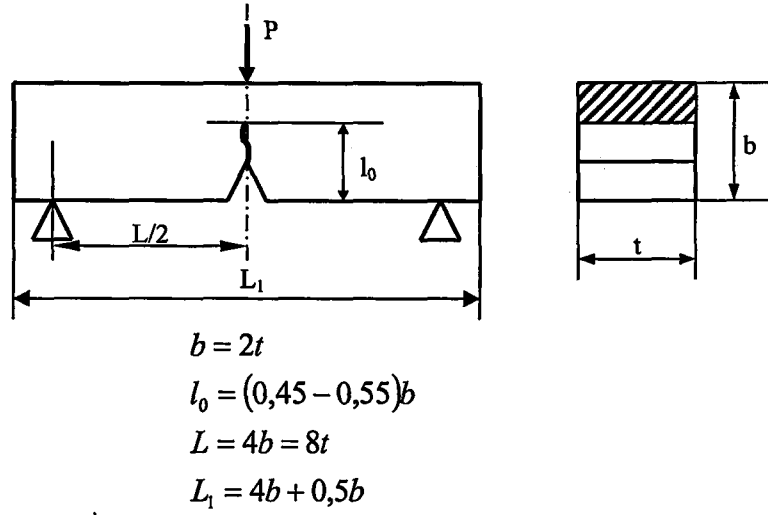
Şekil 3.16 ASTM standardına göre III. Tip numune şekli (şema).

III. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_3 \quad (3.25)$$

$$Y_3 = 13,74 \left[ 1 - 3,38 \left( \frac{l_0}{b} \right) + 5,572 \left( \frac{l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (3.26)$$

Şekil 3.17'de ise, numune üç nokta basma deneyine tabi tutulmaktadır.



Şekil 3.17 ASTM standardına göre IV. Tip numune şekli (şema).

IV. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q L}{t \sqrt{b^3}} Y_4 \quad (3.27)$$

$$Y_4 = 3,494 \left[ 1 - 3,396 \left( \frac{l_0}{b} \right) + 5,839 \left( \frac{l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (3.28)$$

Burada;

Y - numunenin sınırlı boyutunu göz önünde tutan parametre

t - numune kalınlığı

b - numune genişliği

$l_0$  - çatlak uzunluğu

Y, parametresi çatlakın nispi uzunluğu ile bağlı olup polinom, grafik veya tablo şeklinde verilebilmektedir. Formül (3.21, 3.23, 3.26 ve 3.28)'de Y polinom olarak verilmiştir.

### 3.5 COD ve J-İntegral Yöntemleri

Çoğu yapı çeliklerinin kırılma tokluğunu elde etmek için, ASTM E399 standardına göre, çok büyük boyutlarda çatlaklı numuneler gerekmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için bazı yöntemler geliştirilmiştir.

J-integral ve COD yöntemleri aşağıdaki formüllere göre tayin edilir (Hellan 1984).

COD;

$$\delta_c = \frac{8l\sigma_{ag}}{\pi E} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{ag}}\right); \delta_c = \frac{\pi l \sigma^2}{E \sigma_{ag}} = \frac{K_I^2}{E \sigma_{ag}} \quad (3.29)$$

J-integral;

$$J_{ic} = \frac{1-\nu^2}{E \sigma_{ag}} K_{ic}^2; B \geq (25-50) \quad (3.30)$$

Burada;

$\delta_c$  - çatlak ilerlemesinde tespit edilen ve çatlak açılmasını gösteren parametre

$l$  - çatlak uzunluğu

$\sigma$  - etki eden dış kuvvet

$\sigma_{ag}$  - akma gerilimi

$K_{ic}$  - kritik gerilim şiddet katsayısı

$E$  - Young modülü

$\nu$  - Poisson katsayısı

COD yöntemi büyük toleranslara yol açmaktadır. Çatlak açılma değeri  $\delta_c$ 'yi ölçme yeri tartışılan bir meseledir.

J-integral yöntemi deneysel açıdan basit değildir ve maliyeti yüksektir.

ASTM E-399 standardı ve bu iki alternatif yöntem, malzemenin kırılma tokluğunun hesaplanması ve malzeme seçimi için kullanılır. Ancak bu standart ve diğer iki yöntemin en yetersiz tarafı, herhangi bir kırılma mikro mekanizmasını, yani kırılmanın doğasını göz önünde tutmamasıdır. Dolayısıyla yüksek kırılma tokluğuna sahip alaşımları keşfetme yolunu göstermez.

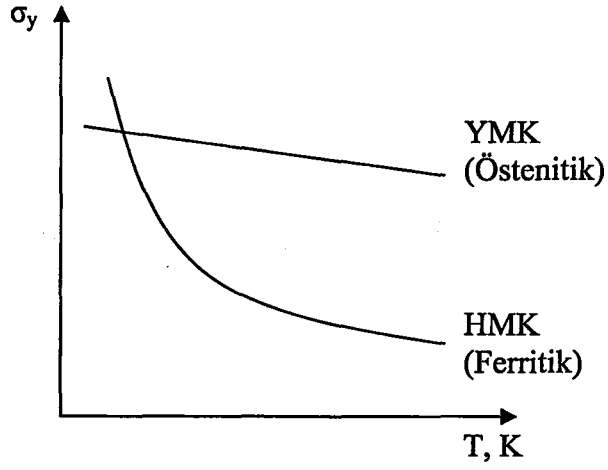
Aşağıda ortaya atılan tüm fikirler, malzemenin kırılma mikro mekanizmasını göz önünde tutarak, kırılma tokluğu  $K_{Ic}$ 'nin, malzemenin mekanik özellikleri ile bağlılığını ortaya çıkartma istikametinde ve bu mekanik özelliklere göre malzeme kırılma tokluğunun, malzeme iç yapısıyla, sıcaklıkla, deformasyon hızıyla, malzemenin pekleşme katsayısı ile bağlılığını elde etme üzerine olacaktır. Böylelikle bu çalışmada kullanılan bu yöntemin amacı,

- a-) Numune kalınlığını düşürmek veya çatlaklı numuneler üzerinde işlemler yapılmasını ortadan kaldırmak,
- b-) Kırılma tokluğunu malzemenin mekanik özellikleriyle bağlamak,
- c-) Yüksek kırılma tokluğuna sahip çelikler tasarlamak.

### **3.6 Kırılma Tokluğunun Malzemenin Mekanik Özellikleri ile Bağımlılığı**

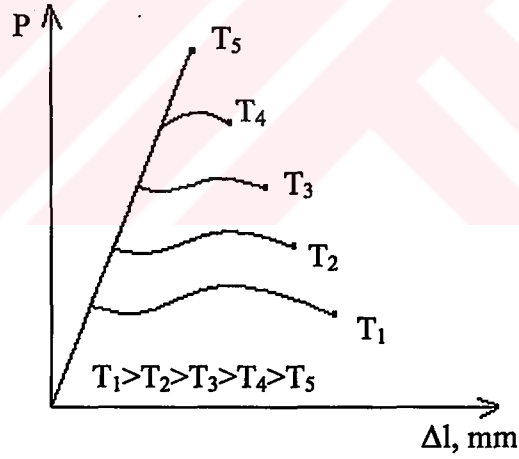
#### **3.6.1 Akma Geriliminin Sıcaklık ve Deformasyon Hızı ile Değişimi**

Aşağıda ortaya atılacak tüm fikirler metal ve alaşımlarda akma geriliminin sıcaklıkla değişimi göz önüne alınarak, HMK kafes yapısına sahip olan metal ve alaşımlarda geçerlidir (şekil 3.18).

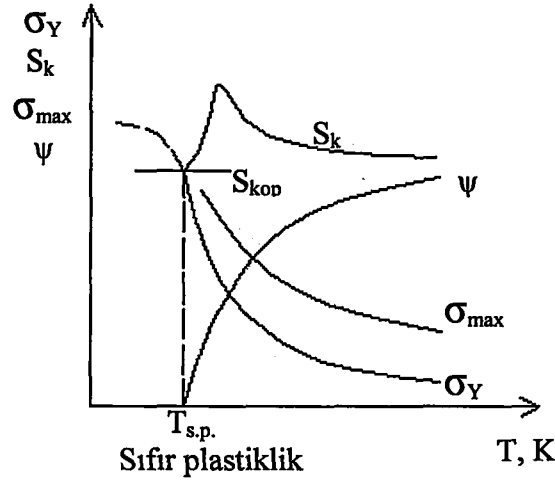


Şekil 3.18 Akma geriliminin, HMK ve YMK kafesine sahip metal ve alaşımlarda, sıcaklıkla değişimi.

Tek eksenli çekme deneylerinde elde edilen kuvvet-deformasyon ( $P-\Delta l$ ) grafiklerinin sıcaklıkla değişimi şematik olarak şekil 3.19'da, temel mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi ise şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 HMK kafesli metal ve alaşımlar için tek eksenli çekme deneylerinde elde edilen kuvvet-deformasyon grafiklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri (şema)



Şekil 3.20 Akma ( $\sigma_Y$ ), çekme ( $\sigma_{max}$ ) gerilimleri, kopma mukavemeti ( $S_k$ ) ve % daralma ( $\psi$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi (IOFFE şeması)

Söz konusu metal ve alaşımların gevrek kırılması için aşağıdaki iki şartın birlikte gerçekleşmesi gerekir (Kopelman 1978).

$$a) \sigma_1 \geq S_{kop}$$

$$b) \sigma_i \geq \sigma_y$$

(3.31)

Burada;

$\sigma_1$  - en yüksek normal gerilim değeri

$\sigma_i$  - gerilim konsantrasyonu bölgesinde eşdeğer gerilim değeri

$S_{kop}$  - Şekil 3.20'de  $\sigma_y = \sigma_{max} = S_k$  ( $\psi = 0$ ) şartına uygun malzemenin kopmaya direncini ifade etmektedir.

$S_{kop}$  sıcaklıkla, deformasyon hızıyla ve gerilim konsantrasyonu ile bağlı olmayarak sadece malzemenin tane boyutuna bağlıdır. Yani çeşitli ısıl işlem rejimleriyle tane boyutu değiştirilerek  $S_{kop}$  değiştirilebilir.

Tek eksenli çekme deneyinde (silindirik numunede)  $\sigma_i = \sigma_1$  ( $\sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = 0$ )'dir. Gevrek kırılmanın belirli bir ( $T = T_{s.p.}$ ) sıcaklığında gerçekleştiği göz önünde tutulursa formül (3.31)'den;

$$\varphi = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} = \frac{S_{kop}}{\sigma_y} \Big|_{T = T_{sp}} \quad (3.32)$$

Burada;  $\varphi$  - gerilim durumunu ifade eden bir katsayı

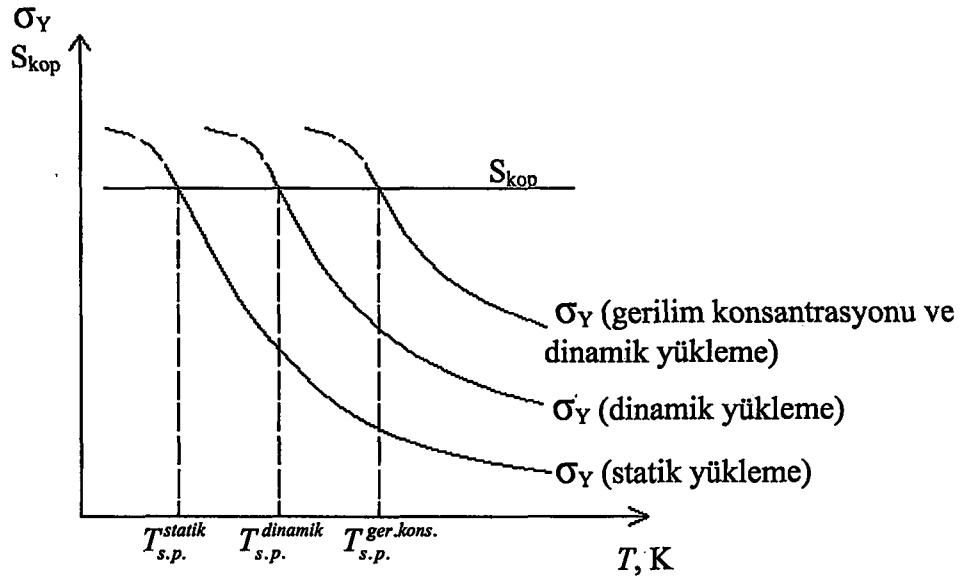
Eşdeğer gerilimi ( $\sigma_i$ ) bulmak için Von Mizes kriteri kullanılır.

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.33)$$

Burada;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - her hangi bir gerilim konsantrasyonu kökünde meydana gelen normal gerilimler

Gerilim durum katsayısı, gevrek kırılma sıcaklığında herhangi bir gerilim konsantrasyonu kökünde meydana gelen gerilimin, malzemenin akma geriliminden kaç kat yüksek olduğunu gösteren bir parametredir (Tabii ki gerilim konsantrasyonu olmayan bir numune için bu katsayı 1'e eşittir). Numunede gerilim konsantrasyonu varsa, bu katsayının değeri değişir.

Söz konusu metal ve alaşımların sünek – gevrek geçiş sıcaklık sınırına, bazı çalışma şartlarının etkisi IOFFE şeması üzerinde açıklanır (şekil 3.21) (Kopelman 1978).



Şekil 3.21 Bazı çalışma şartlarının sünek – gevrek geçiş sıcaklık sınırına etkisi (IOFFE şeması).

1970' li yıllarda Yarashevich tarafından “*dislokasyonların çiftli eğilerek hareketi modeli*” esasında akma geriliminin sıcaklıkla ve deformasyon hızı ile bağımlılığını göz önünde tutan bir formül elde edilmiştir. Bu formülün temelini Bekker formülü oluşturmaktadır. Bekker formülüne göre, deformasyon hızı ve aktivasyon enerjisi arasındaki bağlantı (Becker 1925);

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{H(\tau)}{RT}\right) \quad (3.34)$$

Burada;

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{l} - \text{deformasyon hızı} \left(\frac{1}{sn}\right)$$

V - çekme cihazının çenelerinin hareket hızı (mm/sn)

l - silindirik numunenin iş uzunluğu (mm)

$\dot{\epsilon}_0$  - incelenen malzeme içerisinde, dislokasyonların hareket tavrını ve yoğunluğunu göz önünde tutan ve deformasyon hızı birimine sahip olan bir parametredir. Söz konusu çelik ve alaşımlar için ortalama  $\dot{\epsilon}_0 \approx 10^5 \text{ sn}^{-1}$  dir.

R - gaz sabiti

T - mutlak sıcaklık (K)

Kayma gerilimine bağlı olan aktivasyon enerjisi (Yarashevich 1970);

$$H(\tau) = H_0 \ln\left(\frac{\tau(0) - \tau_0}{\tau - \tau_0}\right) \quad (3.35)$$

Burada;

$\tau(0)$  - kayma geriliminin 0 K'deki değeri.

$\tau_0$  - kayma geriliminin sıcaklıkla bağımsız (atermik) değeri.



$\tau$  - etki eden kayma gerilimi.

$H_0$  - aktivasyon enerjisi birimine sahip olan bir sabit.

Genellikle teorik formülleri elde etmek için gerilim değeri olarak, kayma gerilimi göz önünde tutulur. Çünkü dislokasyonlar kayma gerilimi etkisiyle hareket eder. Ancak kayma gerilimi yerine akma gerilim seviyesindeki normal gerilim ( $\sigma$ ) değeri kullanılırsa aktivasyon enerjisi (Saidov 1989);

$$H(\sigma_y) = H_0 \ln \left( \frac{\sigma_y(0) - \sigma_0}{\sigma_y - \sigma_0} \right) \quad (3.36)$$

Burada:

$\sigma_y(0)$  - akma geriliminin  $T=0$  K'deki değeri.

$\sigma_0$  - akma geriliminin atermik (sıcaklıkla bağımsız) değeri.

$\sigma_y$  - akma gerilimi.

Formül (3.34) ve (3.36) birleştirilerek bazı değişiklikler yapılırsa,

$$\sigma_y = \sigma_0 + A e^{-\alpha T} \quad (3.37)$$

Burada

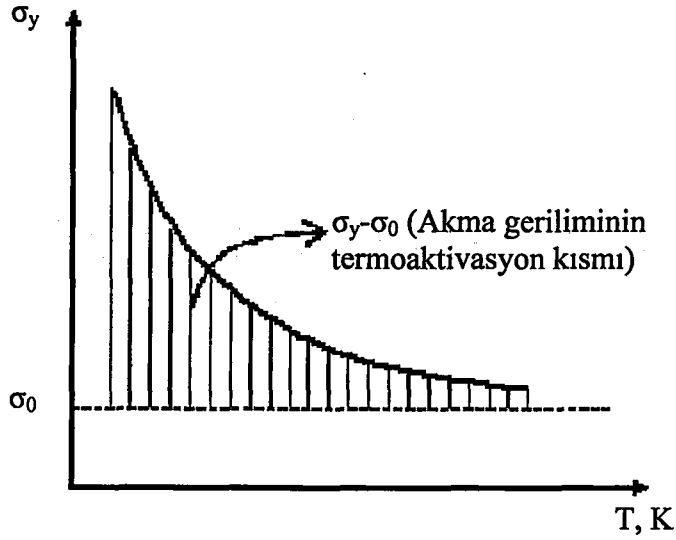
$A = \sigma_y(0) - \sigma_0$  - akma geriliminin  $T = 0$  K sıcaklığındaki etkili değeri

$\alpha = \frac{R}{H_0} \ln (\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$  - akma geriliminin belirli bir deformasyon hızında sıcaklığa

hassasiyetini ifade eden bir parametre

Formül (3.37), akma geriliminin deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve sıcaklıkla ( $T$ ) bağımlılığını göstermektedir. Deformasyon hızı arttıkça,  $\alpha$  azalır ve  $\sigma_y$  değeri artar.

Formül (3.37)'in grafiksel ifadesi şekil 3.22'deki gibidir.

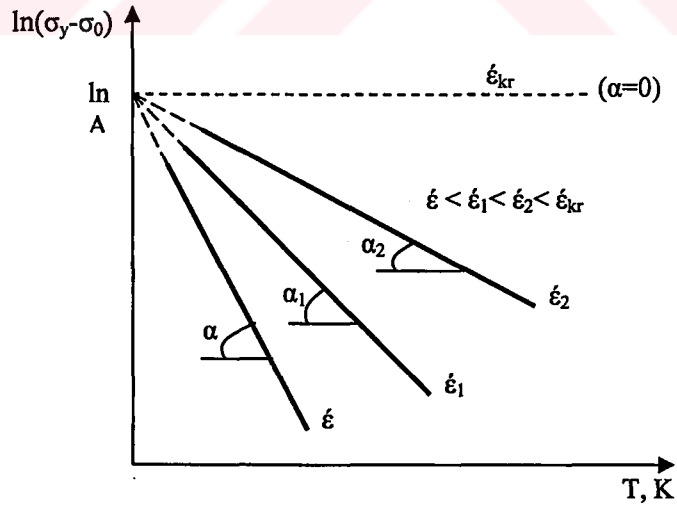


Şekil 3.22 Akma geriliminin atermik ( $\sigma_0$ ) ve termoaktivasyon kısımlarını ifade eden bir şema.

Formül (3.37)'de bazı değişiklikler yapılarak her iki tarafın logaritması alınırsa;

$$\ln(\sigma_y - \sigma_0) = \ln A - \alpha T \quad (3.38)$$

Formül (3.38) yarı logaritma  $\ln(\sigma_y - \sigma_0) - T$  koordinat alanında doğru çizgiyi ifade etmektedir (şekil 3.23).



Şekil 3.23  $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ 'nın, çeşitli deformasyon hızlarında, sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.23'den görüldüğü üzere deformasyon hızı arttıkça, malzemenin akma gerilimi artmakta ve aynı zamanda akma geriliminin, sıcaklığa göre, deformasyon

hızına hassasiyeti zayıflamaktadır.  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{kr}$  olduğunda akma geriliminin, deformasyon hızına hassasiyeti olmaz.

### 3.6.2 Kırılma Hipotezi ve Mikro Mekanizması

Az karbonlu düşük alaşımlı çelikler (HMK kafesli metal ve alaşımlar) için kırılma tokluğunun çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisi ile eksponansiyel bağlılığı hakkında hipotez kabul edilmiştir (Saidov 1989). Kabul edilen hipoteze göre kırılma tokluğu ( $K_{ic}$ ) aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$K_{ic} = K_{ic}^0 \exp(\alpha m T) \quad (3.39)$$

Burada;

$K_{ic}^0$  -  $K_{ic}$ 'in  $T = 0$  K sıcaklıktaki değeri

$m$  - kırılma tokluğunun sıcaklığa hassasiyetini ifade eden katsayı

Söz konusu çelikler için  $K_{\mu}$  kırılma modelinin temelini, çatlak ucundan belirli bir mesafede ( $\rho_c$ ) meydana gelen kritik gerilim ( $\sigma_c$ ) etkisi altında, mikro çatlağın meydana gelmesi ve bu çatlağın ana çatlığa doğru hareket ederek ana çatlak ile birleşmesi (aynı işlem defalarca tekrar etmektedir) sonucunda, ana çatlağın ilerlemesi oluşturur. Bu kırılma mekanizmasına göre, kırılma tokluğu için aşağıdaki formül elde edilmiştir (Krasovsky 1983).

$$\frac{K_{ic}}{K_{\mu}} = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_y} \right)^{\frac{1-n}{2n}} \quad (3.40)$$

Burada:

$$K_{\mu} = \sigma_c \sqrt{\pi \rho_c} \quad (3.41)$$

$\sigma_c$  - çatlak ucunda  $\rho_c$  mesafede meydana gelmiş olan kritik gerilim değeri.

n - malzemenin deformasyon etkisinden oluşan pekleşme katsayısı.

Formül (3.40)'da yer alan  $K_\mu$  ve  $\sigma_c$  değerleri, sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı değildir (Krasovsky 1983).

Bu yöntemin uygulanabildiği alanlar:

- 1 ) HMK kafesli metal ve alaşımlar;
- 2 )  $0 \leq T \leq 0.2 T_{er.}, K$ ;
- 3 )  $\epsilon \leq \epsilon_{kr}$ ;

Formül (3.39)'da bazı değişiklikler yapılarak logaritması alınırsa,

$$\ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = \alpha m T \text{ olur.} \quad (3.42)$$

Formül (3.40)'da  $\sigma_c$  ve  $K_\mu$  sıcaklık ve deformasyon hızı ile bağımsız olduğu göz önünde tutularak  $K_{ic}$  için, aşağıdaki eşitlikler kabul edilmiştir (Saidov 1989).

- a )  $K_\mu = K_{ic}^0$
- b )  $\sigma_c = \sigma_y(0) - \sigma_0 = A$  (3.43)
- c )  $\rho_c \approx d$

Formül (3.43)'deki a ve b eşitlikleri formül (3.40)'da göz önünde tutulursa,

$$\frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = \left(\frac{A}{\sigma_y}\right)^{\frac{1-n}{2n}} \text{ veya } \ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = \frac{1-n}{2n} \ln\left(\frac{A}{\sigma_y}\right) \text{ olur.} \quad (3.44)$$

Formül (3.42) ve (3.44)'ün sol tarafları birbirine eşittir. Buna göre;

$$\alpha m T = \chi \ln\left(\frac{A}{\sigma_y}\right) \quad (3.45)$$

Burada;

$$\chi = \frac{1-n}{2n} \quad (3.46)$$

### 3.6.3 Düzlemsel Deformasyon Şartının Yerine Getirilmesi ve Kırılma Tokluğu Formülünün Çıkarılması

Kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ), çatlak ucunda düzlemsel deformasyon şartını (gevrek kırılma) göz önünde tuttuğu için, formül (3.32)'de yer alan  $(\frac{\sigma_1}{\sigma_i})$  oranı değerlendirilmelidir. Bu orandaki  $\sigma_i$ , formül (3.33)'e göre değerlendirilir. Muskhelishvili ve Vestergat'ın çözümüne göre, düzlemsel deformasyon şartlarında çatlak ucunda meydana gelen  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{xy}$  gerilmeleri formül (3.10)'da verilmiştir.

Formül (3.10)'a göre esas çekme gerilmeler;

$$\sigma_{1,2} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 \pm \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (3.47)$$

Çatlağın ilerleme yönü boyunca ( $\theta = 0$ ) ince levha için (düzlemsel gerilim);

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y = \sigma_1 = \sigma_2 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \\ \tau_{xy} = \sigma_z = \sigma_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Düzlemsel deformasyon şartlarında  $\theta = 0$  için;

$$\sigma_3 = 2\nu \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.49)$$

Böylelikle;

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad \sigma_3 = 2\nu\sigma_1 = 2\nu\sigma_2 \quad (3.50)$$

Bu değerler formül (3.33)'e konulursa;

$$\sigma_i = \sigma_1(1-2\nu) \quad (3.51)$$

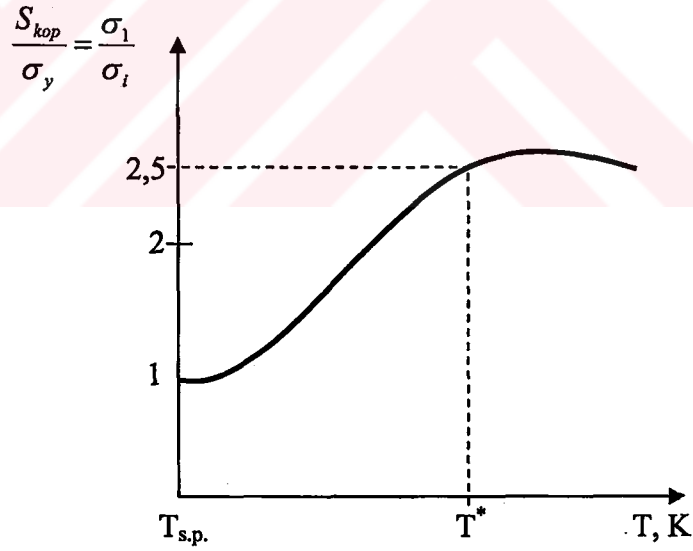
Sonuçta formül (3.32) Şu Şekilde yazılır.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_i} = \frac{1}{(1-2\nu)} \quad (3.52)$$

Söz konusu çelikler için  $\nu = 0,3$  kabul edilirse;

$$\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} = 2,5 \quad (3.53)$$

Formül (3.53)'de yer alan  $\frac{S_{kop}}{\sigma_y}$  oranının sıcaklıkla iliŐkisi Şematik olarak Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.24  $\frac{S_{kop}}{\sigma_y}$ 'in sıcaklığa göre değişimi.

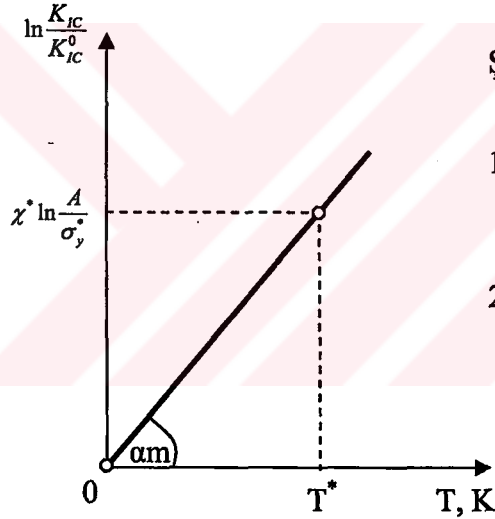
Şekil 3.24'e göre elde edilmiş olan  $T^*$  sıcaklığı formül (3.45)'e konulursa;

$$\alpha m = \frac{\chi^*}{T^*} \ln \frac{A}{\sigma_y^*} \quad (3.54)$$

Formül (3.54)'den  $\alpha m$  değeri formül (3.44)'e konulursa;

$$\ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = \alpha m T = \frac{T}{T^*} \chi^* \ln \frac{A}{\sigma_y^*} \quad (3.55)$$

Formül (3.55),  $\ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0}$ -T koordinat alanında  $\alpha m$  açısı altında çizilmiş olan doğru çizgiyi ifade etmektedir (şekil 3.25).



Şekil 3.25'deki noktaların koordinatları;

$$1) T = 0K; \quad \ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = 0$$

$$2) T = T^*K; \quad \ln \frac{K_{ic}}{K_{ic}^0} = \chi^* \ln \frac{A}{\sigma_y^*} \text{ olur.}$$

Şekil 3.25 Kırılma tokluğunun sıcaklığa göre değişimi (şema).

Böylelikle kırılma tokluğu ve sıcaklık arasındaki ilişki aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$K_{ic} = K_{ic}^0 \exp \left[ \frac{T}{T^*} \chi^* \ln \frac{A}{\sigma_y^*} \right] = K_{ic}^0 \left( \frac{A}{\sigma_y^*} \right)^{\frac{\chi^* T}{T^*}} \quad (3.56)$$

Burada  $\chi^* = \frac{1-n^*}{2n^*}$

Malzemenin tane boyutu göz önünde tutulursa;

$$K_{Ic} = A\sqrt{\pi d} \left( \frac{A}{\sigma_y^*} \right)^{\frac{\chi^*}{1-\chi^*}} \quad (3.57)$$



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Kırılma Tokluğunu Saptama Yöntemi

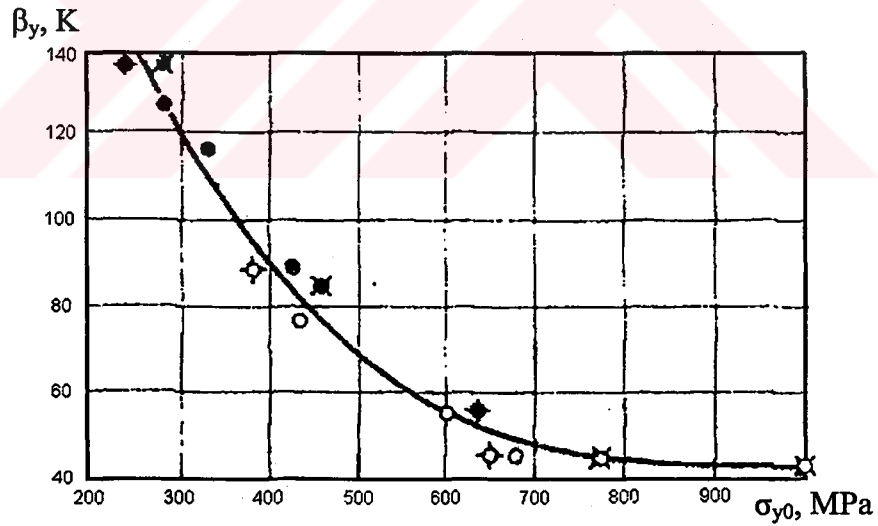
Tek bir oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçlarına göre akma geriliminin sıcaklıkla bağımlılık grafiği elde edilebilir. Bunun için Makhutov tarafından ortaya atılan formül kullanılır (Makhutov 1973).

$$\sigma_{y(T)} = \sigma_{y_0} \exp\left[\beta_y \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (4.1)$$

Burada;

$\sigma_{y_0}$  - akma geriliminin  $T_0 = 293\text{K}$ 'deki değeri.

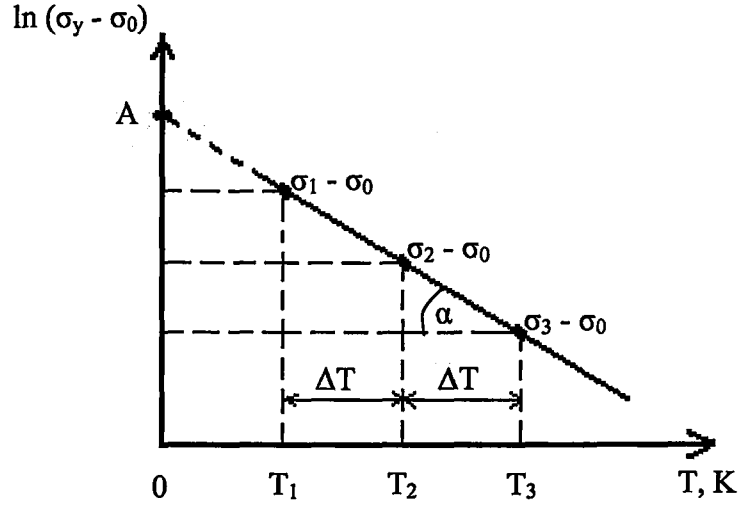
$\beta_y$  ile  $\sigma_{y_0}$ 'nin bağımlılığı şekil 4.1'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.1 Akma geriliminin  $\beta_y$  ile ilişkisini gösteren grafik (Makhutov 1973).

Formül (3.37)'de  $\sigma_0$ ,  $A$ ,  $\alpha$  parametrelerinin belirlenmesinde formül (4.1) kullanılır. Bunun için çeşitli sıcaklıklarda (örneğin; 150, 200, 250 K) formül (4.1)'e göre  $\sigma_y$  değerleri hesaplanır.

Şekil 4.2’de akma geriliminin atermik ( $\sigma_0$ ) kısmını değerlendirmek için bir şema gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Akma geriliminin atermik ( $\sigma_0$ ) kısmını değerlendirme üzerine bir şema.

Şekil 4.2’ye göre üç nokta (sıcaklık) üzerinde  $\sigma_0$ ;

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_3}{2\sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (4.2)$$

$\alpha$  ve A parametreleri ise aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_2 - \sigma_0}\right)}{\Delta T} \quad (4.3)$$

$$A = (\sigma_1 - \sigma_0)e^{\alpha T_1} = (\sigma_2 - \sigma_0)e^{\alpha T_2} = (\sigma_3 - \sigma_0)e^{\alpha T_3} \quad (4.4)$$

Silindirik numune için sıfır plastikliği sağlayan sıcaklık  $T_* = T_{s.p.}$

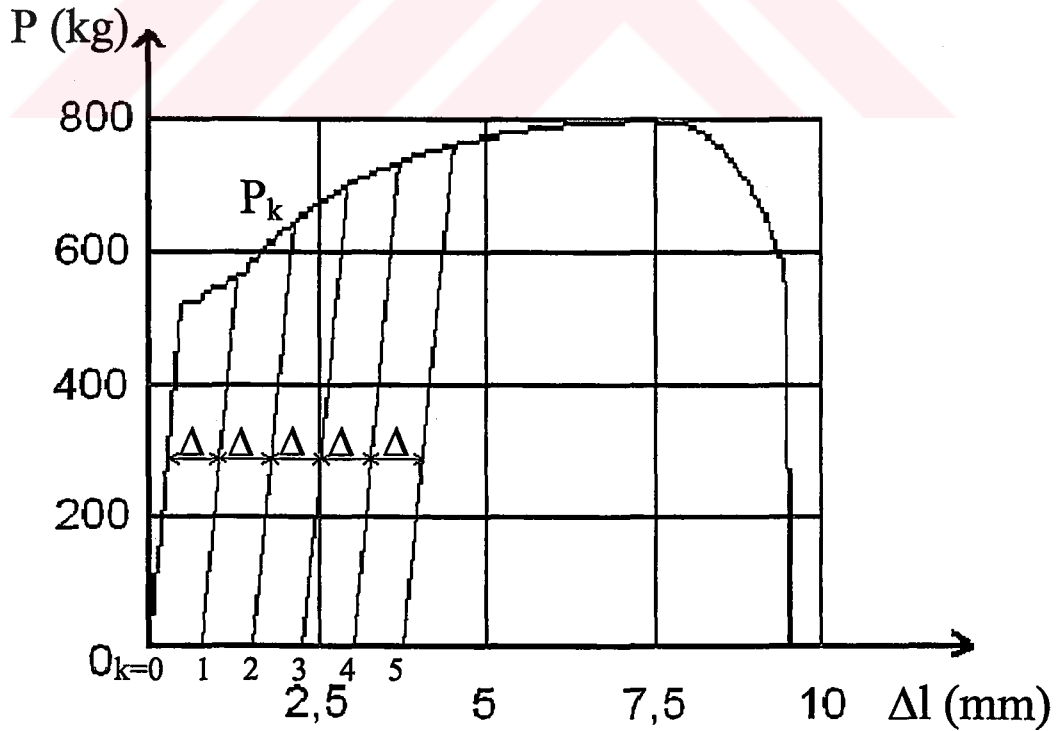
( $\sigma_y = \sigma_{\max} = S_k$ );

$$T^* = \left[ \frac{1}{T_0} + \frac{\ln\left(\frac{S_{k0}}{\sigma_{y0}}\right)}{\beta_y} \right]^{-1} \quad (4.5)$$

Burada;  $S_{k0}$  - kopma mukavemeti  $S_k$  'in  $T_0 = 293$  K'deki değeri

Bulunan  $T^*$  sıcaklığı formül (3.37)'de yerine konularak  $S_{kop}$  değeri bulunur. Şekil 3.24'deki grafikte, formül (3.53)'deki eşitliği sağlayan  $T^*$  sıcaklığı elde edilir. Elde edilmiş olan bu değerler formül (3.37)'de yerine konularak, sünek – gevrek geçiş sıcaklık sınırı ( $T^*$ ) ile, bu sıcaklığa uygun gerilim değeri ( $\sigma_y^*$ ) bulunur.

Formül (3.57)'de  $\chi$ 'yı tayin etmek için, pekleşme katsayısının bulunması gereklidir. Şekil 4.3'de gösterilen kuvvet-deformasyon grafiğini, gerçek gerilim-gerinim grafiğine çevirmek için, P- $\Delta l$  grafiğinde orantılı deformasyon bölgesini 5-6 eşit bölüme ayırmak gerekir. Örnek bir malzemenin kesitlere bölünmüş olan P- $\Delta l$  grafiği şekil 4.3'de gösterilmiştir (Saidov 1989).



Şekil 4.3 Örnek bir numunenin kesitlere bölünmüş olan P- $\Delta l$  grafiği

Şekil 4.3'e göre gerçek gerilim ve gerinim arasındaki ilişki;

$$\sigma_i = B \varepsilon_i^n \quad (4.6)$$

Bu formülün logaritması ise;

$$\ln \sigma_i = \ln B + n \ln \varepsilon_i \quad (4.7)$$

Formül (4.7)'deki B' yi (modül) tayin etmek için  $\varepsilon_i = 1$  değerinde  $\sigma_i$  bulunur.

Formül (4.6)'daki  $\sigma_i$  ve  $\varepsilon_i$ , şekil 4.3'deki P -  $\Delta l$  grafiği üzerinde, aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_i = \frac{P_k}{A_0} \left(1 + \frac{k\Delta}{l_0}\right) \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_i = \ln\left(1 + \frac{k\Delta}{l_0}\right) \quad (4.9)$$

Burada;

$P_k$  - bölünmüş kesitlerin kuvvet değeri

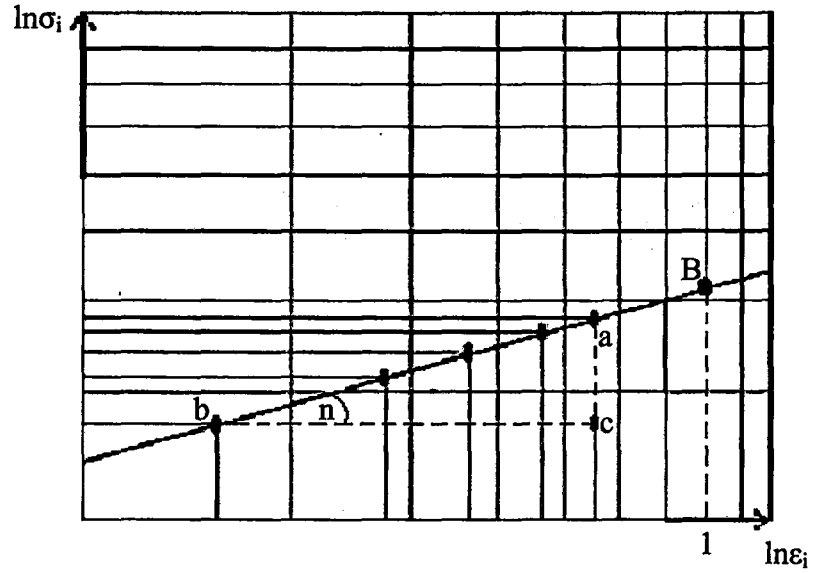
$A_0$  - numunenin ilk kesit yüzeyi

$k$  - bölümlene sayısı

$\Delta$  - bölümlenmiş kesitler arasındaki mesafe

$l_0$  - numunenin ilk uzunluğu

Formül (4.7), çift logaritma koordinat alanında doğru çizgiyi ifade etmektedir (şekil 4.4).



Şekil 4.4  $\ln \sigma_i - \ln \varepsilon_i$  logaritmik değişimi.

Şekil 4.4'de çizilen  $\ln \sigma_i - \ln \varepsilon_i$  logaritmik değişim grafiğindeki doğru çizginin eğimi, pekleşme katsayısını ( $n$ ) vermektedir. Pekleşme katsayısı  $n$ , aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$n = \ln \frac{\sigma_a}{\sigma_c} / \ln \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_b} \quad (4.10)$$

#### 4.2 Tane Boyutunu Tayin Etme

Formül (3.57)'de yer alan malzemenin tane boyutu  $d$ 'yi tayin etmek için metalografik olarak hazırlanmış ve dağlanmış olan numuneler kullanılır. Ancak bazı çeliklerde tane sınırlarının net bir şekilde görülmesi zordur. Bunun için bazı özel yöntemler kullanılır. Bu yöntemler östenit tane sınırlarını tayin etmek için uygulanır (Geller 1983).

#### 4.2.1 Sementasyon Yöntemi

Sementasyon işlemine uğratılan düşük C'lu çelikler için sementasyon yöntemi kullanılır. Numuneler sızdırmaz demir kutularda sementasyonlaştırıcı ortamda (%40 BaCO<sub>3</sub>, %60 odun kömürü veya %30 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, %70 odun kömürü) 930 ±10 °C'de 8 saat bekletilir. Bu kutu ile birlikte 600 °C'ye kadar soğutulduktan sonra soğutma havada gerçekleştirilir. Daha sonra metalografik numuneler hazırlanır. Yüzeyden 2 mm derinlik taşlanır ve özel reaktiflerle dağlanır. Tane boyutu sementasyon tabakasının ötektik üstü bölgesinde sementit ağına göre tayin edilir. Sementit ağı ise östenit tane sınırlarında meydana gelir (Geller 1983).

#### 4.2.2 Oksitleme Yöntemi

Yapı ve alet çelikleri için kullanılır. Parlatılmış metalografik numuneler vakum veya inert atmosferli fırında su verme sıcaklığından 20-30 °C daha yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak 3 saat bekletilir. Sonra fırına 30-60 saniye hava verilir ve numuneler suda soğutulur. Bu işlemlerden sonra numuneler yeniden parlatılır ve % 15 HCl, %85 etil alkol ile dağlanır. Tane sınırları oksit ağına göre tayin edilir (Geller 1983).

#### 4.2.3 Su Verilmiş Çeliklerin İlk Östenit Tane Sınırını Tayin Etme Yöntemi

Martenzit ve Beynit elde etme amacıyla su verilmiş çeliklerin ilk östenit tane sınırlarını tayin etmek için bu yöntem kullanılır. Bu yöntemde de numuneler önceki iki yöntemdeki gibi ısıtılır. Yağda ve suda soğutulur. Sonra 15-30 dk içerisinde 225-250 °C'de temperlemeye tabi tutulur. Metalografik olarak numune hazırlandıktan sonra taze pikrin [(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>OH] asidiyle dağlanır. Dağlama süresi 5-30 dk.'dır (Geller 1983).

#### 4.2.4 Ferrit veya Sementit Ağını Elde Etme Yöntemi

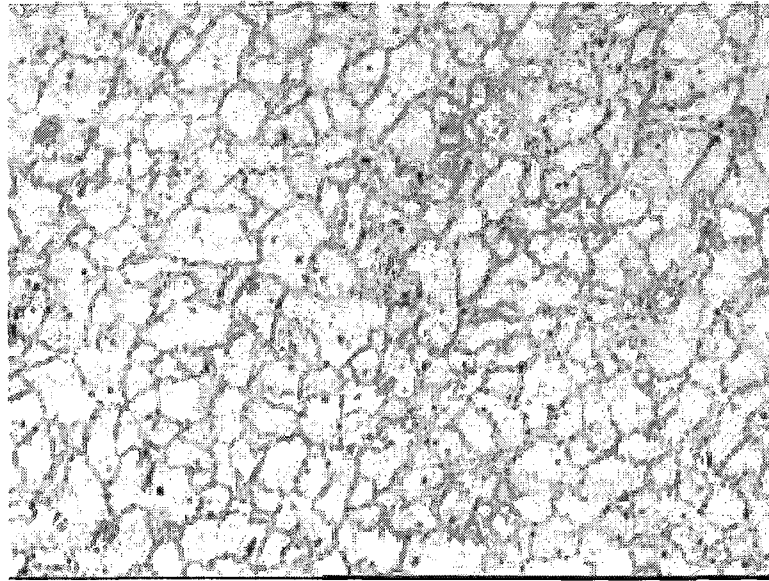
C miktarı % 0.6'ya kadar olan çelikler için Ferrit ağı yöntemi kullanılır. Bu yöntemde önceki yöntemlerdeki gibi ısıtılır ve sonra soğutulur. Ancak % 0.3-

0.5 C'lu çelikler havada, % 0.5-0.6 C'lu çelikler ise 50-100 °C/saat hız ile soğutulur. Sonra numuneler suda soğutulurarak numune metalografik olarak hazırlanır. Tane sınırları sementasyon yönteminde kullanılmış olan dağlayıcı ile görünür hale gelmektedir (Geller 1983).

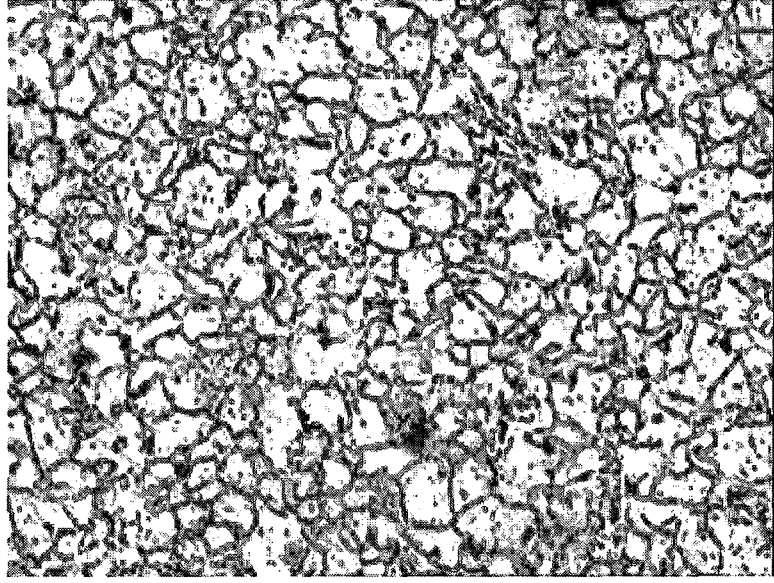
#### 4.2.5 Troostit Filesini Elde Etme Yöntemi

Numuneler önceki yöntemlerdeki gibi (sementasyon yöntemi hariç) ısıtılır ve numunenin yarısı havada yarısı ise suda soğutulur. Bu durumda numunenin geçiş bölgesinde troostit filesiyle kuşatılmış olan martenzit yapı meydana gelir. Bu yapı N veya pikrin asidinin ispirotoda çözeltisinde dağlama ile elde edilir (Geller 1983).

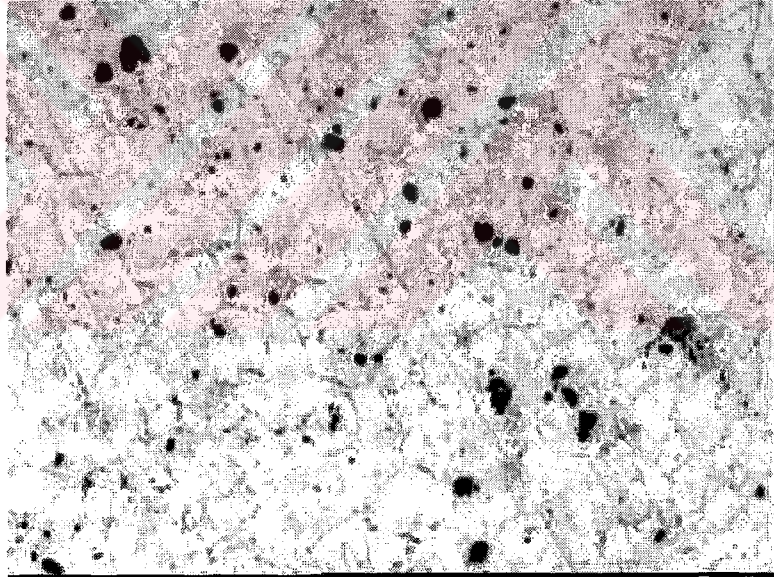
Bu çalışmada bütün çeliklere oksitleme yöntemi uygulanarak tane sınırları tespit edilmiştir. İncelenen numuneler Olympus marka mikroskopta, tane sınırları en net görülebilecek şekilde (100, 200 defa) büyütülerek, fotoğrafları çekilmiştir. Sadece çeliklerin satıldığı durum ve tam tavlama ısıl işleminden sonraki iç yapılar Ulu'nun tez çalışmasından (Ulu 2004) alınmıştır. Aşağıdaki şekillerde oksitleme işlemine tabi tutulmuş numunelerin iç yapı fotoğrafları verilmiştir. Aşağıdaki fotoğraflarda bulunan siyahlıklar dağlama hatalarıdır.



Şekil 4.5. 870 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x)

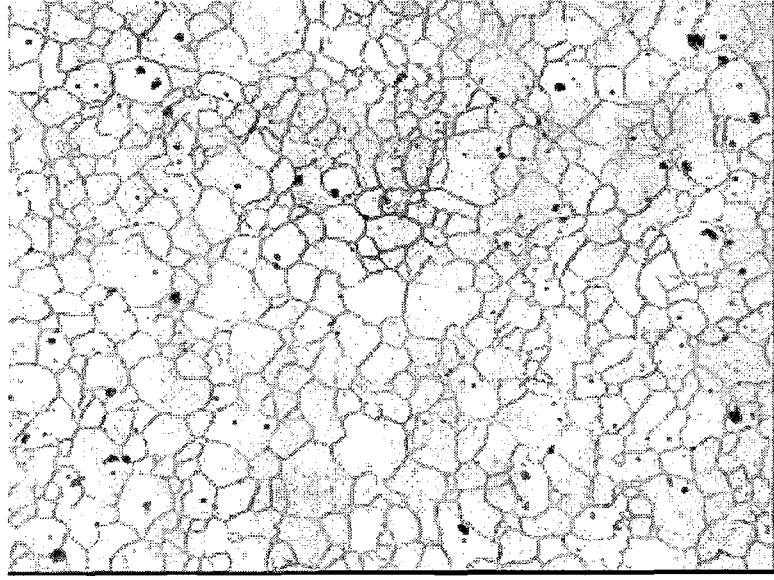


Şekil 4.6. 800 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x).

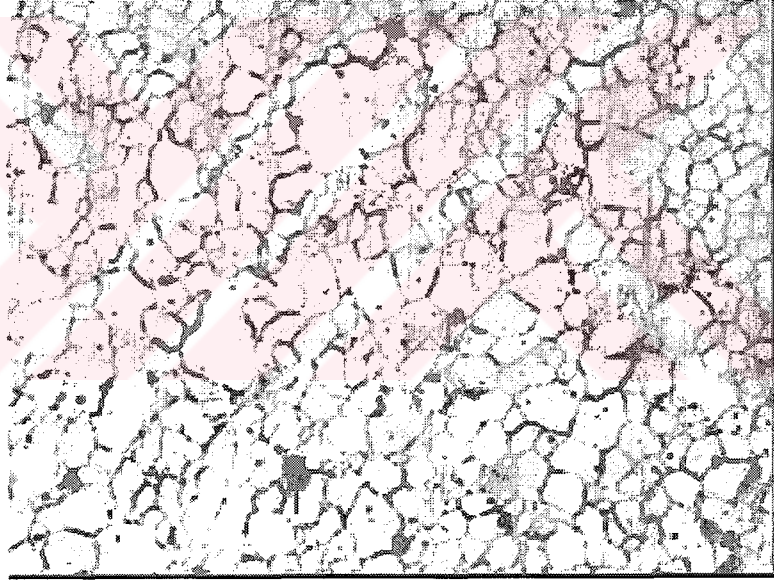


Şekil 4.7. 735 °C'de su verilmiş 8620 çeliğinin iç yapısı (200x).

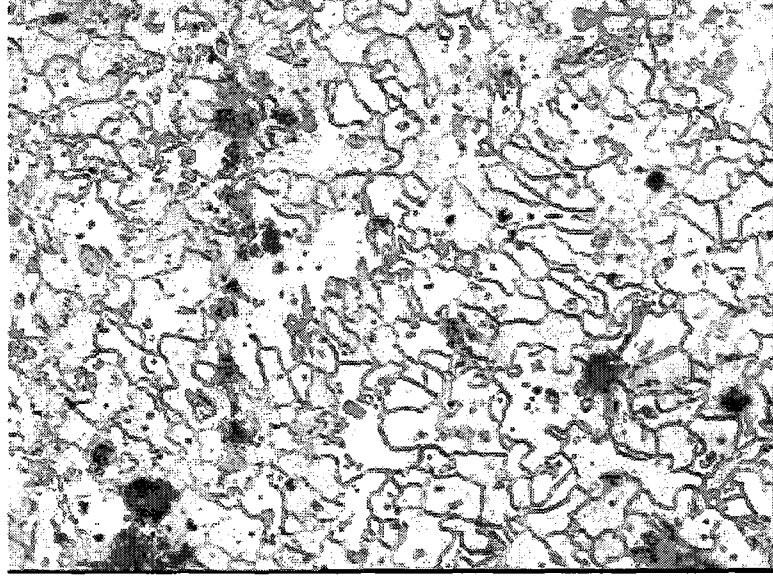




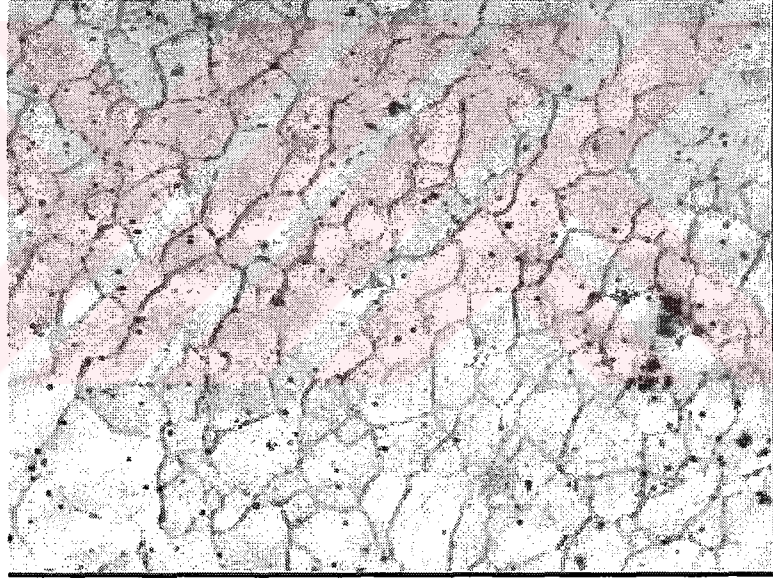
Şekil 4.8. 810 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (100x).



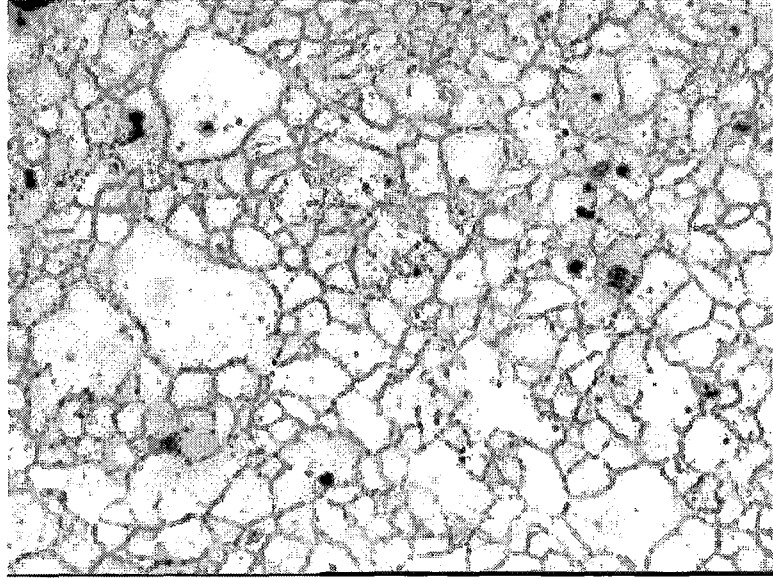
Şekil 4.9. 765 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (200x).



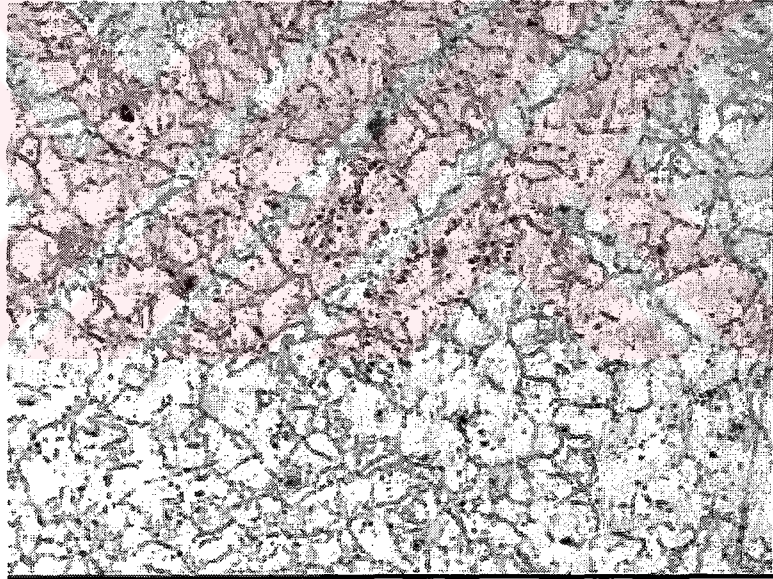
Şekil 4.10. 735 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (200x).



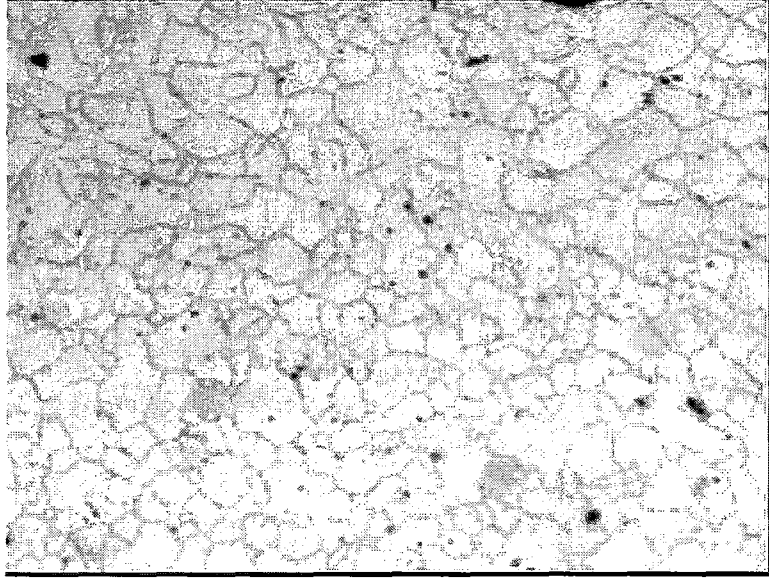
Şekil 4.11. 810 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).



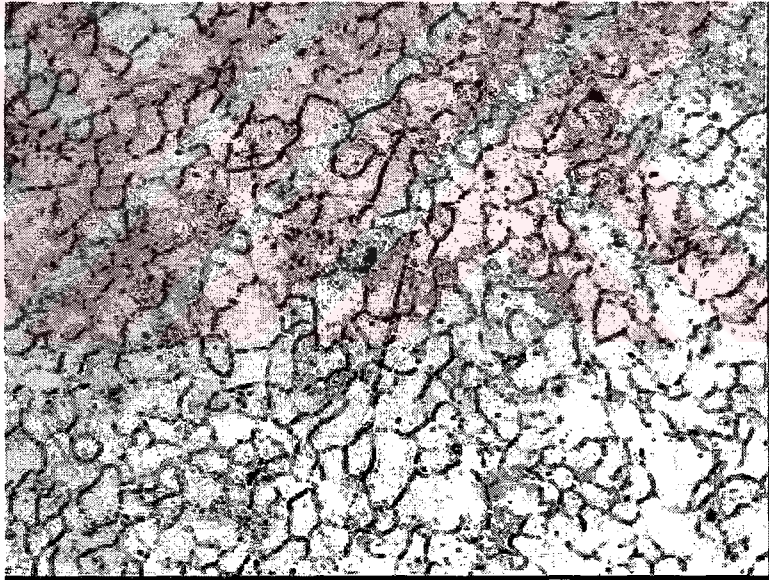
Şekil 4.12. 765 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).



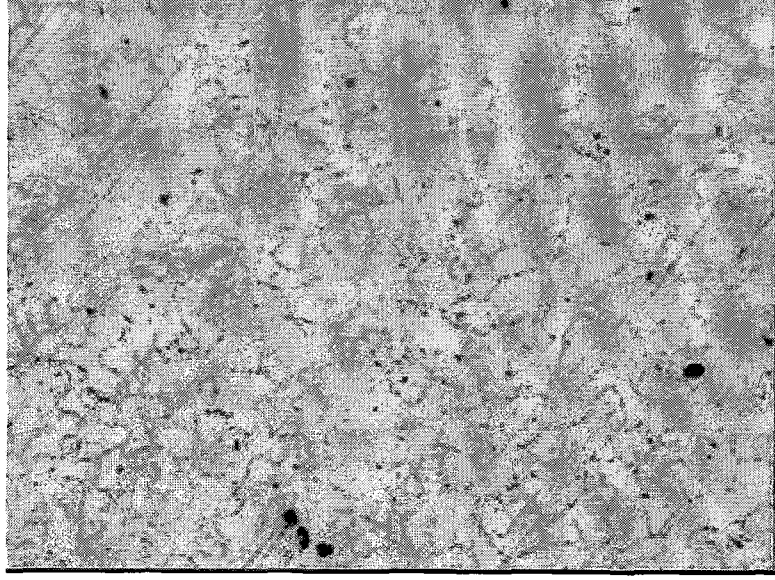
Şekil 4.13. 735 °C'de su verilmiş 4140 çeliğinin iç yapısı (200x).



Şekil 4.14. 800 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).

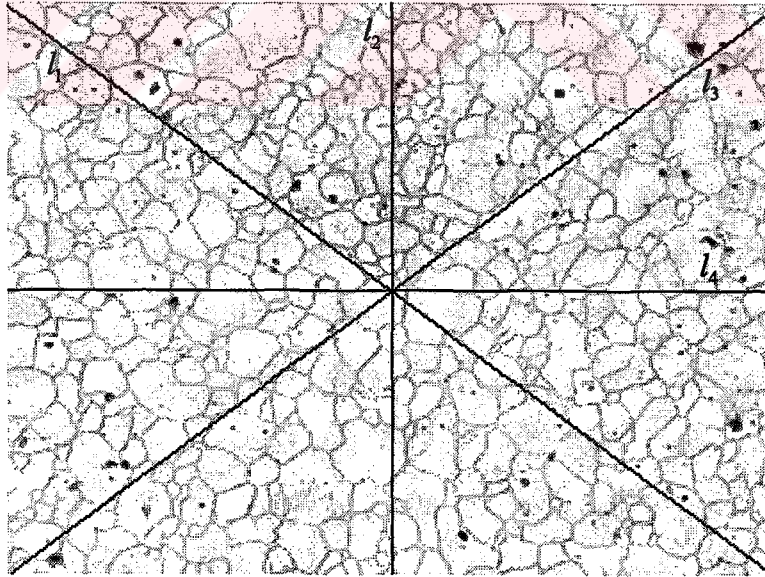


Şekil 4.15. 750 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).



Şekil 4.16. 735 °C'de su verilmiş 1050 çeliğinin iç yapısı (200x).

İç yapıdan malzemenin ortalama tane çapını bulmak için aşağıdaki yöntem kullanılır. Bunun için aşağıdaki şekildeki gibi resim üzerine 4 adet çizgi çizilir. Burada örnek olarak, 810 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısı (100x) gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 810 °C'de su verilmiş 1040 çeliğinin iç yapısından (100x) tane çapının belirlenmesi.

Bu çizilen çizgilerin toplam uzunlukları ve çizgilerin kesmiş olduğu tane sınırının toplam sayısı hesaplanır ve aşağıdaki formülde yerine yazılır.

$$d_{ort} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)Q} \quad (4.11)$$

Burada;

$Q$  - fotoğrafların büyütme oranı

$l_{1,2,3,4}$  - doğruların uzunlukları

$N_{1,2,3,4}$  - doğru üzerine düşen tane sınırı sayısı

Bu yöntemi uygulayabilmek için  $N > 10$  olmak zorundadır.

4140 çeliğinin satıldığı durum ve tam tavlama için çekilmiş olan iç yapılar tane sınırı hakkında bilgi vermemektedir. Bu yüzden 4140 çeliği için oksitleme yöntemiyle 810 °C'den su verilmiş olan numuneden çekilen iç yapıdan ortalama tane çapı bulunmuştur.

Böylece bulunmuş olan parametreler yerine konularak formül (3.57) ile kırılma tokluğu hesaplanabilir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1 İncelenen Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Saptanan Parametreler

Yukarıda açıklanan fikirler ışığında kırılma tokluğunun saptanması için 4 çelik üzerinde incelemeler yapılmıştır. Ulu'nun (Ulu 2004) yüksek lisans çalışmasında, bu çeliklere mekanik özelliklerin geliştirmek için ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Bu mekanik değerler temel alınarak, uygulanan ısıtma işlemlerinin kırılma tokluğuna etkisi incelenmiştir. Bunun için Ulu'dan (Ulu2004) alınan değerler ve bu çalışmada saptanan pekleşme katsayısı  $n$ , tane çapı  $d$  ve şekil 4.1'den  $\sigma_{yo}$  ile saptanan  $\beta_y$  değerleri ile kırılma tokluğu hesaplanmıştır.

Bu değerler her bir çelik ve her bir ısıtma işlem rejimi için çizelge 5.1'de verilmiştir. Pikleşme katsayısı ve yukarıda incelenmiş olan fikirler üzerinde mekanik değerler yerine konularak kırılma tokluğu ve diğer parametreler Ek'teki programla saptanmıştır. Saptanan bu değerler çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu programla, Makhutov ve Yarashevich formüllerinin ve kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği de çizdirilmiştir.

Çizelge 5.1 Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan değerler.

Çelik ve uygulanan ısı işlem rejimleri	$\beta_y$	n	$dx10^6$	$\sigma_{y0}$	$S_{k0}$
	K		m	MPa	
8620 - Satıldığı durumda	68,9	0,096	33,88	498	1290
8620 - 870 °C Tam tavlama	98,4	0,136	32,84	365	1114
8620 - 870 °C Su ver.-650 °C	51,1	0,061	23,46	644	1590
8620 - 800 °C Su ver.-650 °C	51,1	0,068	19,76	643	1651
8620 - 735 °C Su ver.-650 °C	82,2	0,15	28,09	434	1484
4140 - Satıldığı durumda	62,4	0,139	30,5	538	1420
4140 - 810 °C Tam tavlama	67,2	0,141	30,5	505	1372
4140 - 810 °C Su ver.-650 °C	43,2	0,048	30,5	868	1728
4140 - 765 °C Su ver.-650 °C	43,9	0,047	25,11	819	1746
4140 - 735 °C Su ver.-650 °C	60	0,129	23,72	554	1443
1050 - Satıldığı durumda	63,2	0,141	26,68	535	1290
1050 - 800 °C Tam tavlama	75,3	0,144	26,35	462	1291
1050 - 800 °C Su ver.-650 °C	43,9	0,04	22,95	823	1638
1050 - 750 °C Su ver.-650 °C	44,6	0,045	22,47	795	1651
1050 - 735 °C Su ver.-650 °C	48	0,064	24,54	705	1598
1040 - Satıldığı durumda	80	0,167	29,24	440	1133
1040 - 810 °C Tam tavlama	85,6	0,159	25,11	415	1148
1040 - 810 °C Su ver.-650 °C	49,7	0,066	42,27	668	1502
1040 - 765 °C Su ver.-650 °C	48	0,059	22,95	698	1485
1040 - 735 °C Su ver.-650 °C	55,4	0,08	22,47	605	1413



Çizelge 5.1'deki değerler formül (3.57)'de yerine konularak kırılma tokluğu ve diğer parametreler hesaplanır. Bu değerler ile hesaplanmış olan parametreler çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Ek'te verilmiş olan MATLAB programıyla elde edilen değerler.

Çelik ve uygulanan ısı işlem rejimleri	$\lambda$	$\alpha \times 10^2$	$\sigma_0$	$S_{kop}$	A	$T^*$	$T^*$	$K_{Ic}^0$
		$K^{-1}$	MPa			K		$MPa\sqrt{m}$
8620 - Satıldığı durumda	4,70	1,21	473,8	926,3	911,37	58,04	293	9,40
8620 - 870 °C Tam tavlama	3,17	1,29	342,3	803,8	1103	67,78	293	11,20
8620 - 870 °C Su ver.-650 °C Temperleme	7,69	1,16	619,2	1083	802,57	47,39	293	6,89
8620 - 800 °C Su ver.-650 °C Temperleme	6,85	1,16	618,3	1090	801,32	45,73	293	6,31
8620 - 735 °C Su ver.-650 °C Temperleme	2,83	1,24	410,1	924,3	1011,1	54,43	293	9,49
4140 - Satıldığı durumda	3,09	1,19	513,8	975,5	864,15	52,72	293	8,45
4140 - 810 °C Tam tavlama	3,04	1,2	480,9	944,3	893,99	54,68	293	8,75
4140 - 810 °C Su ver.-650 °C Temperleme	9,91	1,14	838,9	1328	881	51,67	293	8,62
4140 - 765 °C Su ver.-650 Temperleme	10,13	1,14	791,2	1279	847,52	48,41	293	7,52
4140 - 735 °C Su ver.-650 °C Temperleme	3,37	1,18	529,8	989,2	845,82	51,63	293	7,30

Çizelge 5.2'nin devamı.

Çelik ve uygulanan ısıt işlemleri	$\lambda$	$\alpha \times 10^2$	$\sigma_0$	$S_{kop}$	A	$T^*$	$T^*$	$K_{Ic}^0$
		$K^{-1}$	MPa			K		$MPa\sqrt{m}$
1050 - Satıldığı durumda	3,04	1,19	510,7	950,3	873,70	57,67	293	7,99
1050 - 800 °C Tam tavlama	2,97	1,22	438,1	903,4	953,22	58,61	293	8,67
1050 - 800 °C Su ver.-650 °C Temperleme	12	1,14	795	1264	851,66	52,38	293	7,23
1050 - 750 °C Su ver.-650 °C Temperleme	10,61	1,14	767,6	1239	838,56	50,50	293	7,04
1050 - 735 °C Su ver.-650 °C Temperleme	7,31	1,15	679,2	1143	813,26	48,87	293	7,14
1040 - Satıldığı durumda	2,49	1,24	416,2	854,75	986,91	65,63	293	9,45
1040 - 810 °C Tam tavlama	2,64	1,25	391,5	843,4	1023,8	65,36	293	9,09
1040 - 810 °C Su ver.-650 °C Temperleme	7,07	1,15	642,9	1090,7	804,31	50,72	293	9,26
1040 - 765 °C Su ver.-650 °C Temperleme	7,97	1,15	672,5	1114,1	805,18	52,24	293	6,83
1040 - 735 °C Su ver.-650 °C Temperleme	5,75	1,17	580,2	1026,9	834,31	53,4	293	7

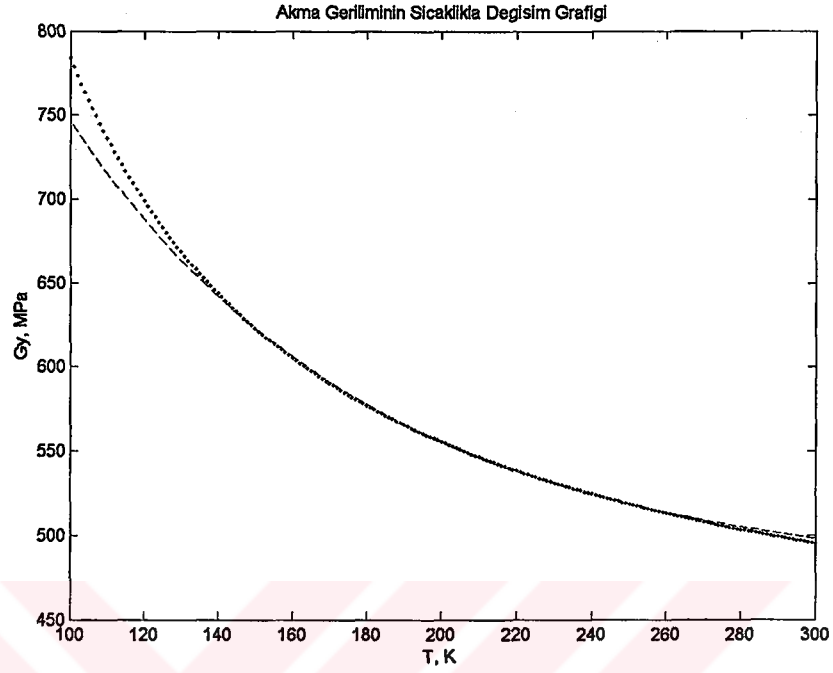
Çizelge 5.3. İncelenen çeliklerin gerçek Gerilim - Gerinim ve akma geriliminin sıcaklıkla değişimini gösteren formülleri.

Çelikler	Uygulanan Isıl İşlemler ve durumlar	$\sigma_i = B\varepsilon_i^n$	$\sigma_y = \sigma_0 + A \exp(-\alpha T)$
8620	Satıldığı durum	$\sigma_i = 865\varepsilon_i^{0,096}$	$\sigma_y = 474 + 911 \exp(-1,21 \cdot 10^{-2} T)$
	870 °C Tam tavlama	$\sigma_i = 798\varepsilon_i^{0,136}$	$\sigma_y = 342 + 1103 \exp(-1,29 \cdot 10^{-2} T)$
	870 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 915\varepsilon_i^{0,061}$	$\sigma_y = 619 + 803 \exp(-1,16 \cdot 10^{-2} T)$
	800 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 955\varepsilon_i^{0,068}$	$\sigma_y = 618 + 801 \exp(-1,16 \cdot 10^{-2} T)$
	735 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 914\varepsilon_i^{0,150}$	$\sigma_y = 410 + 1011 \exp(-1,24 \cdot 10^{-2} T)$
4140	Satıldığı durumda	$\sigma_i = 1170\varepsilon_i^{0,139}$	$\sigma_y = 514 + 864 \exp(-1,19 \cdot 10^{-2} T)$
	810 °C Tam tavlama	$\sigma_i = 1159\varepsilon_i^{0,141}$	$\sigma_y = 481 + 894 \exp(-1,2 \cdot 10^{-2} T)$
	810 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1148\varepsilon_i^{0,048}$	$\sigma_y = 839 + 881 \exp(-1,14 \cdot 10^{-2} T)$
	765 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1070\varepsilon_i^{0,047}$	$\sigma_y = 791 + 848 \exp(-1,14 \cdot 10^{-2} T)$
	735 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1086\varepsilon_i^{0,129}$	$\sigma_y = 530 + 846 \exp(-1,18 \cdot 10^{-2} T)$

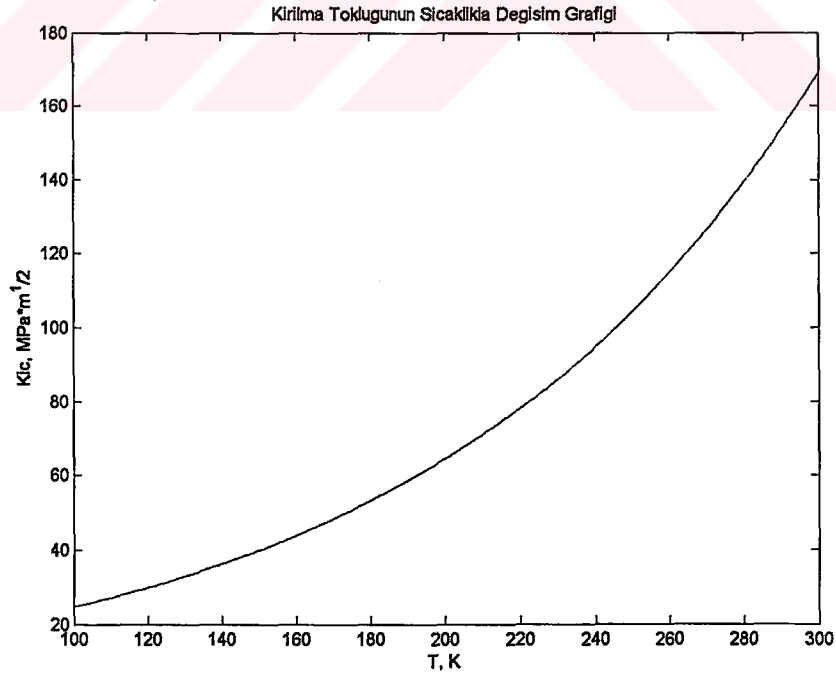
Çizelge 5.3'ün devamı.

Çelikler	Uygulanan Isıl İşlemler ve durumlar	$\sigma_i = B\varepsilon_i^n$	$\sigma_y = \sigma_0 + A \exp(-\alpha T)$
1050	Satıldığı durumda	$\sigma_i = 1287\varepsilon_i^{0,141}$	$\sigma_y = 511 + 874 \exp(-1,19.10^{-2}T)$
	800 °C Tam tavlama	$\sigma_i = 1156\varepsilon_i^{0,144}$	$\sigma_y = 438 + 953 \exp(-1,22.10^{-2}T)$
	800 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1040\varepsilon_i^{0,040}$	$\sigma_y = 795 + 852 \exp(-1,14.10^{-2}T)$
	750 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1053\varepsilon_i^{0,045}$	$\sigma_y = 768 + 839 \exp(-1,14.10^{-2}T)$
	735 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1015\varepsilon_i^{0,064}$	$\sigma_y = 679 + 813 \exp(-1,15.10^{-2}T)$
1040	Satıldığı durumda	$\sigma_i = 1208\varepsilon_i^{0,167}$	$\sigma_y = 416 + 987 \exp(-1,24.10^{-2}T)$
	810 °C Tam tavlama	$\sigma_i = 1085\varepsilon_i^{0,159}$	$\sigma_y = 392 + 1024 \exp(-1,25.10^{-2}T)$
	810 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 981\varepsilon_i^{0,066}$	$\sigma_y = 643 + 804 \exp(-1,15.10^{-2}T)$
	765 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 1000\varepsilon_i^{0,059}$	$\sigma_y = 673 + 805 \exp(-1,15.10^{-2}T)$
	735 °C Su verme - 650 °C Temperleme	$\sigma_i = 950\varepsilon_i^{0,080}$	$\sigma_y = 580 + 834 \exp(-1,17.10^{-2}T)$

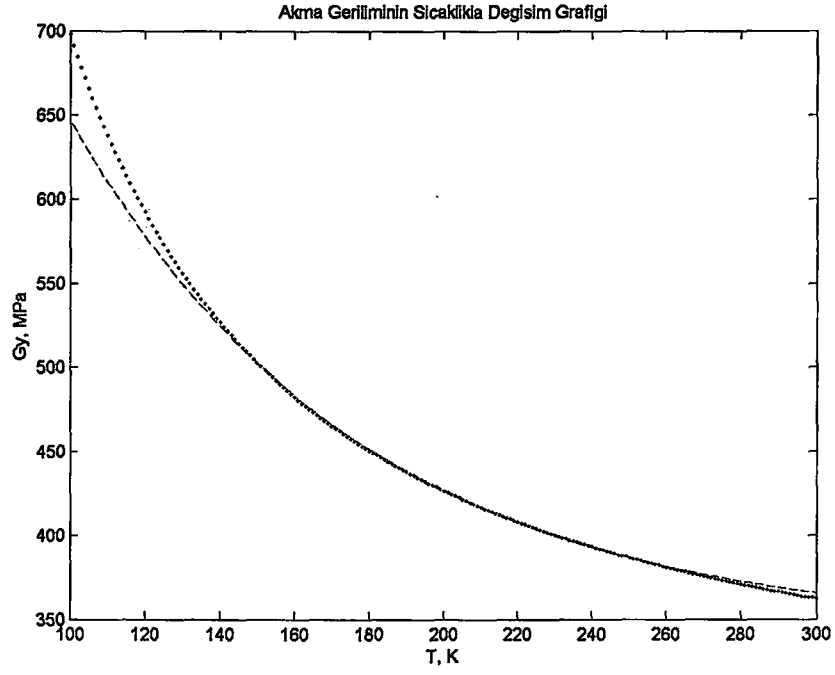
Elde edilen değerlere göre akma gerilimi ve kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (---Formül (3.37), ...Formül (4.1)).



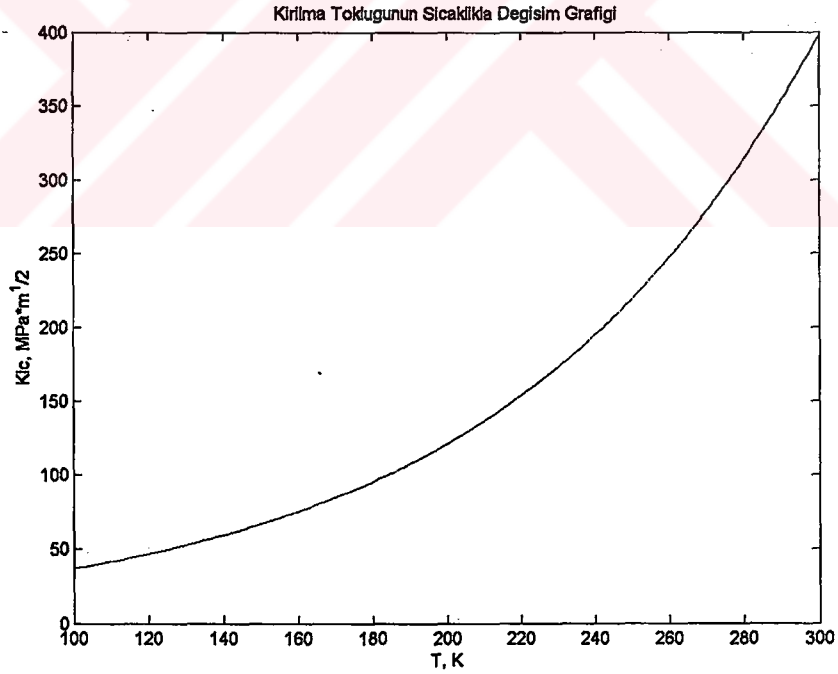
şekil 5.1. 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e gre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



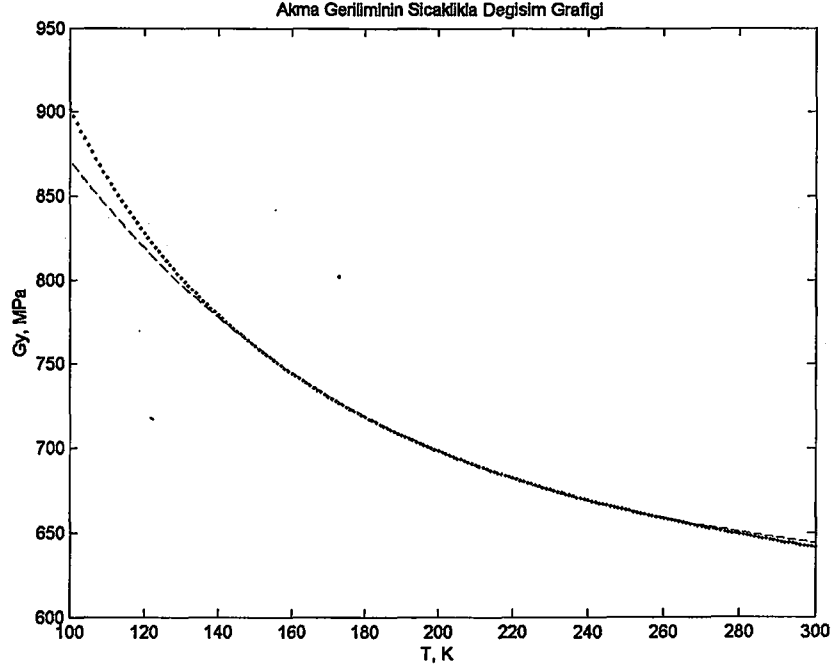
şekil 5.2. 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



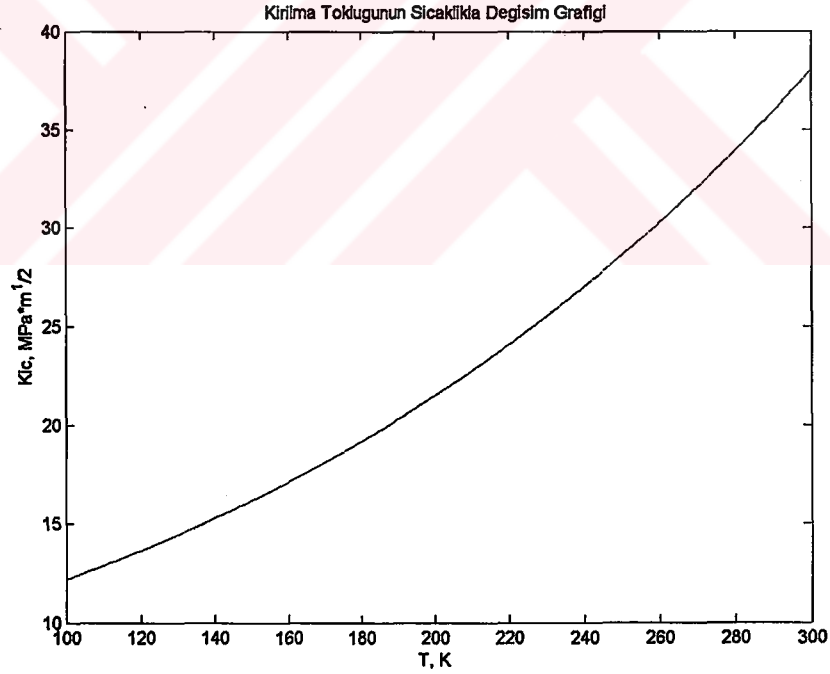
Şekil 5.3. 870 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



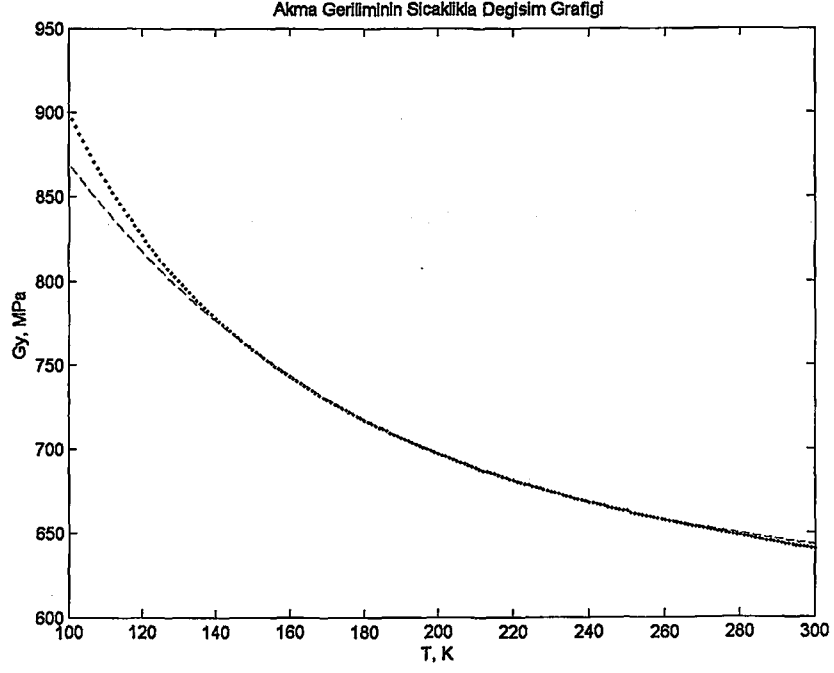
Şekil 5.4. 870 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



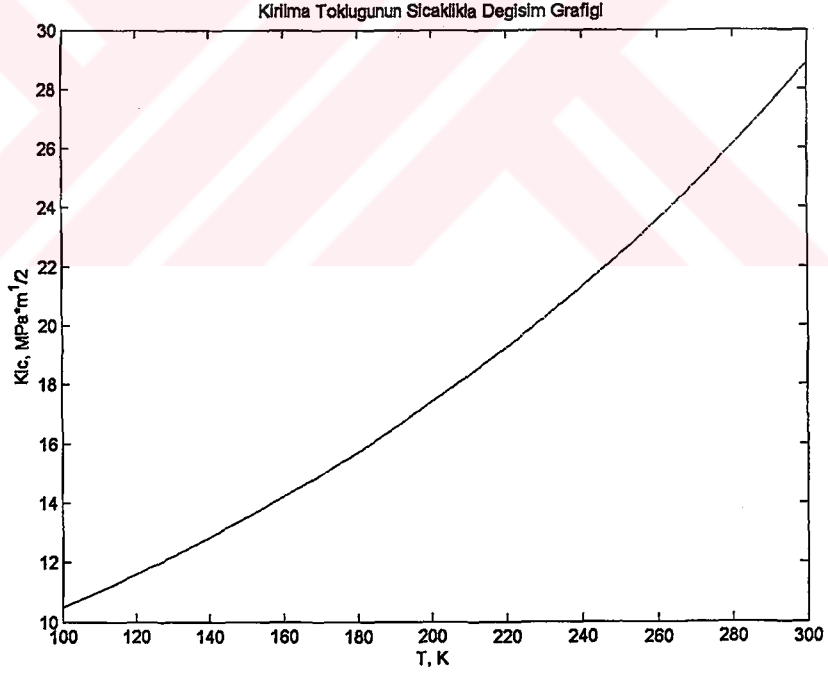
Şekil 5.5. 870 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.6. 870 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.

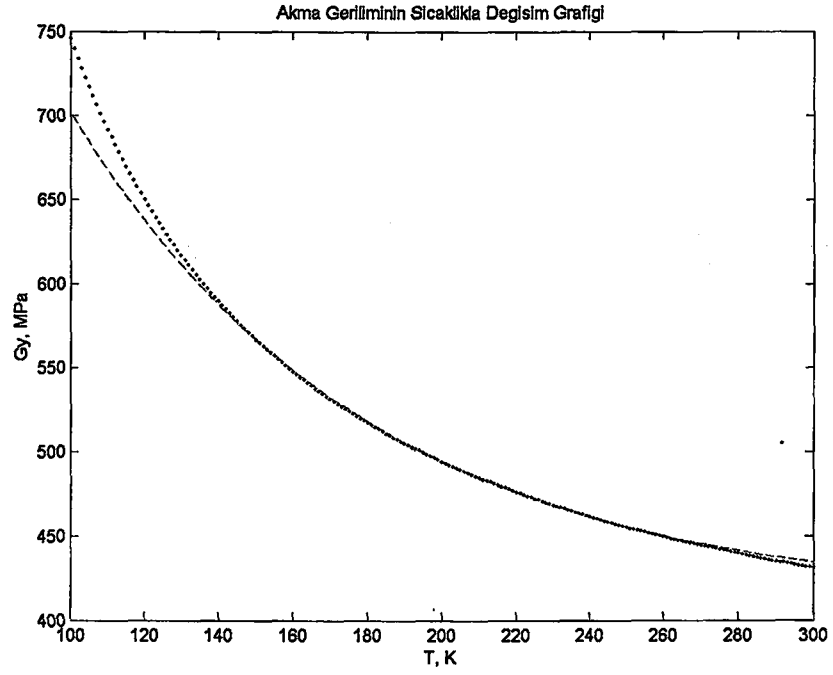


Şekil 5.7. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.

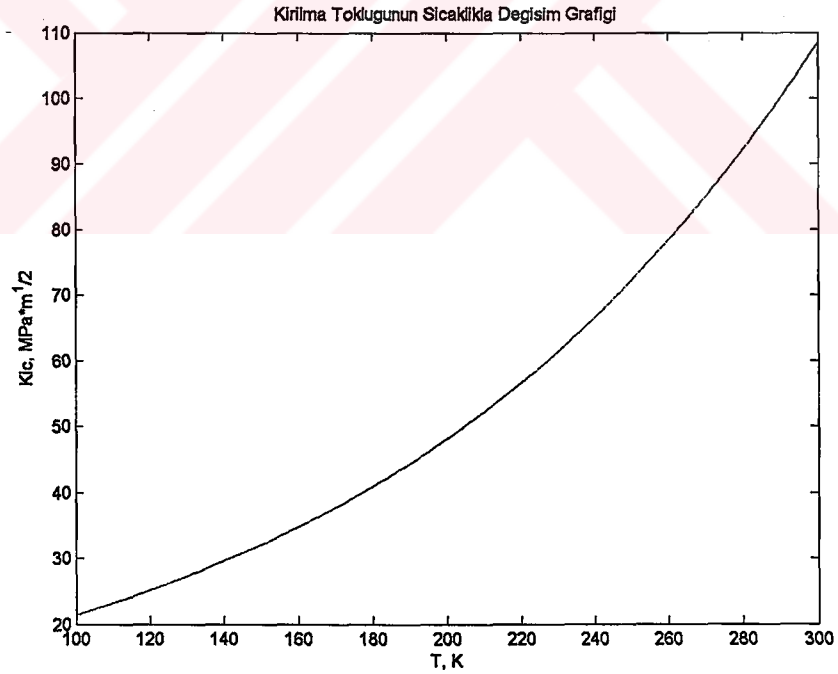


Şekil 5.8. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.

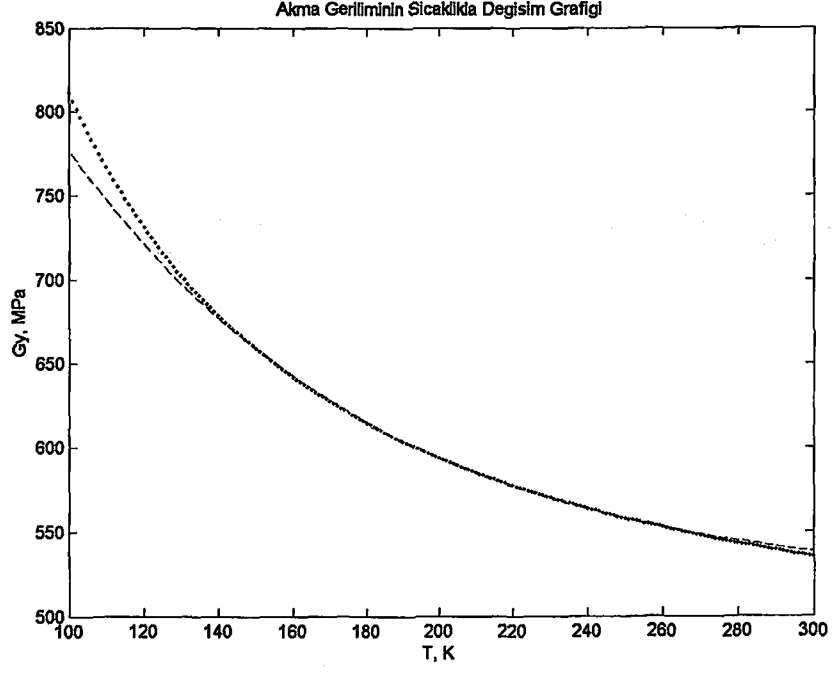




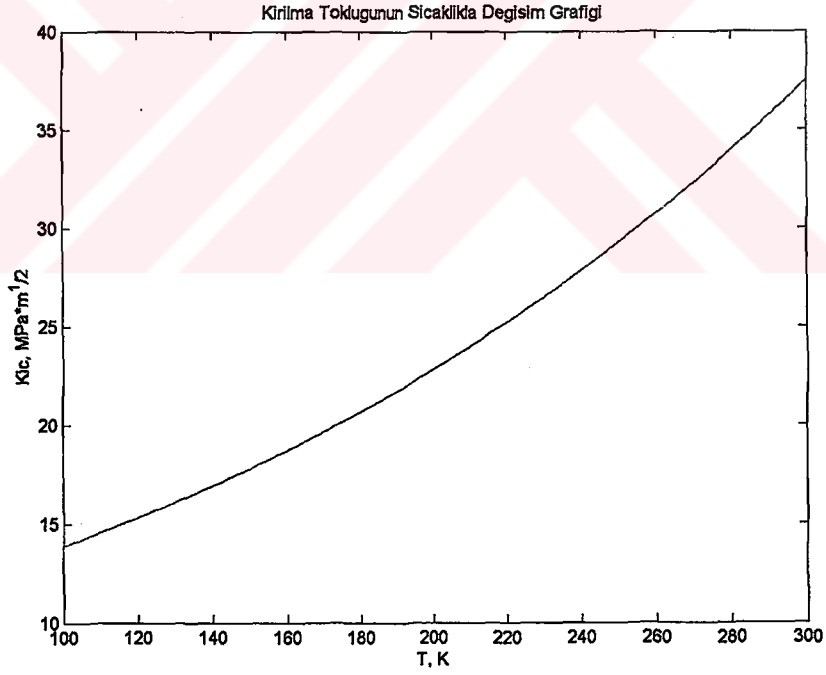
Şekil 5.9. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



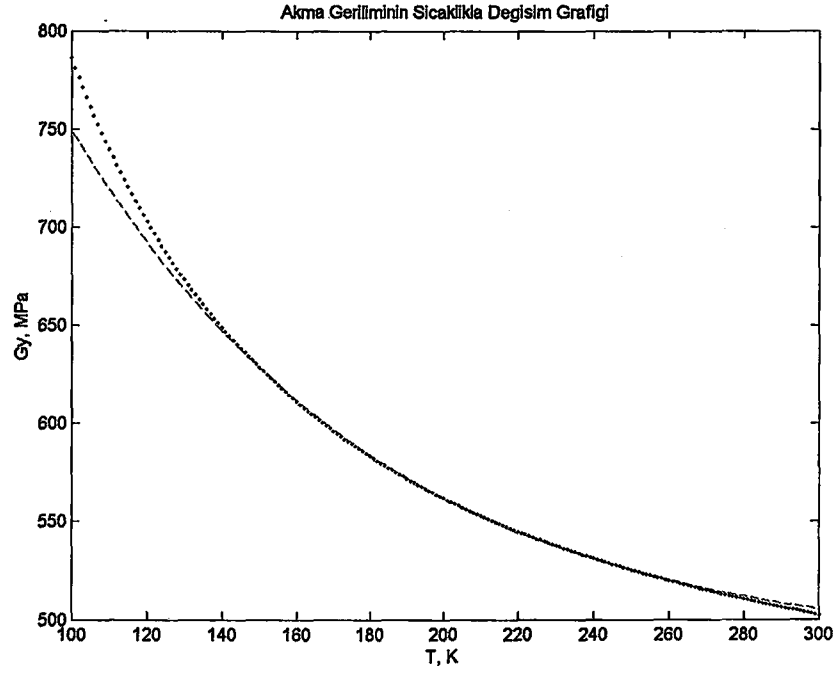
Şekil 5.10. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 8620 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



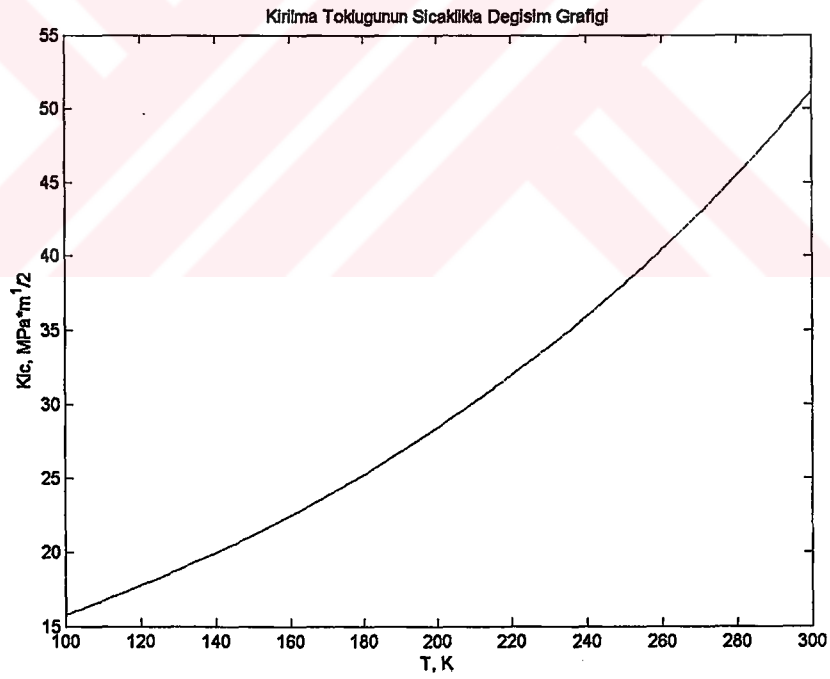
Şekil 5.11. 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



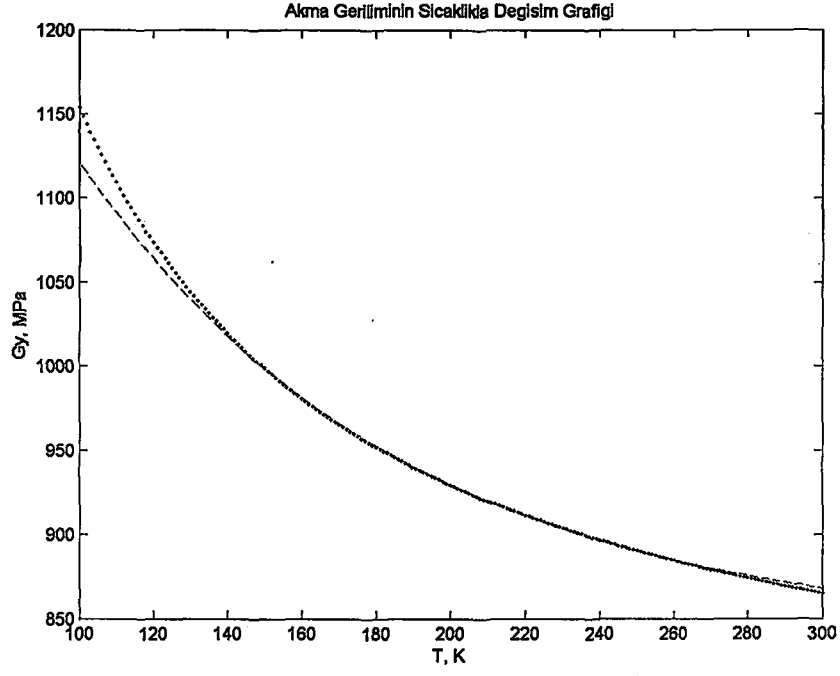
Şekil 5.12 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



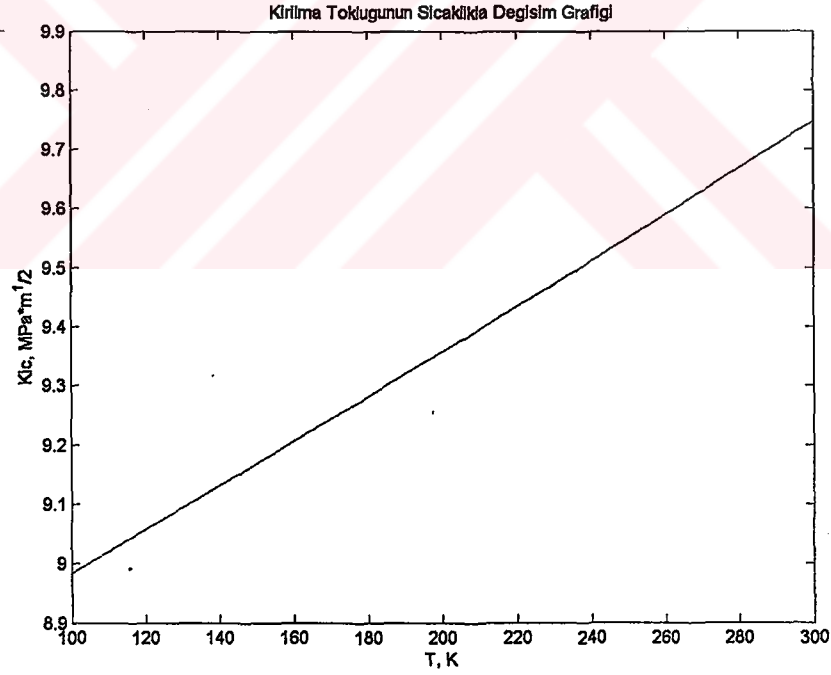
Şekil 5.13. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



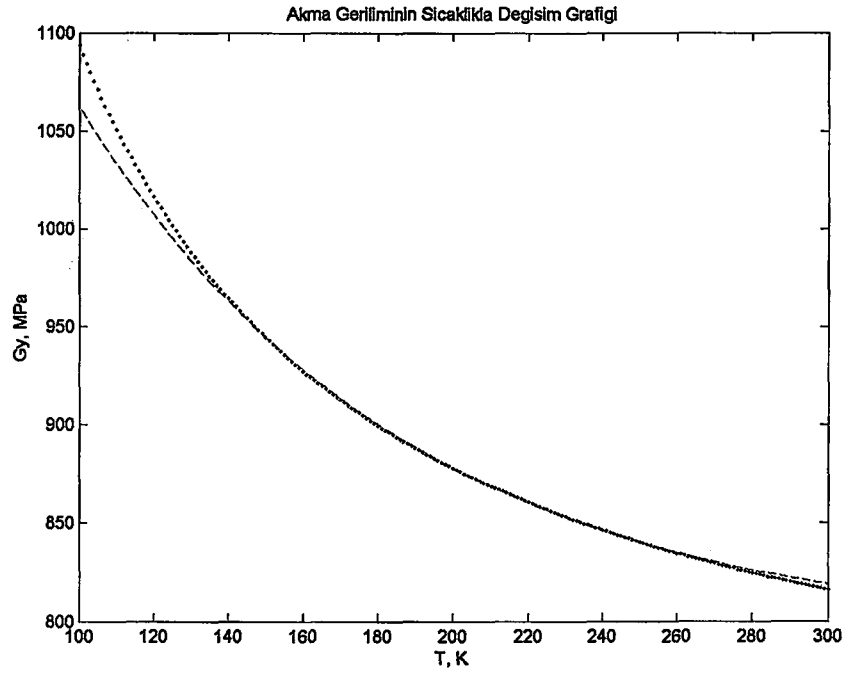
Şekil 5.14. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



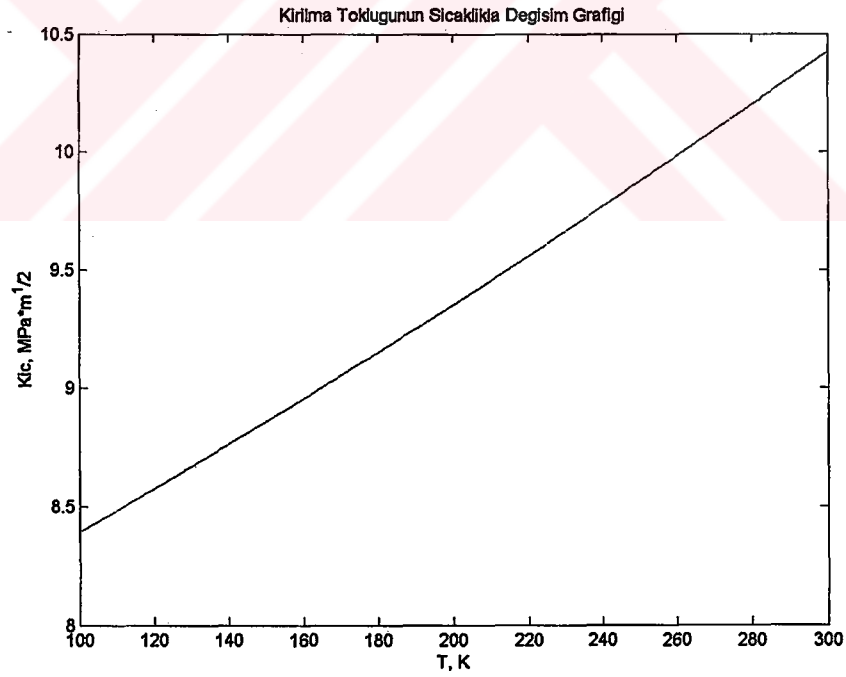
Şekil 5.15. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



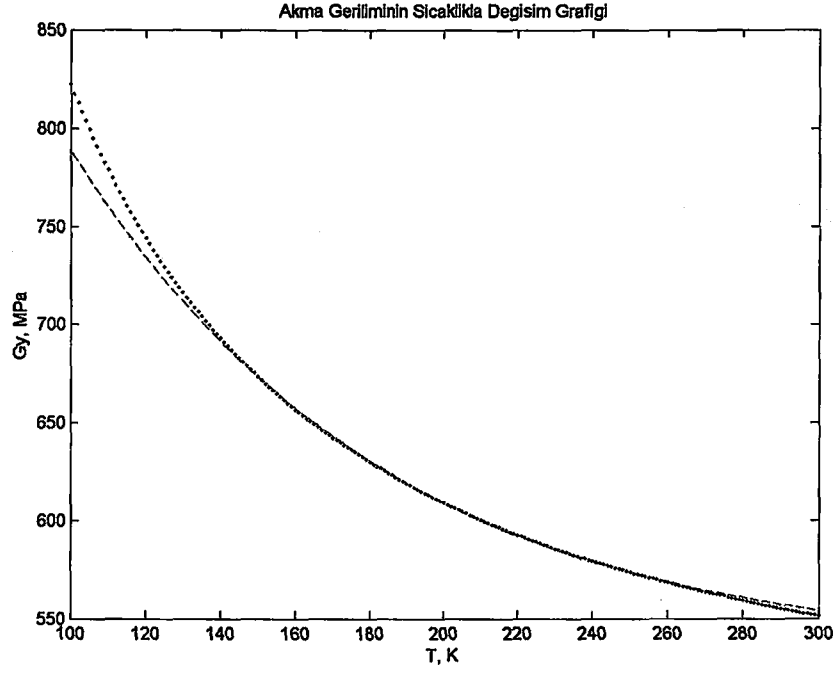
Şekil 5.16. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



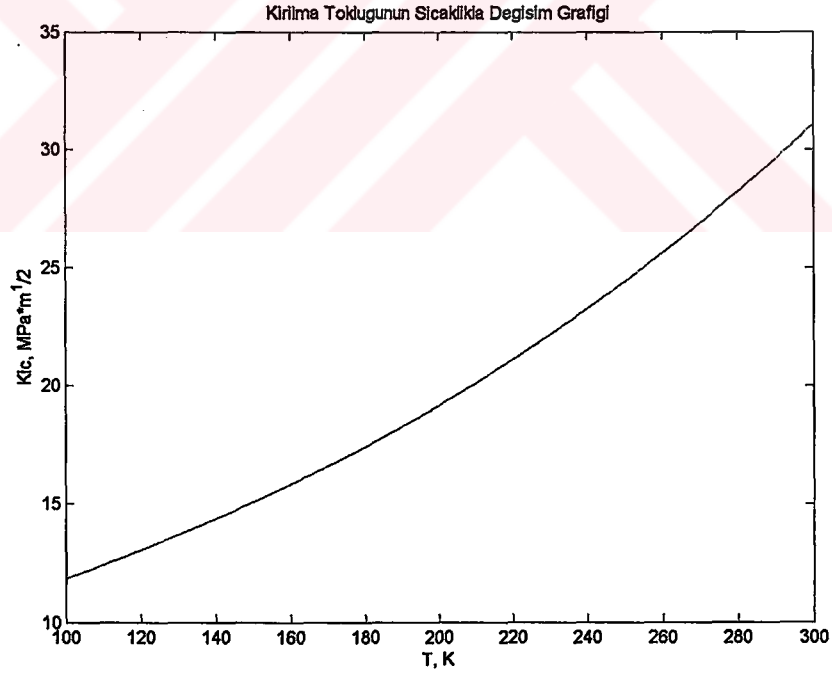
Şekil 5.17. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



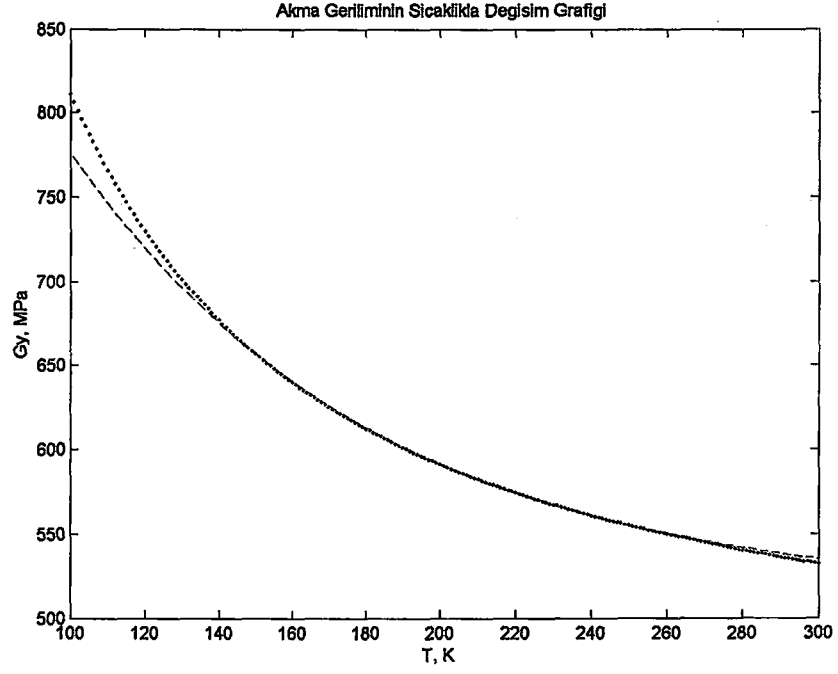
Şekil 5.18. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



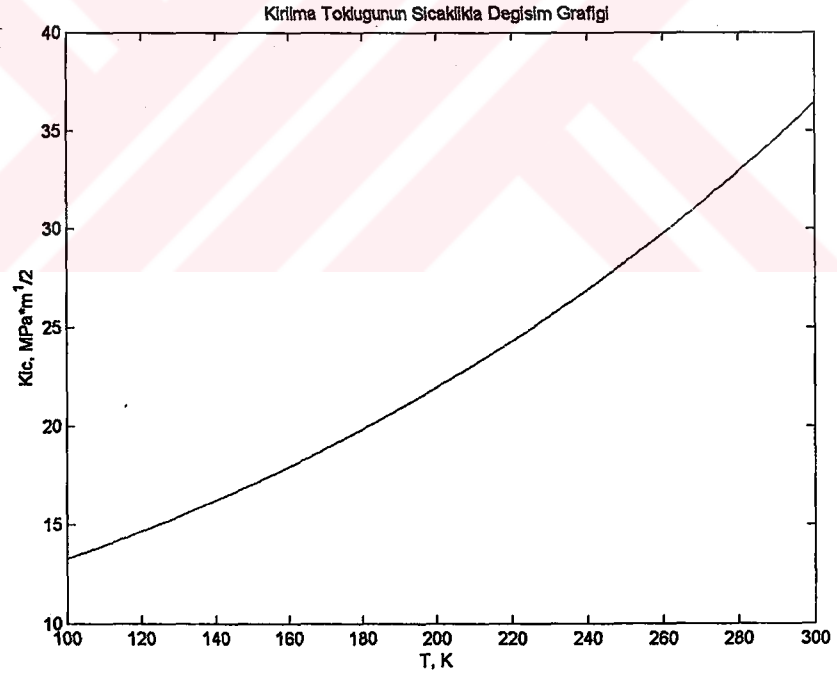
Şekil 5.19. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



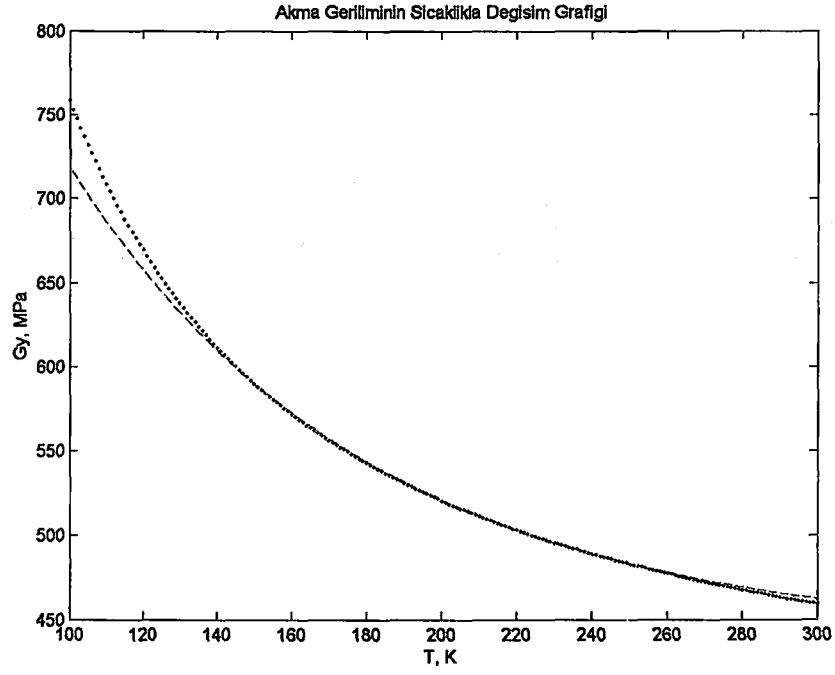
Şekil 5.20. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 4140 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



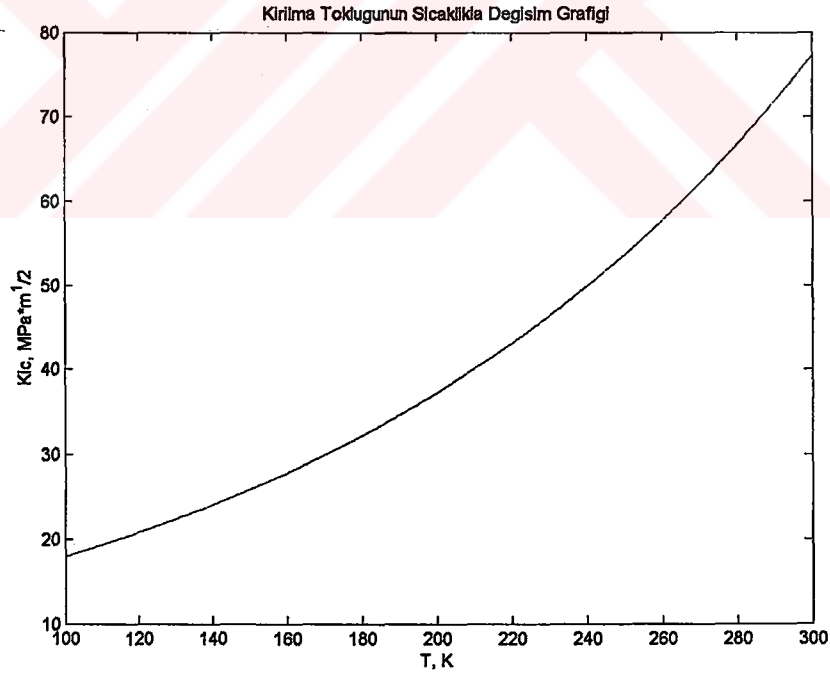
Şekil 5.21. 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.22. 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.

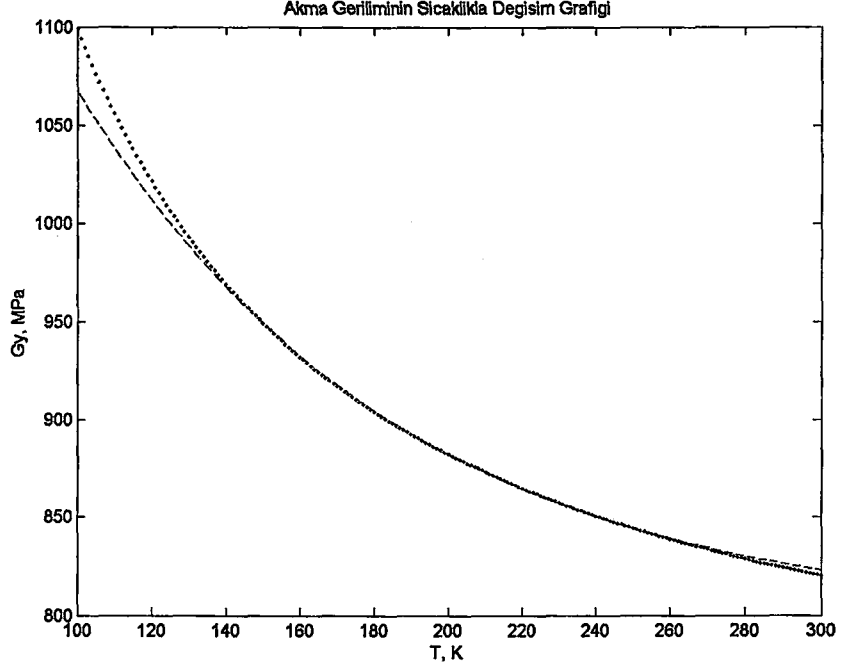


Şekil 5.23. 800 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.

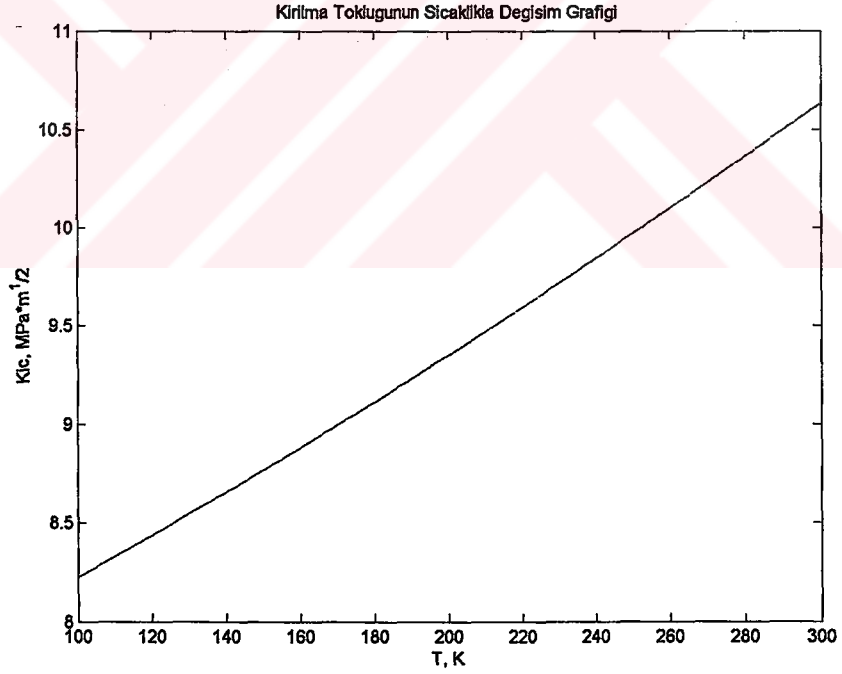


Şekil 5.24. 800 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.

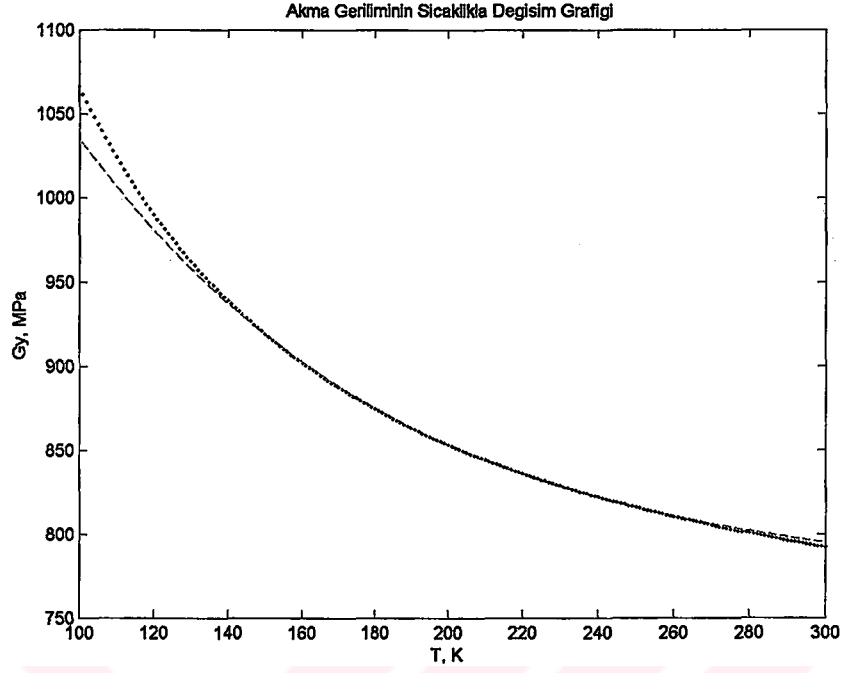




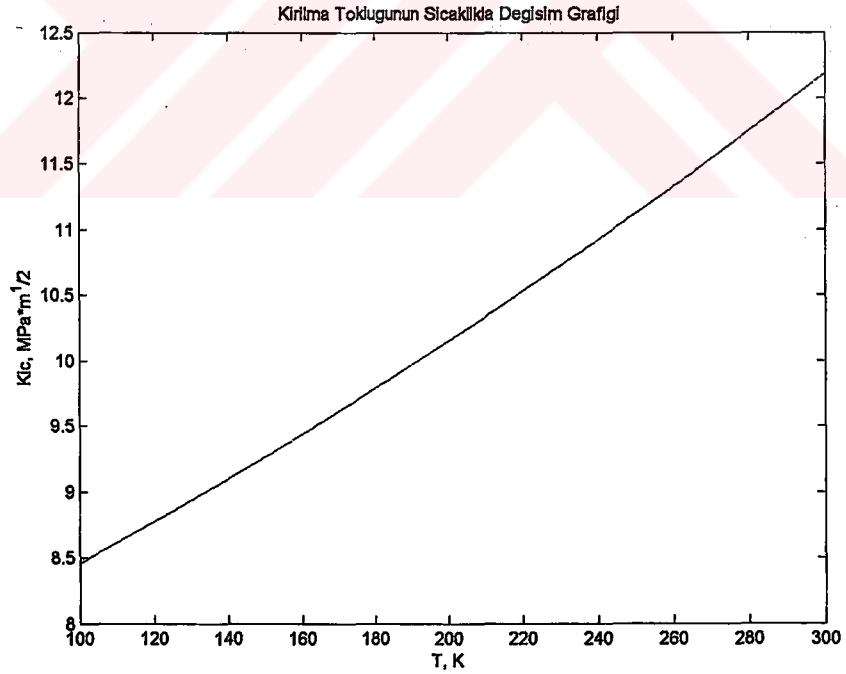
Şekil 5.25. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



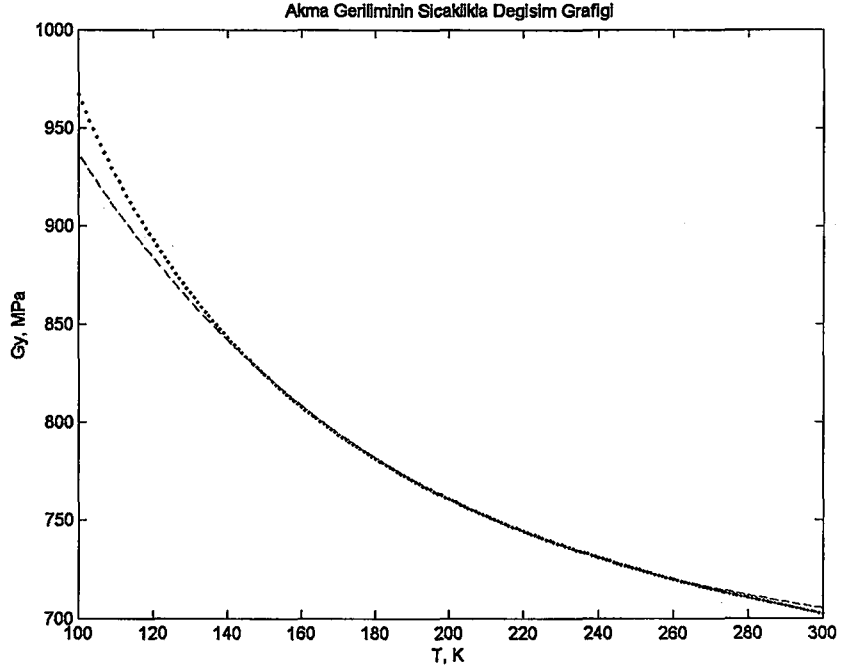
Şekil 5.26. 800 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



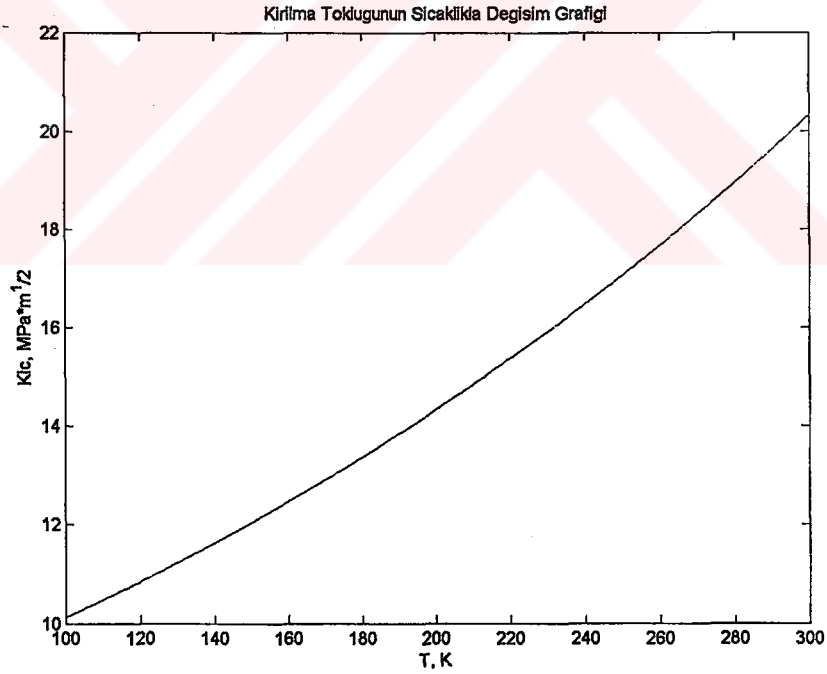
Şekil 5.27. 750 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



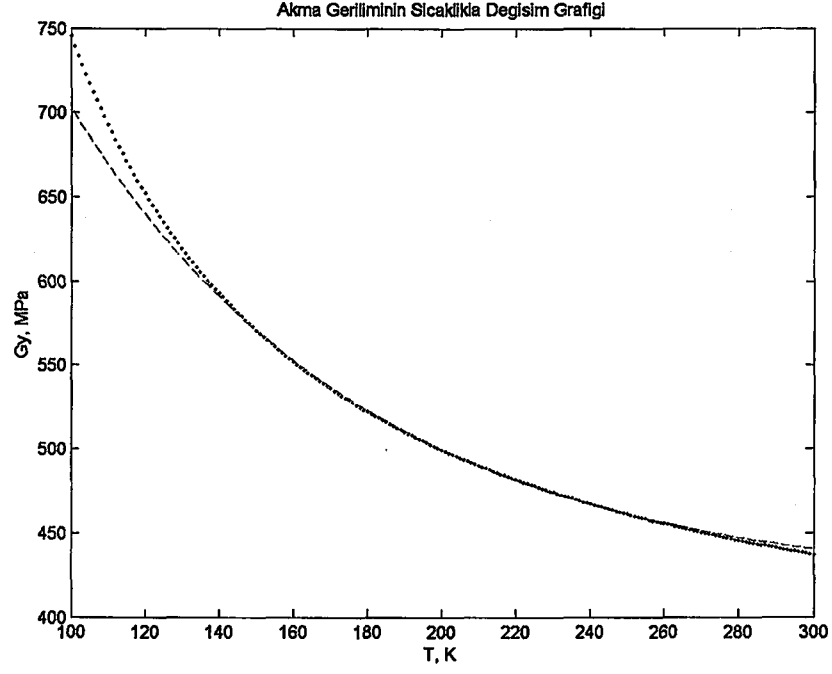
Şekil 5.28. 750 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



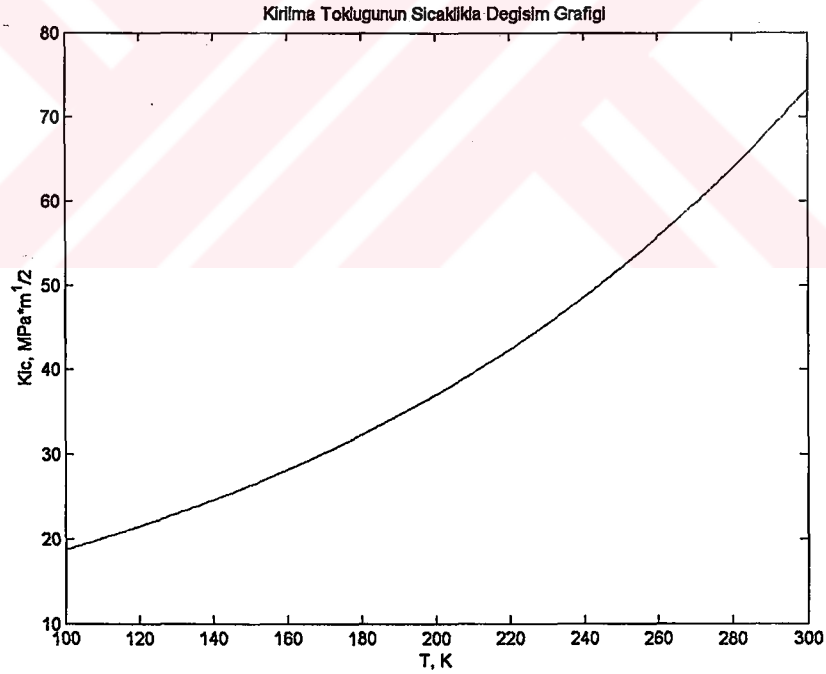
Şekil 5.29. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



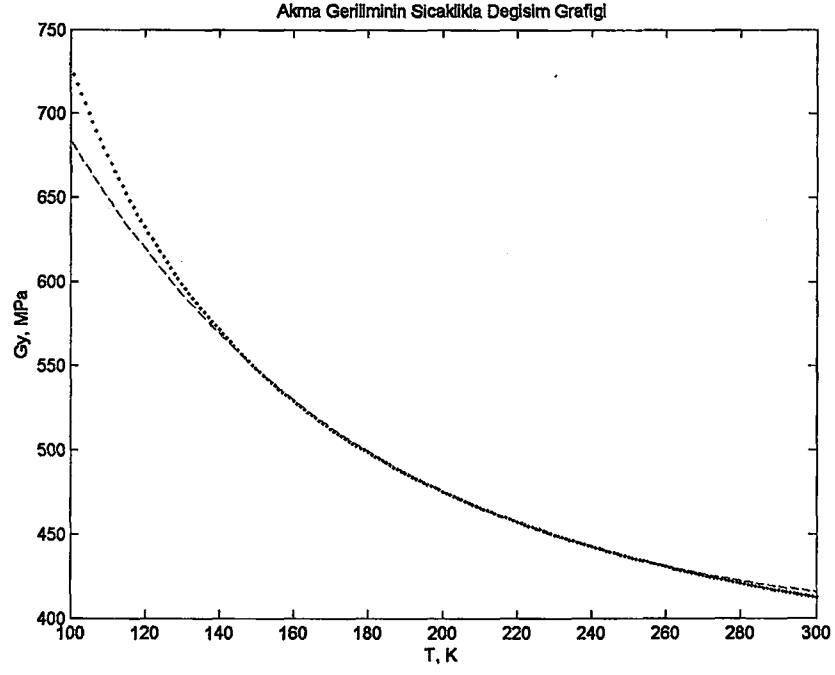
Şekil 5.30. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1050 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



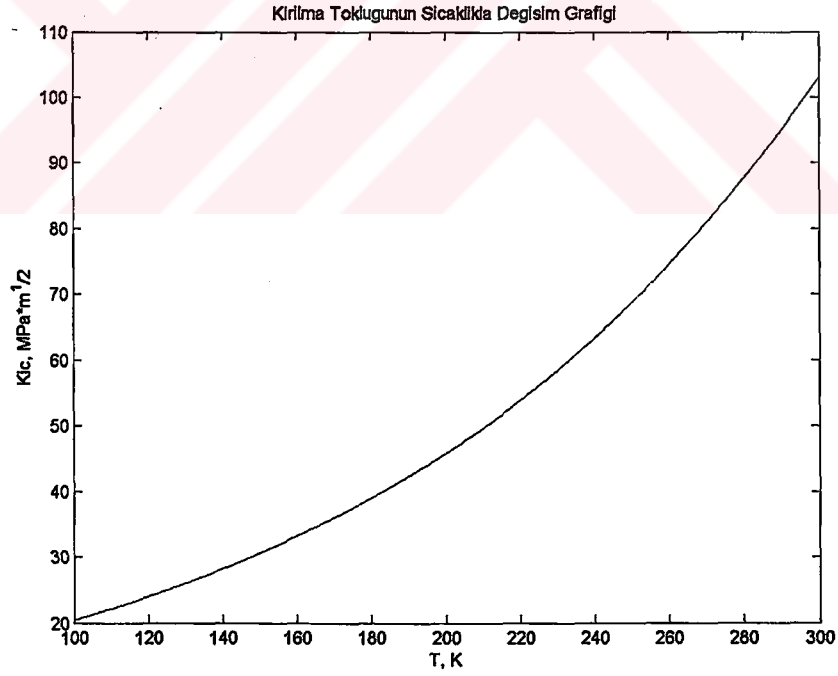
Şekil 5.31. 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



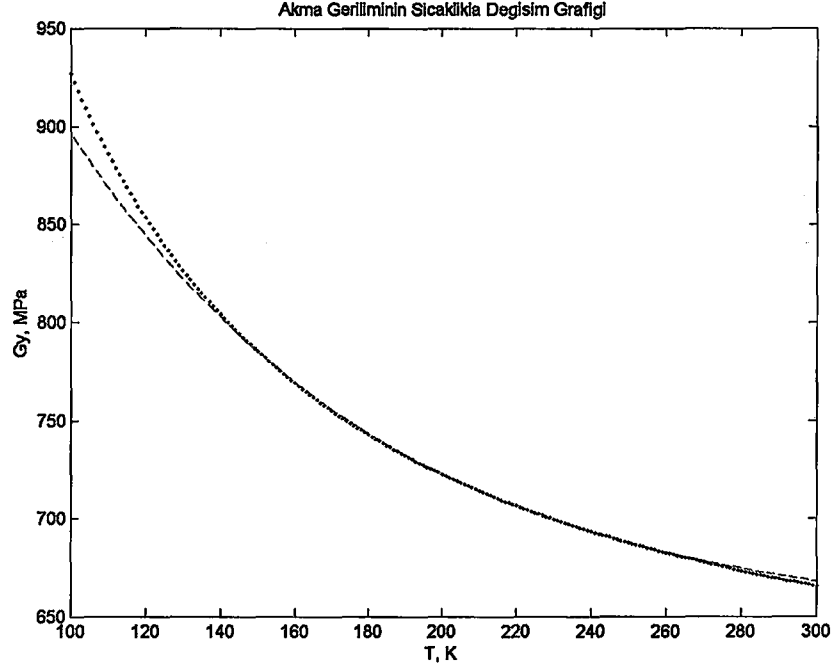
Şekil 5.32. 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



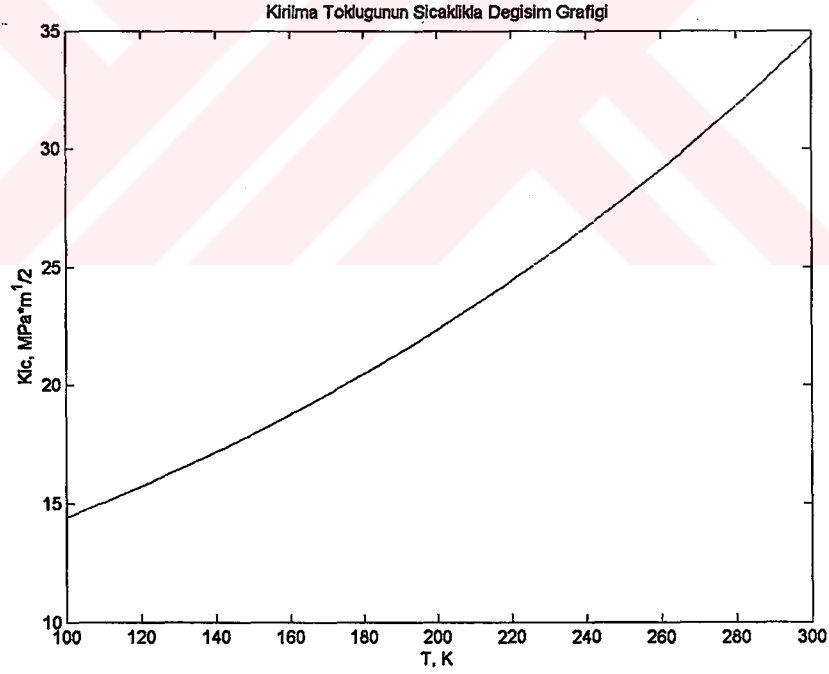
Şekil 5.33. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



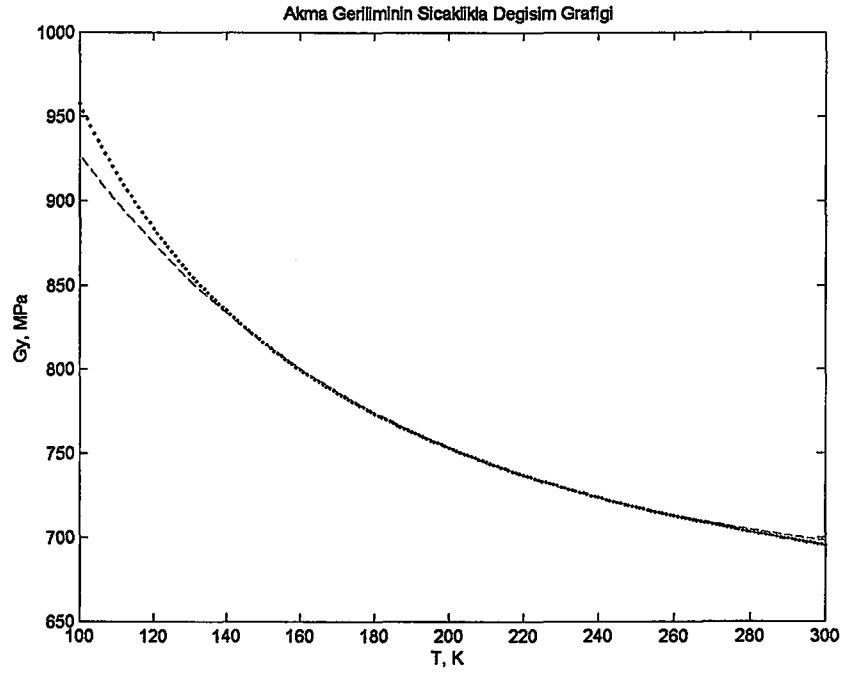
Şekil 5.34. 810 °C'de tam tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



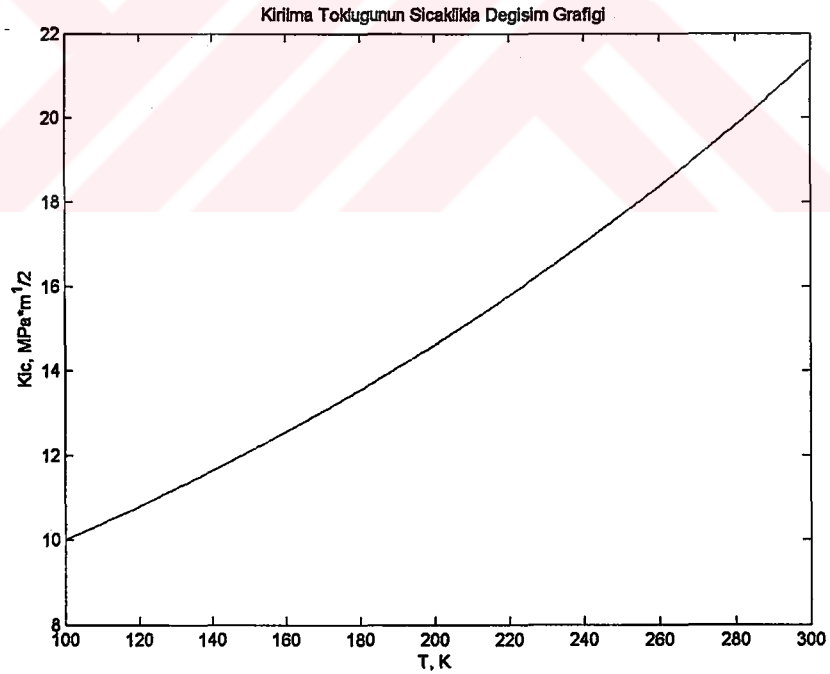
Şekil 5.35. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



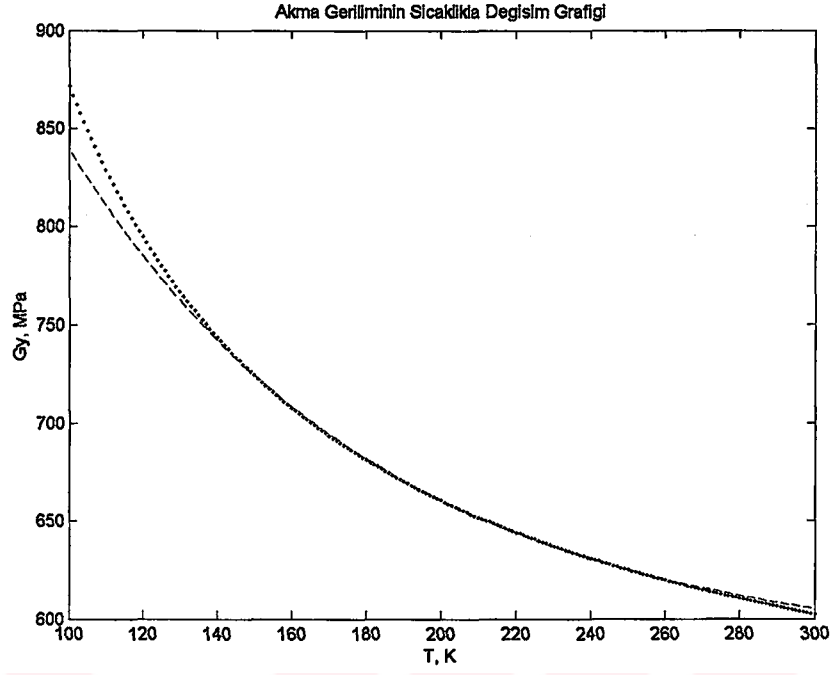
Şekil 5.36. 810 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



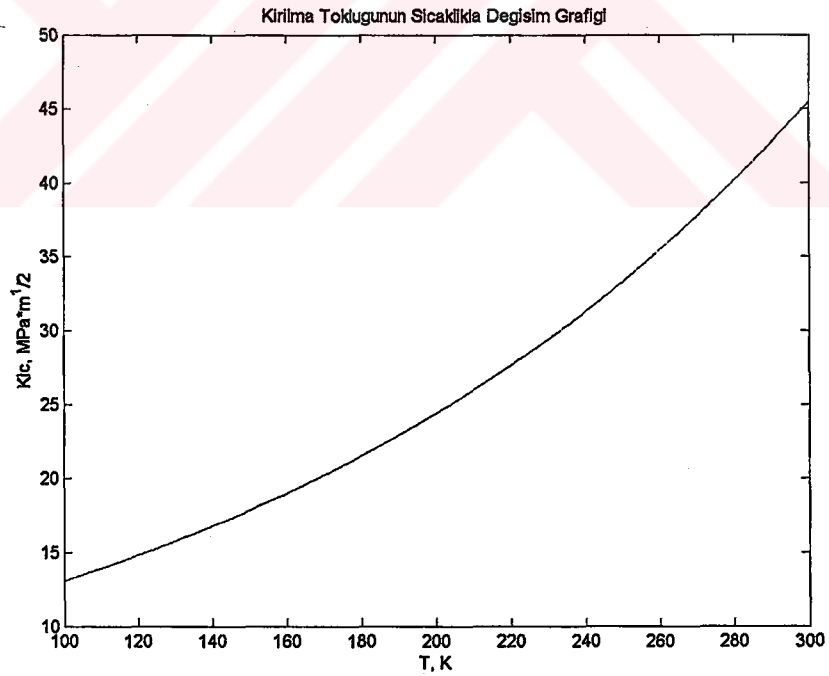
Şekil 5.37. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.38. 765 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.39. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin formül (3.37) ve (4.1)'e göre akma geriliminin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 5.40. 735 °C'den su verilmiş ve 650 °C'de temperlenmiş 1040 çeliğinin satıldığı durumda formül (3.57)'e göre kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi.



## 5.2 Sonuçlar

Kırılma tokluğu, incelenen tüm çeliklerde, uygulanan tam tavlama ısıl işlemi sonucunda, çeliklerin satıldığı duruma göre, (mukavemet biraz düşük) daha yüksek çıkmıştır. Bu çeliklere uygulanan farklı sıcaklıklardan su verme ve belirli sıcaklıklarda temperleme ısıl işlemi sonucunda, kırılma tokluğunda satıldıkları duruma göre bir azalma söz konusudur. Ancak bu ısıl işlem neticesinde mukavemet önemli ölçüde artmıştır.

$A_1$ 'e yakın sıcaklıklardan su verilen elikler,  $A_{c3}$ 'e yakın sıcaklıklardan su verilen çeliklerden daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler. Ancak mukavemette biraz azalma gözlenmektedir.

1040 ve 1050 çeliğine uygulanan  $A_1$ 'e yakın sıcaklıklardan su verme ve 650 C'de temperleme ısıl işlemi sonucunda kırılma tokluğu satıldıkları duruma yakın, mukavemet ise yüksektir. 8620 ve 4140 çeliğinde ise aynı rejimde kırılma tokluğu ve mukavemet değerleri önemli ölçüde farklılık göstermemektedir.

Bu incelemelerden, yapılan ısıl işlemler sonucunda kırılma tokluğunda belirli bir gelişme sağlandığı görülmüştür.

Kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılan yöntemin geçerliliği literatürde kanıtlanmıştır. Bu çalışmada, yöntemin bağlı olduğu temeller açıklanmış ve böylece kırılma tokluğunu saptamak için, gerekli parametreler deneylerle bulunmuştur. Bu yöntemin kolaylığı, malzeme geliştirmede ve uygulanan ısıl işlemlerin seçiminde önemli rol oynamaktadır.

Kırılma tokluğunun saptanması için geliştirilmiş ve MATLAB programlama dilinde yazılmış olan programın, hesaplamalarda kolaylık ve kesinlik sağladığı görülmüştür. Bu programla izelge 5.2'deki değerler hesaplanmış ve akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafikleri çizdirilmiştir.

Böylece kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan bu yöntem, 4 elik üzerinde incelenmiş ve sonuçta kırılma tokluğunun saptanması kolaylaştırılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Annual Book of ASTM Standards, 2003, Volume 03.01, pp. 451-482.
- Becker, R., 1925, Uber Die Plastizitat Amorpher und Kristalizer Fester Korper  
Physikalische Zeitschrift, V. 25, N 7, pp. 919-925.
- Broek, D., 1974, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Leyden: Noordhoff  
int. Publ. -530p.
- Geller, Yu. A., Rahshtadt, A. G., 1983, Malzeme Bilimi, Moskova, Metalurji, 384  
s.
- Griffith, A. A., 1920, The Phenomenon of Rupture and Flaw in Solids – Phil.  
Tras. Roy. Soc. London A, 221, pp.163-198.
- Helan, K., 1984, Introduction to Fracture Mechanics, pp. 74-107.
- Kopelman, L. A., 1978, The Resistance Against Brittle Fracture in Welded  
Sections, Moskova.
- Krasovsky, A. Yan., 1983, Düşük Sıcaklıklarda Metallerin Gevrekliği, Naukova  
Dumka.
- Lawn, B. R., Wilshaw, T. R., 1975, Fracture of Brittle Solids, pp. 73-107.
- Liebowitz, H., 1969, Fracture, Volume IV Engineering Fracture Design, pp. 45-68
- Makhutov, N. A., 1973, Resistance of Constructional Components Against Brittle  
Fracture Machinostroenie, Moskova.
- Saidov, G., 1989, The Fracture Toughness of Low and Medium Strength Steels,  
Taşkent.

- Saidov, G. I.,1997, "A Thermal Activation Approach to The Crack Resistance of Steels", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, September, Vol. 20, pp 41-47.
- Said, G., 1999, "Hacim Merkezli Kbik Yapıya Sahip Metal ve Alaşımlarda Kırılma Tokluğunun Doğası", 4. Ulusal Kırılma Konferansı, İstanbul,18-20 Ekim, 90-99
- Said, G., Taşgetiren, S., 2000, "Fracture Toughness Determination of Low-Alloy Steels by Thermoactivation Energy Method", *Engineering Fracture Mechanics*, May, Vol. 67, pp. 345-356.
- Said, G., 2001, "Kırılma Mekaniiğinin Bazı Problemleri", 5. Uluslar arası Kırılma Konferansı, Elazığ, 6-8 Eylül, 19-26,
- Ulu, S., 2004, "Karbonlu ve Düşük Alaşımlı eliklerin Temel Mekanik zelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Yarashevich, V.D. and Rivkina, D. G. (1970), The Thermoactivation Character of Plastically Deformation of Metals, *Russian Solid State Physics*, 3. 464-477

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasını hazırlamamda, tezin her aŐamasında benden engin bilgilerini esirgemeyen ve bana bizzat yardım eden değerli hocam ve danıŐmanım Prof. Dr. Galip SAİD'e çok teşekkür eder ve Őukranlarımı sunarım.

YapmıŐ olduğum deneysel çalışmalar ve tezin hazırlanması sırasında bana her zaman destek olan annem, babam ve kardeŐime en derin saygı ve sevgilerimle teşekkür ederim.



## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Afyon'da doğdu. İlköğrenimini Afyon Kocatepe İlkokulu ve Şemsettin Karahisari Ortaokulu'nda, ortaöğrenimini Afyon Merkez Endüstri Meslek Lisesi'nde 1997 yılında tamamladı. Lisans Eğitimi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitimi Fakültesi Metal Öğretmenliği bölümünde 2002 yılında tamamladı. Aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitimi Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.



## EKLER

### Kırılma Tokluğunun Saptanması İçin Yazılmış MATLAB Programı

Buraya kadar incelenen formüllerin pratikte uygulanması, MATLAB programı ile daha hızlı ve kesin bir doğrulukla yapılabilmektedir. Bunun için yazılmış program aşağıda verilmiştir.

#### 1) Girdiler

```
Sk0=input('S kopma.....:');
Gy0=input('G akma.....:');
By=input('Beta y.....:');
d=input('Tane Çapı.....:');
C1=input('Gi Birinci Gerilim.....:');
C2=input('Gi İkinci Gerilim.....:');
C3=input('Gi Üçüncü Gerilim.....:');
C4=input('Gi Dördüncü Gerilim.....:');
C5=input('Gi Beşinci Gerilim.....:');
De=input('Delta mesafesi.....:');
Lo=input('İlk boy.....:');
```

#### 2) Pekleşme katsayısının hesaplanması ve gerçek gerilim – gerinim grafiğinin çizdirilmesi.

```
Ei=0;Gi=0;
C=zeros(5,1);C(1)=C1;C(2)=C2;C(3)=C3;C(4)=C4;C(5)=C5;
for k=1:5
E(k,1)=log(1+(((k)*De)/Lo));
G(k,1)=C(k)*(1+(((k)*De)/Lo));
end
disp(['   Ei   Gi'])
disp([E G])
le=log(E);
```

```

lg=log(G);
figure(1)
loglog(le,lg)
title('Gerçek Gerilim-Gerinim Grafiği')
xlabel('lnEi')
ylabel('lnGi')
n=(log(G(5)/G(1))/(log(E(5)/E(1))))

```

**3) Yarashevich ve Makhutov formüllerine göre akma geriliminin sıcaklıkla değişim değerlerinin hesaplanması ve grafiklerinin çizdirilmesi.**

```

T0=293;
T1=150;
T2=200;
T3=250;
FT=50;
Gy1=Gy0*exp(By*((1/T1)-(1/T0)));
Gy2=Gy0*exp(By*((1/T2)-(1/T0)));
Gy3=Gy0*exp(By*((1/T3)-(1/T0)));
G0=((Gy2)^2)-((Gy1)*(Gy3))/((2*(Gy2))-((Gy1)+(Gy3)))
A11=(log(((Gy1)-(G0))/((Gy2)-(G0))))/FT;
A12=(log(((Gy2)-(G0))/((Gy3)-(G0))))/FT;
A13=(log(((Gy1)-(G0))/((Gy3)-(G0))))/(2*FT);
Alo=((A11)+(A12)+(A13))/3
A1=((Gy1)-(G0))*exp((Alo)*T1);
A2=((Gy2)-(G0))*exp((Alo)*T2);
A3=((Gy3)-(G0))*exp((Alo)*T3);
Aor=((A1)+(A2)+(A3))/3
T=100:1:300;
Gyy1=G0+Aor*exp(-(Alo*T));
Gym=Gy0*exp(By*((1./T)-(1/T0)));
figure(2)
plot(T,Gyy1,'--',T,Gym,')

```

```
title('Akma Geriliminin Sicaklikla Degisim Grafigi')
xlabel('T, K')
ylabel('Gy, MPa')
```

4)  $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ 'ın sıcaklıkla değişim grafiğinin çizdirilmesi.

```
t1=0:50:300;
Gyy2=G0+Aor*exp(-(Alo*t1));
Gln=(Gyy2-G0);
figure(3)
semilogy(t1,Gln)
title('ln(Gy-Go) ile Sicakligin Degisim Grafigi')
xlabel('T, K')
ylabel('ln(Gy-Go)')
```

5)  $\frac{S_{kop}}{\sigma_y}$ 'ın sıcaklığa göre değişim grafiğinin çizdirilmesi.

```
Ty=((1/T0+((log(Sk0/Gy0))/By)))^(-1)
Sfr=G0+Aor*exp(-(Alo*Ty))
Sfro=Sfr./Gyy1;
figure(4)
plot(T,Sfro)
title('Sfr/Gy nin Sicaklikla Degisim Grafigi')
xlabel('T, K')
ylabel('Sfr/Gy, MPa')
```



**6) Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiğinin çizdirilmesi.**

```
Gyu=G0+Aor*exp(-(Alo*293));  
if (Sfr/Gyu)>2.5  
Gyuy=Sfr/2.5;  
else  
    Gyuy=G0+Aor*exp(-(Alo*293));  
end  
Tuy=(log(Aor)-(log(Gyuy-G0)))/(Alo)  
Kic0=Aor*((pi*d)^(1/2))  
Kap=((1-n)/(2*n))  
Kic=Kic0*((Aor/Gyuy).^((Kap/Tuy)*(T)));  
figure(5)  
plot(T,Kic)  
title('Kırılma Tokluğunun Sıcaklıkla Değişim Grafiği')  
xlabel('T, K')  
ylabel('Kic, MPa*m1/2')
```