

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ SÜNEK KIRILMA MODELLERİNİN YÜKSEK
SICAKLIKLARDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakkı IŞIK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ SÜNEK KIRILMA MODELLERİNİN YÜKSEK
SICAKLIKLARDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hakkı IŞIK
(503081504)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ata MUGAN

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503081504 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hakkı IŞIK** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇEŞİTLİ SÜNEK KIRILMA MODELLERİNİN YÜKSEK SICAKLIKLARDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ata MUGAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **09 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Sünek kırılma modelleri, malzemelerin hasar öncesi plastik deformasyon sınırlarının sayısal olarak belirlenmesine yönelik olarak geliştirilmişlerdir. Bu modeller kullanılarak plastik şekil değişimi altında malzemenin bütünlüğünün bozulduğu nokta kestirilmeye çalışılarak plastik şekil verme işlemlerinin sınırları kestirilmeye çalışılır. Bu çalışma kapsamında sünek hasar modellerinin farklı sıcaklıklar altında nasıl sonuçlar verdiği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Literatürde öne sürülen modeller simülasyonlarda kullanılmış ve yüksek sıcaklık deneyleri ile sayısal sonuçlar doğrulanmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın gerçekleştirilmesindeki büyük yardımları ve desteği için sayın hocam Prof. Dr. Ata MUGAN 'a çok teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarının yapılmasını sağlayan Araş. Gör. Dr. Emin Sünbuloğlu ve Araş. Gör. Ergün Bozdağ'a teşekkür etmeyi borç bilirim.

Haziran 2012

Hakkı Işık
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması	1
1.2.1 Plastik şekil şerme işlemlerinde hasar	1
1.2.2 Hasar çeşitleri.....	1
1.2.3 Hasar oluşumunda etkili olan faktörler.....	2
1.2.4 Gevrek ve sünek kırılma	3
1.2.5 Hasar kriterleri.....	4
1.2.5.1 Ampirik modeller kullanan hasar kriterleri.....	4
1.2.5.2 Çatlak oluşumu ve gelişimi yaklaşımını temel alan hasar kriterleri....	5
1.2.6 Sıcaklık değişiminin hasar üzerindeki etkisi.....	10
1.3 Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrilerinin Elde Edilmesi	12
1.3.1 Çekme deneyi	13
1.3.2 Basma deneyi	16
2. ÇEKME DENYELERİ.....	19
2.1 Giriş	19
2.2 Malzemenin özelliklerinin elde edilmesi.....	19
2.3 Çekme Gerilmesi Diyagramları	19
2.3.1 25 °C Sıcaklıkta çekme deneyi	21
2.3.2 100 °C Sıcaklıkta çekme deneyi.....	24
2.3.3 149°C Sıcaklıkta çekme deneyi	26
2.3.4 204 C Sıcaklıkta çekme deneyi.....	28
2.3.5 260 °C Sıcaklıkta çekme deneyi.....	31
3. FEM MODELLERİ VE ANALİZLERİ	35
3.1 Çekme Deneyi Modelleri.....	35
3.2 25 °C Sıcaklık Hasar Analizi	40
3.3 100 °C Sıcaklık Hasar Analizi	41
3.4 149 °C Sıcaklık Hasar Analizi	43
3.5 204 °C Sıcaklık Hasar Analizi	45
3.6 260 °C Sıcaklık Hasar Analizi	46
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
CL	: Cockroft-Latham Sünek Hasar Modeli
FEA	: Finite Element Analysis
FEM	: Finite Element Method
MPa	: Megapascal
Pa	: Pascal
RVE	: Representative Volume Element

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Deney numunelerine ait boyutlar.....	20
Çizelge 2.2 : 25 °C testlerinden elde edilen malzeme özellikleri	23
Çizelge 2.3 : 100 °C yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları	26
Çizelge 2.4 : 149 °C yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları	28
Çizelge 2.5 : 204 °C yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları	31
Çizelge 2.6 : 260 °C testlerinden elde edilen malzeme özellikleri	33
Çizelge 2.7 : Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylere ait malzeme özellikleri	34
Çizelge 3.1 : FEM modellerinde kullanılan parametreler.	36
Çizelge 3.2 : 7075 alaşımın farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri	39
Çizelge 3.3 : 7075 alaşımın 25 °C de mekanik özellikleri	40
Çizelge 3.4 : 25 °C de 7075 e ait hasar analizi sonuçları	41
Çizelge 3.5 : 7075 alaşımın 100 °C de mekanik özellikleri	42
Çizelge 3.6 : 100 C de 7075 e ait hasar analizi sonuçları	43
Çizelge 3.7 : 7075 alaşımın 149 °C de mekanik özellikleri	43
Çizelge 3.8 : 149 °C de 7075'e ait hasar analizi sonuçları	44
Çizelge 3.9 : 7075 alaşımının 204C de mekanik özellikleri	45
Çizelge 3.10 : 204 °C'de 7075'e ait hasar analizi sonuçları	46
Çizelge 3.11 : 7075 alaşımın 260 °C'de mekanik özellikleri	46
Çizelge 3.12 : 260 °C'de 7075'e ait hasar analizi sonuçları	47
Çizelge 4.1 : Hasar kriterlerinin farklı sıcaklıklardaki FEM analizi sonuçları	49
Çizelge 4.2 : Deneysel ve sayısal kopma çapı değerleri.....	50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Sünek ve gevrek kırılmaya örnek (Koçak, 2003).	3
Şekil 1.2 : Temsili hacim elemanı (Lemaitre, 1996).	6
Şekil 1.3 : Hasarlı temsili hacim elemanı (Lemaitre,1996).	8
Şekil 1.4 : Sıcaklık değişiminin metal malzemelerin çekme ve basma özelliklerine olan etkisi (ASM International, 2002).	11
Şekil 1.5 : AISI 1112 çeliğinin farklı sıcaklıklarda gerilme birim şekil değiştirme eğrileri (ASM International, 2002).	12
Şekil 1.6 : Çekme numunesi ve ilgili önemli büyüklükler (Koçak, 2003).	13
Şekil 1.7 : R ve a boyutları gösterimi (Lange, 1985).	16
Şekil 1.8 : Basma deneyinin şematik olarak gösterimi.	17
Şekil 2.1 : Çekme deneyi numunesine ait önemli boyutlar (Koçak, 2003).	19
Şekil 2.2 : 25 °C testinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	21
Şekil 2.3 : 25 °C testi malzeme eğrisi için Ludwik bağıntısı.	22
Şekil 2.4 : 25 °C testi mühendislik gerilmesi ve gerçek birim şekil değiştirme eğrileri.	23
Şekil 2.5 : 100 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.	24
Şekil 2.6 : 100 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.	25
Şekil 2.7 : 100 °C testi gerilme -birim şekil değiştirme eğrileri.	25
Şekil 2.8 : 149 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.	26
Şekil 2.9 : 149°C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.	27
Şekil 2.10 : 149 °C testi gerilme -birim şekil değiştirme bağıntıları.	28
Şekil 2.11 : 204 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.	29
Şekil 2.12 : 204 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.	30
Şekil 2.13 : 204 °C testi gerilme -birim şekil değiştirme eğrileri.	30
Şekil 2.14 : 260 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.	31
Şekil 2.15 : 260 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.	32
Şekil 2.16 : 260 °C testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.	33
Şekil 2.17 : 7075-T651 malzemesi gerçek gerilme-birim şekil .değiştirme eğrileri.	34
Şekil 3.1 : Hasar analizlerinde kullanılan FEM modeli.	35
Şekil 3.2 : Çekme deneyi öncesi numuneye ait FEM modeli çözüm ağı.	35
Şekil 3.3 : Çekme deneyi sonrası numuneye ait FEM modeli çözüm ağı.	35
Şekil 3.4 : 7075-T6 malzeme özellikleri (ASM International, 2002).	37
Şekil 3.5 : 7075-T6 malzeme özellikleri (ASM International,2002).	38
Şekil 3.6 : 7075-T6 malzemesine ait farklı sıcaklıklardaki gerçek gerilme-birim eğrileri.	39
Şekil 3.7 : 7075-T651 malzemesine ait 25 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi.	40
Şekil 3.8 : 25°C Hasar analizi için FEM modeli.	41
Şekil 3.9 : 7075-T651 malzemesi için 100 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi.	42
Şekil 3.10 : 7075-T651 149 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi.	44

Şekil 3.11 : 7075-T651 malzemesine ait 204 °C gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	45
Şekil 3.12 : 7075-T651 260 C de gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	47

ÇEŞİTLİ SÜNEK KIRILMA MODELLERİNİN YÜKSEK SICAKLIKLARDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Plastik şekillendirilen malzemelerdeki hasarın temel sebebi sünek kırılmalardır. Sünek kırılmalar hasar modelleri ile tahmin edilebilir. Bu çalışma kapsamında Cockcroft & Latham, Freudenthal, Ayada, Brozzo gibi hasar modellerinin farklı sıcaklıklardaki sonuçları incelenmiştir.

Öncelikle literatür araştırması yapılmış ve mevcut sünek hasar kriterleri incelenmiştir. Sünek hasar kriterleri hasarın oluşumunu ele alışı bakımından, ampirik modeller ile çatlak oluşumu ve gelişimi yaklaşımını temel alan modeller olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.

Üzerinde yoğunlaşıp tez çalışmasının geniş kapsamlı olarak ele aldığı kısım ise ampirik modeller olmuştur. Bunun sebebi ise sayısal modellemelerin ve analizlerin çatlak oluşumu ve gelişimi yaklaşımını temel alan modellere kıyasla biraz daha az sayıda deneysel girdi gerektirmesidir.

Çalışmada hasar oluşumunu incelemek üzere özellikle AL 7075 alaşımı tercih edilmiştir. Bu tercihin sebepleri ise literatürde kapsamlı olarak farklı sıcaklıklarda yapılmış çekme deneyi sonuçlarını mevcut olması, mekanik dayanımı ve kütsel yoğunluk özellikleri açısından endüstride geniş kapsamlı kullanım alanı bulması ve mekanik özellikleri açısından laboratuvarımızda bulunan sıcaklık şartlandırma çekme deneyi makinasının çekme kuvvetini aşmayacak kesitlerde boyutlandırılabilmesi olmuştur. Malzeme özelliklerinin doğrulanması, hasar ve kopma bölgelerinin tesbit edilmesi için İ.T.Ü. Makina Fakültesi Mukavemet Laboratuvarında sıcaklık şartlandırma çekme deneyi makinası kullanılarak 25 °C, 100 °C, 149 °C, 204 °C ve 260 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta çekme testleri yapılmış, sonuçları kaydedilmiş ve bu sonuçlar kullanılarak AL7075 alaşımının mekanik özellikleri elde edilmiştir. Özellikle bu beş sıcaklık değerinin seçilmesinin nedeni ise bu sıcaklıklara ait detaylı çekme deneyi testi sonuçlarının literatürde mevcut olmasıdır.

Çalışma kapsamında DEFORM 2D V8.1 paket yazılımı simülasyon programı olarak kullanılarak farklı sıcaklıklardaki AL 7075 alaşıma ait mekanik özellikleri modelleme girdisi olarak kullanılmış, çekme deneyi modellemeleri yapılarak her bir modelin farklı sıcaklıklardaki sonuçları elde edilmiş ve sonrasında her bir sıcaklık için çekme deneyleri yapılış ve model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Normalize edilmiş Cockcroft ve Latham ile Brozzo modelleri hariç, çalışma sonucunda modellerin hasar oluşan bölgeleri tespit edebildikleri ancak sayısal olarak hasar oluşumunu tam olarak tespit edemedikleri görülmüştür.

INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF SEVEREAL DUCTILE FRACTURE MODELS IN HIGH TEMPERATURE

SUMMARY

The main reason of failure in bulk deformation processes is ductile fracture. Ductile fractures can be predicted with the help of several ductile fracture criterias found in literature. In the scope of this study, the behaviour of ductile fracture criterias such as Cockcroft&Latham, Cockcroft-Latham Normalized, Freudenthal, Ayada and Brozzo. These ductile fracture criterias are based on ampirical models that aims to predict fracture regions in a bulk deformation process using basic stress and strain components such as the equivalent stress, principal stresses and equivalent strain.

There are also other ductile damage models that can be implemented to predict ductile fracture in bulk deformation procesess like Oyane and Rice& Tracy but these models requires experimental input to calibrate model variables so as to obtain an implementable model in CAE. So only five ductile fracture criterias consisting of Cockcroft&Latham, Cockcroft-Latham Normalized, Freudenthal, Ayada and Brozzo are handled in the scope of this study.

Firstly, a liteature survey about ductile fracture models are conducted and models are inspected. Several models are found about ductile fracture prediction. Models found in literature are classified in two main groups. First group is damage criteria using theoretical void coalescence and growth. Metals are organized in crystals or grains, a regular array of atoms except on many lines of dislocations where some atoms are missing. If a shear stress is applied, the dislocations may move by the displacement of bonds, thus creating a plastic strain by slip.

Debonding is the beginning of the damage process. If the dislocation is stopped by a micro defect concentration, it creates a constrained zone in which another dislocation may be stopped. This process occurs with debonding, where several arrests of dislocations nucleate a micro crack. Other damage mechanisms in metals are intergranular debonding and decohesion between inclusions. Elasticity is directly influenced by the damage, since the number of atomic bonds responsible for elasticity decreases with damage.

Plasticity is directly related to slips. In metals, slips occur by movement of dislocations. Damage influences plastic strains because the decrease in the elementary resistance area, resulting from the decrease in the number of bonds, increases the effective stress .

Damage may be interpreted at the microscale as the creation of microsurfaces of discontinuities: breaking of atomic bonds and plastic enlargement of microcavities.

Mesoscale is the scale in which Representative Volume Element (RVE) is defined as follows: RVE is small enough to avoid smoothing of high gradients but large enough to represent an average of the microprocesses.

At the mesoscale, the number of broken bonds or the pattern of microcavities may be approximated in any plane by the area of the intersections of all the flaws with that plane. This area is scaled by the size of the representative volume element, showing the effect of micro defects over the mesoscale volume element.

The second group is damage criterias using empirical and semiempirical models. Typical criteria for ductile fracture are usually based on combinations of stress and strain or strain rate, rather than on either of these quantities separately. All the integrated stress-strain criteria based on empirical and semiempirical approach are versions of Freudenthal's critical plastic work per unit of volume .

In view of the importance of the largest tensile stress, Cockcroft and Latham have suggested an alternative fracture criterion based on a critical value of the tensile strain energy per unit of volume .

Explicit dependence on the level of both the largest (tensile) principal stress, and the hydrostatic stress, was proposed by Brozzo by means of an empirical relations.

In this study, experimental study AL7075 aluminum alloy is specifically chosen. Due to availability of tensile test results at high temperatures in literature and having various application areas in industry as a structural material owing to its excellent mechanical strength, low mass density, and mechanical properties that enable to prepare tensile specimens in proper dimensions that does not exceed tensile force limits of temperature conditioned tensile test machine found in mechanical experiments laboratory in I.T.U Mechanical Engineering Faculty, this alloy is chosen as the experiment material to prepare tensile test specimens.

Tensile test results are obtained from Matweb Database and strain-stress curves at high temperatures are from Atlas of Stress and Strain Curves.

To verify tensile mechanical specification of experiment material and detect fracture region, fracture pattern, diameter at fracture as an important criteria for FEM modelling and analysis, high temperature tensile tests are conducted. Besides at 25 °C room temperature, tests were carried on at 100 °C 149 °C, 204 °C and 260 °C. These temperatures are specifically chosen because of availability of tensile test curves at relevant temperature in literature. Tests are conducted at five different temperatures until fracture and results are recorded. In relevant sections, results of tensile tests are given.

A tension test consists of pulling a sample of material with a tensile load until it breaks into two parts. The test specimen usually has circular cross section. The ends of tensile specimens are usually enlarged to provide extra area for gripping and to avoid the damage of sample where it is being gripped.

The pulling load P may be divided by the initial cross-sectional area A , to obtain engineering stress in the specimen at any time during the test.

It is reasonable to assume that all of the grip parts and the specimen ends are nearly

rigid. In this case, virtually all of the change in length is due to deformation within the straight section of the test specimen.

The ultimate tensile strength is the highest engineering stress reached before fracture. If the fracture behavior is brittle, the ultimate strength occurs at the point of fracture. However, in ductile metals, engineering stress reaches a maximum and then decreases before fracture. The highest load reached at any point during the test $P_{\max}$ is used to obtain the ultimate strength by dividing with the initial cross-sectional area.

The departure from linear-elastic behavior is called yielding. This is simply because the stresses that cause yielding result in rapidly increasing deformation due to the contribution of plastic strain. The yielding event can be characterized by several methods. The simplest is to identify the stress where the first departure from linearity occurs.

Some materials may demonstrate a stress-strain curve with a gradually decreasing slope and no proportional limit. Even where there is a definite linear region, it is difficult to precisely locate where it finishes. The value of proportional limit depends on judgement, so that this is a poorly defined quantity. Another quantity sometimes defined is the elastic limit, which is the highest stress that does not lead plastic deformation. Determination of this quantity is difficult, as cyclic unloading to control for permanent deformation is necessary.

A third approach is the offset method. A straight line is drawn parallel to the elastic slope, E or E_t , but offset by an arbitrary amount. The intersection of this line with the engineering stress-strain curve is a well-defined point that is not affected by judgement. This is called the offset yield strength, $0.2\%\sigma$. The most widely used and standardized offset for engineering metals is a strain of 0.002, that is 0.2% .

After experimental study, next step is FEM modelling and analysis. In this study, DEFORM 2D V8.1 software is used for modelling. In FEM simulations, the modeled process is analyzed in several steps. For each step the strain-rate, strain, stress and other parameters for damage are calculated.

If the distortion of elements gets too large, a new mesh must be generated and the data from the old mesh is interpolated to the new mesh.

In this study, FEM simulation program DEFORM 2D version 8.1 is used throughout the modeling of experiments, including failure and friction analysis. DEFORM is one of the commercial FEM applications, into which some of the damage models are implemented.

Mechanical properties of AL7075 material is used as an input for modelling and damage values are obtained at necking diameter prior to fracture at each temperature mentioned before. Numerical results and experimental results are compared and failure values are obtained belonging to each ductile damage model mentioned before.

Except normalized Cockroft and Latham and Brozzo models, it is shown that the current damage models can foresee the location of failure quite successfully but are not able to predict the failure numerically.

1. GİRİŞ

Metallere plastik şekil verme işlemlerinde şekil değişimini sınırlayan önemli etken sünek hasarlardır. Tez kapsamında hasar modelleri hem sayısal hem de deneysel olarak incelenecektir.

1.1 Tezin Amacı

Plastik deformasyon sonucu oluşan hasarın hesaplanabilmesi plastik şekil verme işlemlerinin tasarımında oldukça faydalı olacak ve olabilecek en büyük miktardaki şekil değiştirme miktarını doğru ortaya konulmasına fayda sağlayacaktır.

Tez çalışması kapsamında sünek hasar modellerinin yüksek sıcaklıklarda verdiği sonuçların deneysel çalışmalar ile ne kadar örtüştüğü ortaya konulmaya çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Plastik şekil verme işlemlerinde hasar

Plastik şekil değiştirme işlemine tabi tutulan bir iş parçası işlem sonunda tasarım koşullarını sağlamıyor ise üzerinde hasar olduğu söylenebilir.

İlerleyen bölümlerde plastik şekil verme işleminde karşılaşılan hasar tipleri verilecek ve sünek kırılma ile gevrek kırılma arasındaki farklar ele alınacaktır.

1.2.2 Hasar çeşitleri

Soğuk şekil verme işlemlerinde oluşan hasar tipleri altıya ayrılabilir. Bunlar katlanma, yırtılma, çatlak, yüzey kusuru, şekil kusurları ve yapısal kusurlardır (Arentoft, 1995).

Bu hasar tipleri kendi içinde çeşitli gruplara ayrılabilir. Katlanma işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde görülen, kalıp yüzeyi ile malzeme yüzeyinin kaynaşma olmaksızın birbiri ile aşırı sürtünmesi sonucu oluşan kusurlardır.

Yırtılma hasarları, şekil değişiminin da kayma bantlarında yığılması sonucu oluşur. Bu hasar tipi işlemin sonraki aşamalarında çatlağa sebep olabilir. Yırtılma hasarları

şekil değişimi sırasında, malzeme akışının malzemem akışının olmadığı ölü bölgelerden geçtiğinde de oluşabilir (Koçak, 2003).

Yüzey kusurları adından da belli olacağı üzere yüzeyde oluşan kusurlardır. Plastik şekil verme işlemi sonrasında talaş kaldırma gereksinimi doğabilir ve kalıp ömrünün kısılmasına sebep olabilir. Portakal kabuğu şeklinde oluşan yüzey kusurları bu hasara örnek gösterilebilir (Koçak, 2003).

Şekil kusurları ise ürünün tasarım boyutlarından farklı bir şekle sahip olmasıdır. Bu kusur genellikle malzemenin kalıbın her bölgesini doldurmaması sonucu oluşur. Ayrıca kalıbın aşınması sonucu bu kusur oluşabilir (Koçak, 2003).

Yapısal kusurlar ise malazeme özelliklerinde kaynaklanır ve düşük süneklığe sahip malzemelerde görülen kusurlardır. Çatlaklar, yırtılmalar ve iç boşluklar gözle görülebilir makroskopik kusurlardır ve üç grup altında toplanabilir: Serbest yüzey kusurları, malzeme ile kalıp arayüzünde oluşan kusurlar ve malzemenin içinde oluşan kusurlar (Koçak, 2003).

Malzemenin serbest yüzeyi iki eksenli gerilme altında iken diğer kısımları üç boyutlu gerilmeye maruz kalmaktadır. Yüzey kusurları optik metodlarla tespit edilebilirken malzemenin iç kısımlarında oluşan kusurlar ise farklı metodlar gerektirir

1.2.3 Hasar oluşumunda etkili olan faktörler.

Şekillendirme işleminde malzemedeki hasar oluşumu üzerinde malzeme, şekil, malzeme içindeki katışıklar ve homojenliği etkileyen diğer etmenler önemli etkiye sahiptir. Ayrıca gerilme, birim uzama hızı ve sıcaklık dağılımı da şekillendirilebilirlik üzerinde etkiye sahiptir (Abdel-Rahman, 1993).

Malzemenin şekil değişiminden deviatoric gerilmeler sorumlu iken hidrostatik gerilmeler ise malzemenin sünekliliğinden ve şekillendirilebilirliğinden sorumludurlar. Yüksek hidrostatik basınçlar malzeme içindeki çatlakların ilerlemesini önlediği için malzemenin şekillendirilebilirliğini artırır. Aynı şekilde yüksek hidrostatik çekme gerilmeleri ise malzeme içindeki çatlakları ilerletme yönünde etki edeceği için hasar oluşumunu hızlandırır, şekillendirilebilirlik üzerinde olumsuz etki yapar. Malzeme içindeki her bir noktanın takip ettiği gerilme çizgileri çatlak analizinde önemlidir ve şekillendirme işleminde kullanılan malzemenin, kalıbın şekline ve malzeme ile kalıp arasındaki yağlama özelliklerine bağlıdır.

1.2.4 Gevrek ve sünek kırılma

Malzemenin hasara uğradığı sırada gösterdiği şekil değişimi miktarına göre kırılmanın gevrek veya sünek olduğuna karar verilir. Malzeme şekil değişimi sırasında belirgin bir uzama veya şekil değişimi ve kopma bölgesinde bir boyun verme eğilimi var ise kırılma sünek olarak adlandırılır. Eğer belirgin bir şekil değişimi yok ise gevrek kırılmadan bahsedilir. Ancak kırılmanın gevrek veya sünek olup olmadığına karar verebilmek için belirli bir şekil değişikliği miktarı tanımlanmış değildir. Şekil 1.1 de gevrek ve sünek kırılmada kırılma bölgelerindeki farklılıklar görülmektedir.



Şekil 1.1 : Sünek ve gevrek kırılmaya örnek (Koçak, 2003).

Sünek kırılmalar aşağıda verilen özellikleri gösterirler.

- Kırılma öncesinde büyük miktarda plastik şekil değişimi gösterirler.
- Kırılma sonrası gözlenen yüzey mat görünümündedir.
- Boyun vermeden dolayı kopma yüzeyi kesit alanı malzemenin geri kalan kısmından daha küçüktür.
- Çatlak ilerleme hızı yavaştır.

Gevrek kırılmalar ise aşağıdaki özelliklere sahiptirler.

- Kırılma öncesinde belirgin bir plastik şekil değişimi gözlenmez.
- Kırılma yüzeyi genellikle düzdür.
- Kırılma yüzeyi tanecikli ve kristalli bir yapıda görünür ve parlaktır.
- Çatlak ilerlemesi çok hızlıdır ve kırılma sırasında şiddetli bir ses oluşur.

1.2.5 Hasar kriterleri

Malzeme içerisinde hasar oluşumu sonucu kırılmaya giden fiziksel bir süreçtir. Hasar mekaniği ise aşağıda verilen hasar mekanizmalarını kapsayan bir disiplindir (Lemaitre,1996).

- a) Malzeme içindeki hasarlı bölgelerin etrafında ve mikro gerilmelerin birikmesi ve malzemeyi bir arada tutan bağları kırılması.
- b) Malzeme içinde mikro ölçekte çatlak ve boşlukların ilerleyip birleşmesi ve orta ölçekte bir çatlığa sebep olması.
- c) Oluşan bu orta ölçekteki çatlığın makro boyutlara ulaşması.

Hasar oluşunda görülen ilk iki aşama sürekli ortam mekaniği kapsamında ele alınırken son aşama ise kırılma mekaniği kapsamında incelenmektedir.

Literatürde çatlak oluşumunu tespit etmek amacı ile kritik bir hasar değeri hesaplayan çeşitli hasar kriterleri mevcuttur. Birçok sünek kırılma modelinde temel düşünce kırılmanın, hasar miktarının belirli bir kritik değere ulaştığında kırılma olduğu şeklindedir. Bu kritik hasar değeri ise malzemeye bağlı olarak değişir.

1.2.5.1 Ampirik modeller kullanan hasar kriterleri

Sünek kırılma kriterlerinde genellikle gerilme, birim şekil değiştirme ve birim uzama hızı verilerinden yola çıkarak kritik bir hasar değeri belirlenir (Koçak, 2003).

Gerilme ve birim şekil değişikliğini temel alan tüm ampirik ve yarı ampirik hasar kriterleri Freudenthal tarafından ortaya konan plastik şekil değişimi enerji yoğunluğu yaklaşımından türetilmiştir.

Freudenthal hasar modeli; $\bar{\sigma}$ etkin gerilme, $d\bar{\epsilon}$ etkin diferansiyel birim şekil değişimi, $\bar{\epsilon}$ ise hasar anındaki etkin birim şekil değişim miktarı olmak üzere

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_F} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (1.1)$$

denklemleri ile ifade edilebilir (Freudenthal 1950).

Cockroft-Latham Hasar modelinde ise en büyük asal gerilme dikkate alınmış ve birim hacimdeki birim şekil değiştirme enerjisi incelenerek yeni bir hasar kriteri

ortaya konulmuştur. (Cockroft, 1968). Bu model σ_1 en büyük asal gerilme olmak üzere

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_F} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Normalize edilmiş Cockroft-Latham hasar modeli ise;

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_F} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_3 \quad (1.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Hasar oluşumunun hem en büyük asal gerilmeye σ_1 hem de hidrostatik gerilmeye σ_m bağlı olmasından dolayı Brozzo tarafından yeni bir ampirik hasar modeli ortaya konulmuştur (Brozzo,1972).

Bu model ise

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_F} \frac{2\sigma_1}{3(\bar{\sigma} - \sigma_m)} d\bar{\epsilon} = C_4 \quad (1.4)$$

bağıntısı ile gösterilir.

Benzer bir hasar modeli Ayada tarafından ortaya konulmuştur

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_F} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_5 \quad (1.5)$$

1.2.5.2 Çatlak oluşumu ve gelişimi yaklaşımını temel alan hasar kriterleri

Kristal yapıda bulunan metallerde tanecik sınırları arasındaki bağların kopması sonucu malzeme içinde hasar oluşumu başlar. Malzeme sıcaklığının artması ile de kristal yapı içindeki bağlar zayıflamaya başlar.

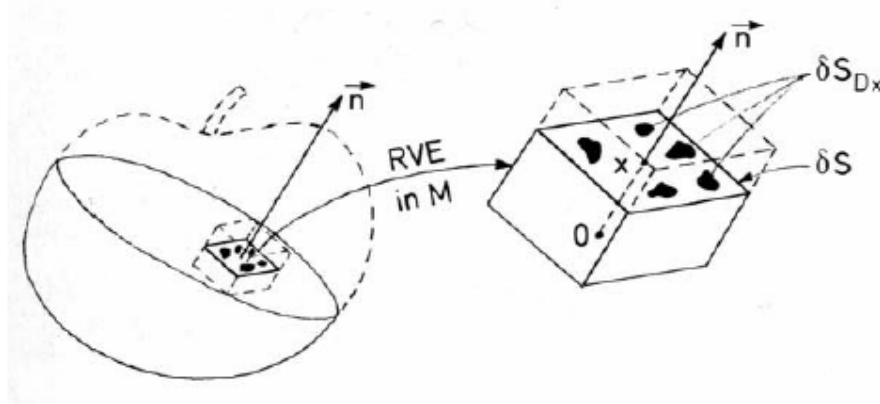
Tanecik sınırlarındaki bağların kopması hasar oluşumunun başlangıcını oluşturur. Dislokasyonların, malzeme içindeki dislokasyonun ilerlemesini önleyen hasarlı bölgelerde yoğunlaşması sonucu çatlak oluşumu ve gelişimi gözlenir (Lemaitre,1996).

Plastik şekil değişimi ise malzeme içindeki tanecik sınırlarında oluşan şekil değişiminden kaynaklanır. Malzeme içindeki hasar oluşumu ve gelişimi ise plastik şekil değişimini arttırır. Hasar oluşumu sunucu malzeme üzerindeki kuvvetleri taşıyan etkin alan azalır ve plastik şekil değişimine sebep olan etkin gerilmelerde artışa sebep olur.

Hasar kavramı mikro ölçekte tanecikler arası bağlarda kırılma, mikro çatlakların oluşumu ve gelişimi olarak ifade edilebilir. Orta ölçekte ise bir temsili hacim elemanı (RVE- Representative Volume Element) tanımlanır. Bu hacim elemanı içerisinde malzeme içerisinde oluşan çatlaklar temsili olarak gösterilir ve hesaplamalarda, RVE içindeki hasar-çatlak oluşumun aynı oranda olduğu varsayılır.

Şekilde Kachanov tarafından ifade edilen, M noktasında ve apsisi n doğrultusunda olmak üzere bir boyutlu yüzeysel hasar değişkeni ve bir RVE tanımlanmıştır (Lemaitre,1996)

M noktasında ve normal n ve apsisi x yönünde ola bu eleman üzerinde oluşan hasar, δS_{Dx} , çatlakların oluşturduğu toplam alan δS ise ilgili düzlemde bulunan toplam alandır.



Şekil 1.2 : Temsili hacim elemanı (Lemaitre, 1996).

$$D\left(M, \vec{n}\right) = \frac{\delta S_{Dx}}{\delta S} \quad (1.6)$$

İlgili doğrultuda x' e bağlı olarak değişen tüm düzlemler arasında en çok hasar içeren düzleme ait hasar miktarı,

$$D\left(M, \vec{n}\right) = \text{Max}_{(x)} \left[D\left(M, \vec{n}, x\right) \right] \quad (1.7)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir.

Tüm doğrular için düşünüldüğünde ise x koordinatı ortadan kalkar ve hasar bağıntısı;

$$D\left(M, \vec{n}\right) = \frac{S_D}{S} \quad (1.8)$$

haline gelir.

Aşağıdaki şekildeki bir boyutlu hasar dağılımı için yüzey hasarı, $0 \leq D \leq 1$ olmak üzere

$$D = \frac{S_D}{S} \quad (1.9)$$

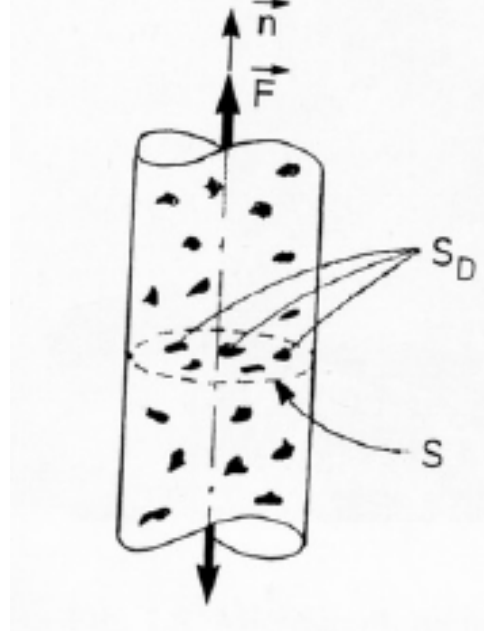
bağıntısı ile ifade edilir. $D=0$ durumu hasarın olmadığı ve malzemenin bütünlük içinde olduğu durumu, $D=1$ ise tüm yüzey alanını kapsayan hasarı ve kopma durumunu gösterir.

Bütünlüğün bozulması yani tam hasar ise bir kritik $D < 1$ durumunda kararlılığın bozulması ve kohezyon kuvvetlerinin malzeme üzerindeki gerilmeyi taşıyamaması sonucu ortaya çıkar. Bu kritik hasar durumu D_C gösterilir. D_C , kritik hasar değeri malzeme özelliklerine ve yükleme şartlarına bağlı olarak değişir. Bu durumda malzeme içerisinde oluşan D hasar değeri, $0 \leq D \leq D_C$ değerleri arasında değişir.

Malzeme içindeki oluşan hasarı ölçmek için kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

a) Doğrudan ölçümler: Bu yöntemde çatlak görüntüleri doğrudan görsel olarak incelenir.

b) Elastisite modülündeki değişim: Malzeme içinde oluşan çatlaklar elastisite modülünün azalmasına yol açar. Hasara uğramış malzeme çekme deneyine tabi tutulursa malzeme içinde oluşan hasarın düzeyi hakkında fikir sahibi olunabilir. Malzeme içi içindeki hasa temsili olarak Şekil 1.3 de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : Hasarlı temsili hacim elemanı (Lemaitre,1996).

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (1.10)$$

$\bar{E} = E(1-D)$ olduğu kabul edilirse malzeme içinde oluşan hasar

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad (1.11)$$

olarak ifade edilebilir.

- c) Mikrosertlik değişimi: Sertlikteki değişim malzeme içinde oluşan hasarın boyutu hakkında fikir verebilir. Hasar artıkça sertlik azalma eğilimi gösterir.
- d) Yoğunluk değişimi: Malzeme içinde oluşan çatlak ve boşluklar sebebi ile birim kütledeki malzame daha fazla hacme sahip olur.Bu olgudan yola çıkılarak malzeme içindeki hasar tespit edilebilir.
- e) Elektriksel direnç değişimi: Malzeme içindeki çatlaklar birim kesit alanındaki etkin yüzeyi azalttığı için malzemenin elektriksel direncini arttırır. Buradan yola çıkarak hasar miktarı bulunabilir.
- f)Akustik yayılım: Bu yöntem hasarın yerini tespit etmekte işe yarar fakat miktarı konusunda kesin bir bilgi vermez.

Rabotnov tarafından ortaya atılan etkin gerilme kavramına göre şekil 1.2 de gösterilen RVE $\vec{F} = F \vec{n}$ kuvveti etkisi altında iken etkin gerilme

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S} \quad (1.12)$$

olarak ifade edilebilir (Lemaitre,1996).

Malzeme içinde oluşan çatlak ve boşluklar S_D ile gösterilirse, çekme gerilmesi durumunda etkin gerilme ,

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S - S_D} \quad (1.13)$$

halini alır.

Hasar parametresi $D = S_D / S$ olarak ifade edilirse, etkin gerilme

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S \left(1 - \frac{S_D}{S} \right)} \quad (1.14)$$

veya ,

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (1.15)$$

halini alır.

Bu ifade çekme gerilmesi halinde geçerlidir. Basma gerilmesi altında ise çatlaklar kapanma eğilimi göstereceği için etkin alan $S - S_D$ değerinden daha büyük olacaktır.

Eşdeğer birim şekil değiştirme prensibine göre (Lemaitre, 1991) hasarsız malzeme için geçerli olan gerilme-birim şekil değiştirme ile ilgili temel denklemler içinde yer alan gerilme terimi hasarlı malzeme için geçerli olan etkin gerilme terimi ile değiştirilirse, hasarlı malzeme içinde geçerli olur.

$$D=0 \rightarrow \varepsilon = f(\sigma, \dots)$$

$$0 < D < D_C \rightarrow \varepsilon = f\left(\frac{\sigma}{1-D}\right)$$

Malzemelerde kırılmanın mikro çatlakların büyüyüp birleşmesi ile meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Bu ilişki malzeme içindeki çatlak ve boşluklar arasında bulunan mesafeye bağlı olan bir hasar kriterinin geliştirilmesi için fikir vermiştir. (Mc Clintock, 1968). Bu hasar kriteri ;

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left[\frac{\sqrt{3}}{2(n-1)} \sin \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \frac{(\sigma_a + \sigma_b)}{\bar{\sigma}} \right\} + \frac{3}{4} \frac{(\sigma_a + \sigma_b)}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\varepsilon} = C_6 \quad (1.17)$$

bağıntısıyla gösterilebilir. Burada n, Ludwik bağıntısında yer alan pekleşme (strain hardening) katsayısı, σ_a ve σ_b ise en az ve en çok hasar oluşumunun gözlemlendiği doğrultulardaki asal gerilmelerdir.

Rice (1969) ise içinde boşluklar bulunduran elastik rijit, sıkıştırılamaz plastik malzemede akış alanını tanımlayan varyasyonel yöntem ortaya koymuştur. Bu prensibe göre malzeme içindeki mikro çatlak ve boşlukların ilerleme hızı, ortalama normal gerilmenin akma gerilmesine oranına üstel bağlı olarak değişmektedir.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} e^{\left(\frac{A\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right)} d\bar{\varepsilon} = C_7 \quad (1.18)$$

Bu denklemde A malzemeye bağlı bir sabittir ve deney ile tespit edilir.

1.2.6 Sıcaklık değişiminin hasar üzerindeki etkisi

Kristal sıcaklık değişkeninin doğrudan hasar bağıntısı içinde yer aldığı bir hasar kriteri henüz literatürde bulunmamaktadır.

Hasar kriterleri hesaplanırken malzemeye ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi gerekli olduğu için, sıcaklık ile malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme bağıntılarını ortaya koyan modeller dolaylı olarak hasar modelleri içinde yer alabilir.

Sıcaklığın değişmesi ile malzemenin akma ve kopma gerilmesi değerlerinin değiştiği bilinen bir gerçektir. Ancak aralarındaki ilişkiyi kesin olarak açıklayan analitik bir bağ henüz ortaya konamamıştır. Bununla beraber bazı ampirik yaklaşımlar mevcuttur. Bu modeller arasında en fazla kullanılan ve ticari sonlu eleman programlarında yer bulan model Johnson-Cook modelidir (Dorogoy, Rittel 2008).

Johnson-Cook malzeme modeli aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma^0 = (A + B(\epsilon^p)^n) \left(1 + C \log \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \hat{T}^m \right) \quad (1.20)$$

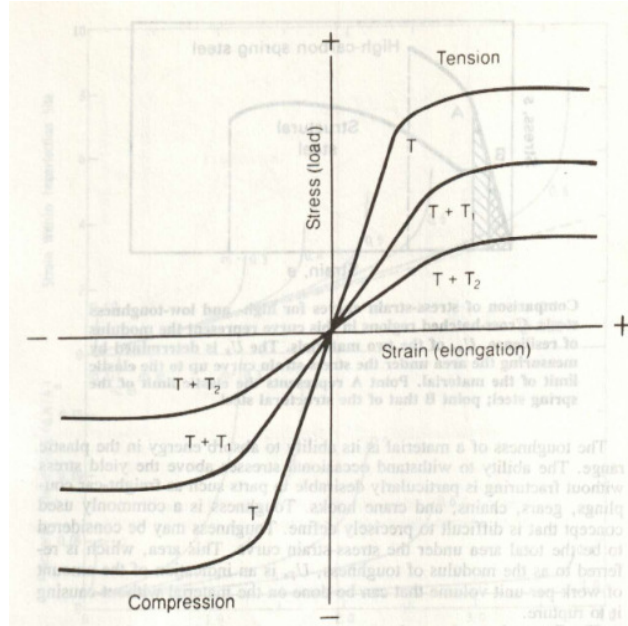
$$\hat{T} = \begin{cases} T < T_r & \text{ise } T < T_r \\ T_r \leq T \leq T_M & \text{ise } \frac{T - T_r}{T_M - T_r} \\ T > T_M & \text{ise } 1 \end{cases} \quad (1.21)$$

Bu denklemde ϵ^p eşdeğer birim şekil değiştirme, A, B, n ve m deneyle tespit edilen malzeme parametreleri, T malzeme sıcaklığı, T_M malzemenin erime sıcaklığıdır.

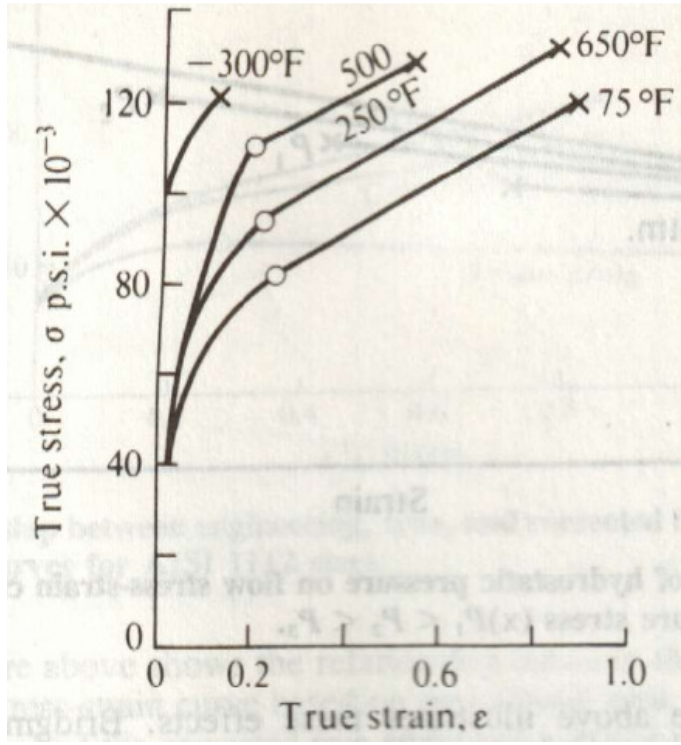
Johnson-Cook malzeme modeli ile malzemenin sıcaklığa bağlı değişen gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri bulunabilir ve bir hasar modeli için bu eğriler girdi oluşturabilir.

Malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sıcaklık değişimlerine duyarlıdır. Sıcaklık artışı ile malzemenin akma ve kopma dayanımları azalmaktadır.

Aşağıdaki şekillerde farklı malzemelerin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir.



Şekil 1.4 : Sıcaklık değişiminin metal malzemelerin çekme ve basma özelliklerine olan etkisi (ASM International, 2002).



Şekil 1.5 : AISI 1112 çeliğinin farklı sıcaklıklarda gerilme birim şekil değiştirme eğrileri (ASM International, 2002).

1.3 Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrilerinin Elde Edilmesi

Sonlu eleman analizlerinde kullanılacak olan gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çekme deneylerinden elde edilmektedir. Modelleme sonucunda elde edilecek son boyutlar ve gerilme-birim şekil değiştirme dağılımlarının gerçeğe yakın olması için malzemeye ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi gerekir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesinde en çok kullanılan yöntem çekme deneyleridir. Bu yöntem malzemeye ait doğru sonuçlar vermekle beraber düşük birim şekil değiştirme değerleri elde edilmektedir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesinde kullanılan bir başka yöntem ise basma deneyleridir. Bu deneylerde malzemeye ait yüksek birim şekil değiştirme değerleri elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında ise sadece çekme deneyleri uygulanmıştır.

1.3.1 Çekme deneyi

Çekme deneyleri bir numuneyi çekme yükü altında kopuncaya kadar uzatma işlemi olarak tanımlanabilir. Numuneler genellikle silindirik bir geometriye sahip olmakla beraber ince levha şeklinde de olabilirler. Numunenin her iki ucu, çekme işlemi sırasında numunenin test makinası tarafından tutulabilmesi ve tutma bölgelerinden kırılmaması için orta kısmından biraz daha kalın veya geniş yapılır.

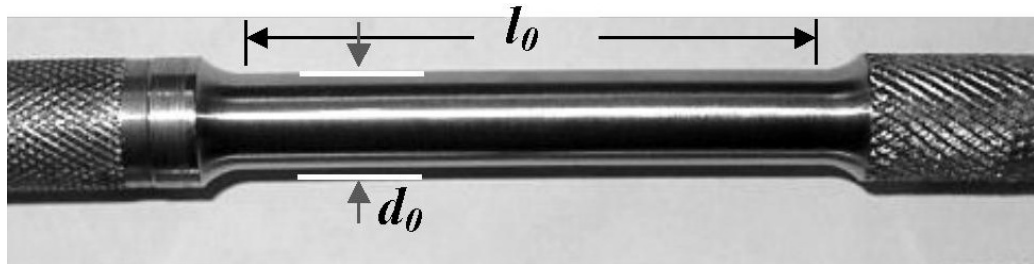
Numune üzerine uygulanan çekme kuvveti P numunenin ilk kesit alanına A_0 bölünmesi ile elde edilen değer mühendislik gerilmesidir.

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0} \quad (1.22)$$

Çekme testine tabi tutulan numunenin çekme kuvveti doğrultusundaki eksenel yer değiştirmesi orta kısmında bulunan uniform kesitli bölüm üzerinden ölçülür. Bu kısmın test başlangıcındaki uzunluğu L_0 olarak kabul edilir. Mühendislik birim şekil değiştirme değeri bu uzunluktaki değişimden ΔL hesaplanabilir.

$$\epsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.23)$$

Çekme deneylerinde genellikle numunenin iki ucundaki tutma amaçlı kalın kısımlar rijit kabul edilirler. Bu varsayımdan yola çıkılarak deney sırasında oluşan tüm uzamanın numunenin ölçüm kısmında olduğu kabul edilir.



Şekil 1.6 : Çekme numunesi ve ilgili önemli büyüklükler
(Koçak, 2003).

Malzemeye ait çekme dayanımı ise deney sırasında kopma öncesinde ulaşılan gerilme değeridir. Eğer numune kırılğan bir malzeme ise en yüksek çekme gerilmesi kopmanın hemen öncesinde elde edilir. Ancak sünek malzemelerde maksimum çekme dayanımı en yüksek değeriğne ulaşıtıktan sonra kopma noktasına kadar bir

miktar azalır. Deney sırasında ölçülen en yüksek kuvvet P_{MAX} numunenin ilk kesit alanına A_0 bölünerek malzemeye ait çekme dayanımı değeri elde edilir.

$$\sigma_U = \frac{P_{MAX}}{A_0} \quad (1.24)$$

Deney esnasında malzemenin doğrusal-elastik davranıştan uzaklaşması akma olarak adlandırılır. Akmanın temel sebebi malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin malzemenin elastik şekil değiştirme sınırlarını aşıp geri dönülmez bir şekilde plastik olarak şekil değişimine yol açmasıdır. Akma birkaç yöntemle tespit edilebilir. En basit yöntem gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin lineerlikten uzaklaştığı noktanın bulunup kuvvet ve deformasyon miktarının tespit edilmesidir. Bazı malzemelerin gerilme şekil değiştirme eğrileri elastik bölgeden yavaş yavaş gittikçe uzaklaşan bir davranış gösterirler ve tam olarak eğrinin nerede plastik davranışa başladığını kestirmek güçtür. Bir başka metod ise elastik sınırın bulunmasıdır. Bu yöntemde malzeme üzerinde plastik şekil değişimi yaratan en yüksek gerilme değeri bulunmaya çalışılır. Deney sırasında plastik şekil değişimi olup olmadığını anlamak için sık sık malzeme üzerindeki yükleme kaldırılır ve malzemenin ilk konumuna dönüp dönmediği kontrol edilir. Üçüncü yöntem ise offset yöntemidir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik kısmına paralel 0.002ε kadar uzaklıkta çizilen doğrunun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini kestiği nokta akma noktası olarak tanımlanır.

Gerçek gerilme değeri σ_{true} anlık yük P 'nin anlık kesit alanına A bölünmesi sonucu elde edilen değerdir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.25)$$

Buna bağlı olarak gerçek gerilme değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \left(\frac{A_0}{A} \right) \quad (1.26)$$

Gerçek birim şekil değiştirme değeri ise aşağıdaki integral ile tanımlanabilir.

$$\varepsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (1.27)$$

Bu ifadede $L = L_0 + \Delta L$ son uzunluktur. $\varepsilon_{eng} = \Delta L / L_0$ ifadesinin mühendislik birim şekil değiştirme değerini verdiği dikkate alınırsa, ε_{true} ile ε_{eng} arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$\varepsilon_{true} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (1.28)$$

Sünek malzemelerde birim şekil değiştirme miktarı akma bölgesinin ötesinde oldukça yüksektir. Çekme deneyinde hacim değişimi elastik bölgede küçük miktarlarda iken akma başlayıp plastik bölgeye geçildiğinde ise hacim değişimi görülmez. Bu yüzden deney boyunca numune hacminin sabit kaldığı kabul edilebilir.

$$A_0 L_0 = AL \quad (1.29)$$

Buradan;

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \varepsilon_{eng} \quad (1.30)$$

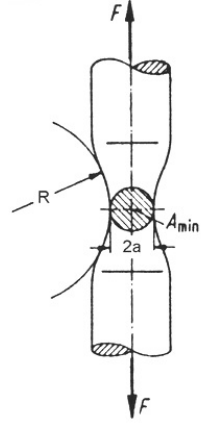
Yukarıdaki ifade, denklem 1.27'de yerine konulursa gerçek birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon_{true} = \ln \left(\frac{A_0}{A} \right) = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (1.31)$$

denklemini ile ifade edilebilir.

Çekme testinde kullanılan numune sünek bir malzemede ise çekme işlemi sırasında boyun verme gözlenir. Test sırasında şekil değişimi uniformdur ancak boyun verme gerçekleştikten sonra deformasyon boyun verme bölgesinde yoğunlaşır ve bölgede kesit alanı daha fazla miktarda azalır. Sünek malzemelerde boyun verme maksimum çekme kuvvetinin elde edildiği noktada başlar. Sonrasında kesit alanı azalmaya başladığı için çekme kuvveti azalmaya başlar.

Boyun verme sırasında kesit alanının çok azaldığı durumda eksenel gerilmeyi ifade etmek zorlaşır. Boyun verme sırasında boyun bölgesinde çevresel gerilmeler oluşur (Bridgeman, 1944). Böylece gerilme tek eksenli olmaktan uzaklaşır. Eksenel gerilmeyi doru biçimde ifade edebilmek için gerilmenin bir katsayı kullanılarak düzeltilmesi gerekir. Bu düzeltme katsayısı ise $\left(1 + 2 \frac{R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right)$ dir.



Şekil 1.7 : R ve a boyutları gösterimi (Lange, 1985).

$$\sigma_B = \frac{1}{\left(1 + 2\frac{R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \sigma \quad (1.32)$$

Bu denklemde σ düzeltilmemiş gerçek gerilme ($\sigma = F / A_{MIN}$), σ_B düzeltilmiş gerçek gerilmedir. Toplam gerçek birim şekil değıştirme;

$$\bar{\epsilon} = \ln\left(\frac{A_0}{A_{MIN}}\right) \quad (1.33)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada A_{MIN} boyun verme esnasındaki en düşük kesit alanıdır.

Göreceli olarak küçük deformasyonlar ile ilgili veri alınmak isteniyorsa çekme testi sonuçları yeterli bilgiyi sağlayacaktır. Ancak büyük şekil değışimlerine ait gerilme değeri araştırılıyorsa Ludwik denklemi kullanılmalıdır. Bu denklem;

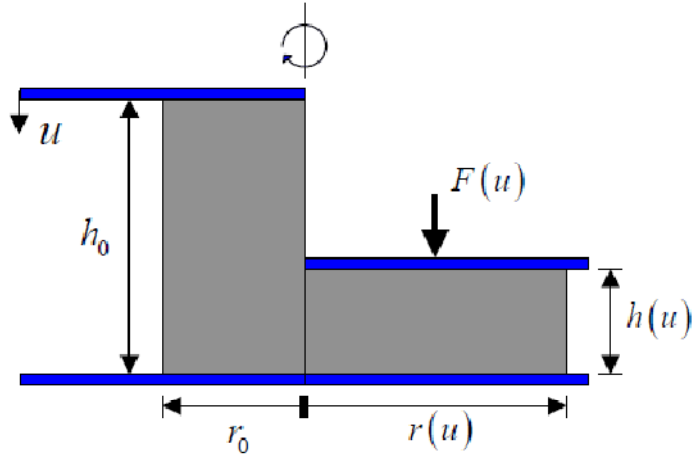
$$\sigma = K \epsilon_{pl}^n \quad (1.34)$$

olmak üzere n pekleşme katsayısı, K ise dayanım katsayısıdır. Ancak Ludwik denklemi yaklaşık tahminler yapılmasını sağlar.

1.3.2 Basma deneyi

Metal malzemeler çekme kuvvetleri altında oldukça düşük mertebelerde plastik şekil değışimi gösterdiklerinden dolayı daha yüksek plastik şekil değeri ulaşmak için basma deneyleri kullanılır.

Geleneksel basma deneyi silindirik bir numunenin iki metal düz yüzey arasında sürtünmeyi azaltan bir yağlayıcı kullanılarak ezilmesi işlemi olarak tanımlanabilir.



Şekil 1.8 : Basma deneyinin şematik olarak gösterimi.

Gerçek birim şekil değiştirme aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir.

$$\varepsilon(u) = \ln \frac{h(u)}{h_0} < 0 \quad (1.35)$$

Burada $h(u)$ basma numunesinin anlık yükleme altındaki boyudur. Böylece;

$$h(u) = h_0 - u \quad (1.36)$$

denklemini yazılabilir. Burada u numune yüksekliğindeki azalmadır.

Gerçek gerilme değeri numune üzerindeki F kuvveti ve yüksekliğindeki azalma u değeri kullanılarak bulunabilir.

$$\sigma_f(u) = \frac{F(u)}{\pi r^2(u)} \quad (1.37)$$

Bu hesaplamadaki en büyük hata kaynağı sıkıştırma yüzeyleri ile numune arasındaki sürtünme kuvvetidir.

Sürtünme kuvveti iki etkiye sahiptir. Bunlar;

1. İstenilen birim şekil değiştirme miktarına ulaşmak için daha fazla kuvvet uygulamak gerekir. Siebel'e göre gerekli olan kuvvet aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$\frac{F(\varepsilon)}{\pi r^2(\varepsilon)} \approx \sigma(\varepsilon) \left\{ 1 + \frac{2\mu r(\varepsilon)}{3h(\varepsilon)} \right\} \quad (1.38)$$

Burada μ Coulomb sürtünme katsayısıdır. Sürtünme etkilerini düşük tutmak için basma numunesinin ilk yüksekliği yüksek seçilmelidir. Ancak bu durumda da kararlılık sorunu ortaya çıkmaktadır. Numune yüksekliği belli bir sınırı aştığında basma deneyi sırasında burkulma gözlenebilir.

2.Sürtünme kuvveti basma numunesinin radyal yönde bombeleşmesine sebep olur.

Basma testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri homojen olmayan şekil değiştirmeden dolayı (bombeleşme) bir miktar hata içerir. Bombeleşmenin kaynağı numune ile basma yüzeyleri arasındaki sürtünmedir.

Malzeme eğrisindeki sürtünmeden kaynaklanan hata Siebel'in düzeltme fonksiyonu ile giderilebilir. Bu yöntem için sürtünme katsayısı gereklidir.

Siebel düzeltme yöntemine göre düzeltilmiş gerçek gerilme aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{siebel}(\varepsilon) = \frac{\sigma_{exp}(\varepsilon)}{c_{siebel}(\varepsilon)} \quad (1.38)$$

Burada,

$$\sigma_{exp}(\varepsilon) = \frac{F(\varepsilon)}{\pi r^2(\varepsilon)} \quad (1.39)$$

ve

$$c_{siebel}(\varepsilon) = \left(1 + \frac{2\mu(\varepsilon)}{2h(\varepsilon)} \right) \quad (1.40)$$

Siebel düzeltme yöntemi uygulaması kolay ve düşük birim şekil değiştirme ve düşük sürtünme katsayısı değerleri için başarılı sonuçlar veren bir yöntemidir.

2. ÇEKME DENYELERİ

2.1 Giriş

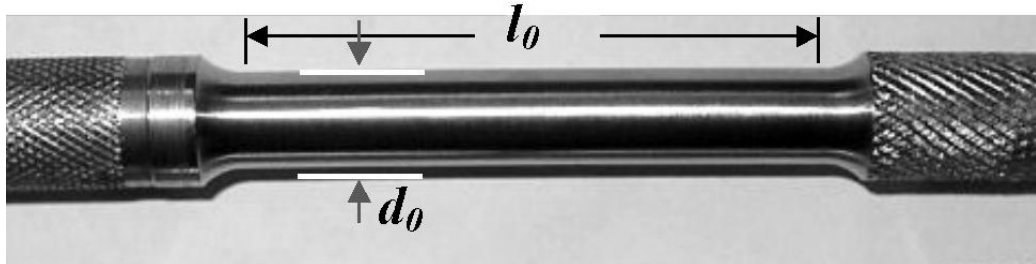
Bu bölümde AL7075 malzemesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, kopma noktalarındaki kesit alanı ve kopma biçimi hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Malzemeler Türkiye'ye özellikle havacılık sanayiine yönelik malzemeler ithal eden Referans Metal Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Çekme deneyleri İ.T.Ü Makina Fakültesi Mukavemet birimi laboratuvarında bulunan sıcaklık şartlandırılmalı çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarından gerçek gerilme şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi için Ludwik bağıntısından faydalanılacak ve sonuçlar kopma noktasına kadar ekstrapole edilecektir. Elde edilen eğriler sonlu eleman modellerinin doğruluğunun araştırılmasında kullanılacaktır.

2.2 Malzemenin özelliklerinin elde edilmesi

Malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi için çekme testleri uygulanacaktır. Dört farklı sıcaklıkta yapılan bu testlerden elde edilen FEM modellerinde malzeme özelliklerinin ve model sonuçlarının doğrulanması için kullanılacaktır.

2.3 Çekme Gerilmesi Diyagramları

Çekme numuneleri 6mm gage çapında (d_0) ve 25 mm gage uzunluğunda (l_0) boyutlandırılmıştır. Çekme deneyleri 0.1mm/s çekme hızı ile test edilmişlerdir.



Şekil 2.1 : Çekme deneyi numunesine ait önemli boyutlar (Koçak, 2003).

Dört ayrı sıcaklık için de aynı çekme hızı kullanılmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen kuvvet-uzama değerleri mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine ve ardından ise gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine dönüştürülmüştür.

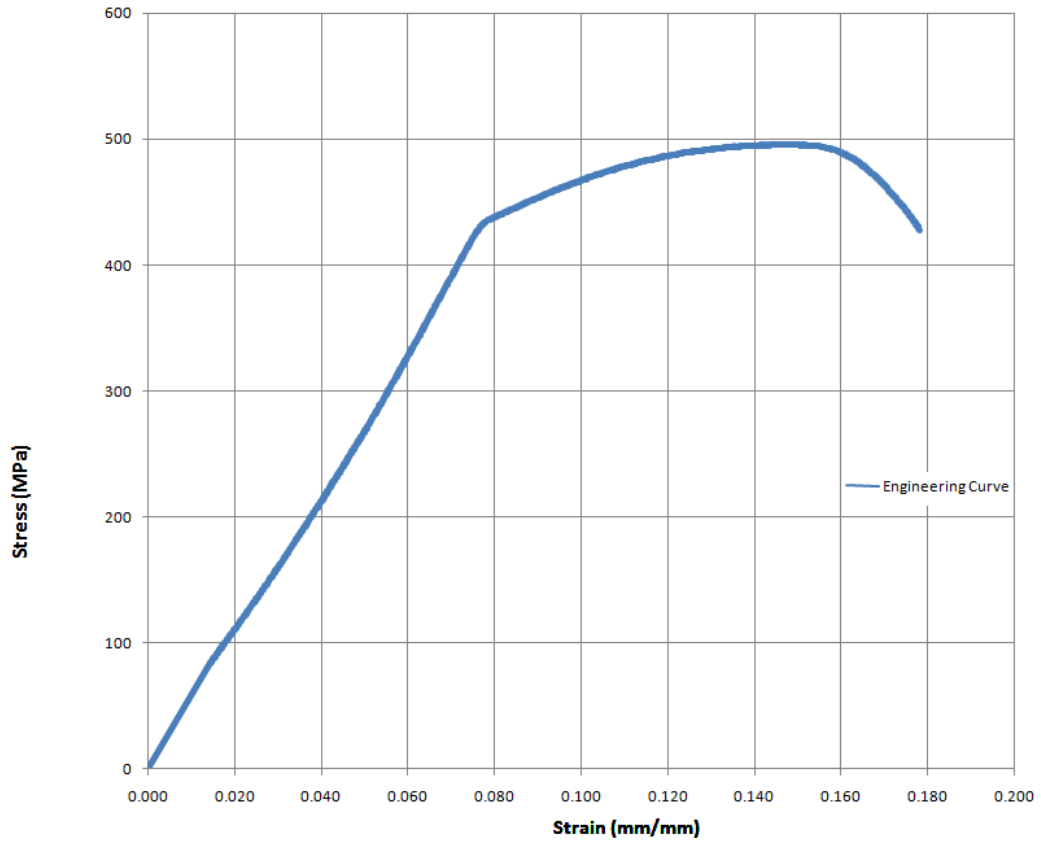
Çizelge 2.1'de deneylerde kullanılan çekme numunelerinin test öncesi ve test sonrası boyutları verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Deney numunelerine ait boyutlar.

Numune	Sıcaklık (°C)	İlk Cap (mm)	Boyun capı (mm)	İlk Boy (mm)	Son Boy (mm)
260_1	260	6	3	40	51.23
260_2	260	6	3.2	40	49.65
260_3	260	6	3	40	48.54
260_4	260	6	3.14	40	47.01
204_1	204	6	3.22	40	49.56
204_2	204	6	3.38	40	48.23
204_3	204	6	3.24	40	48.6
149_5	149	6	3.84	40	47.13
149_4	149	6	4.06	40	45.97
149_3	149	6	4.73	40	43.52
149_2	149	6	4.83	40	45.56
149_1	149	6	3.89	40	47.66
100_1	100	6	4.94	40	42.56
100_2	100	6	5.2	40	42.41
100_3	100	6	4.57	40	45.08
100_4	100	6	4.53	40	45.41
100_5	100	6	5.24	40	43.88
25_1	25	6	5.1	40	47.9
25_2	25	6	5.4	40	44
25_3	25	6	5.15	40	45.6

2.3.1 25 °C Sıcaklıkta çekme deneyi

25 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. 25 °C de 3 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kaydedilmiştir. Öncelikle mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçtan malzemeye ait 25 °C sıcaklıkta geçerli olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesi için 2. çekme deneyi sonuçları temel alınmıştır. Aşağıda deneylerden elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.2 : 25 °C testinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyinde elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde 1.Bölümde bahsedilen (1.26) ve (1.31) denklemlerinde yararlanılmıştır. Ayrıca boyun verme sonrasında oluşan homojen olmayan uzama bölgesi için Ludwik bağıntısı kullanılmıştır.

Bu bağıntı;

$$\ln(\sigma) = \ln(K) + n \ln(\varepsilon_{pl}) \quad (2.1)$$

$$y = \ln(\sigma) \quad (2.2)$$

$$x = \ln(\varepsilon_{pl}) \quad (2.3)$$

$$m = n \quad (2.4)$$

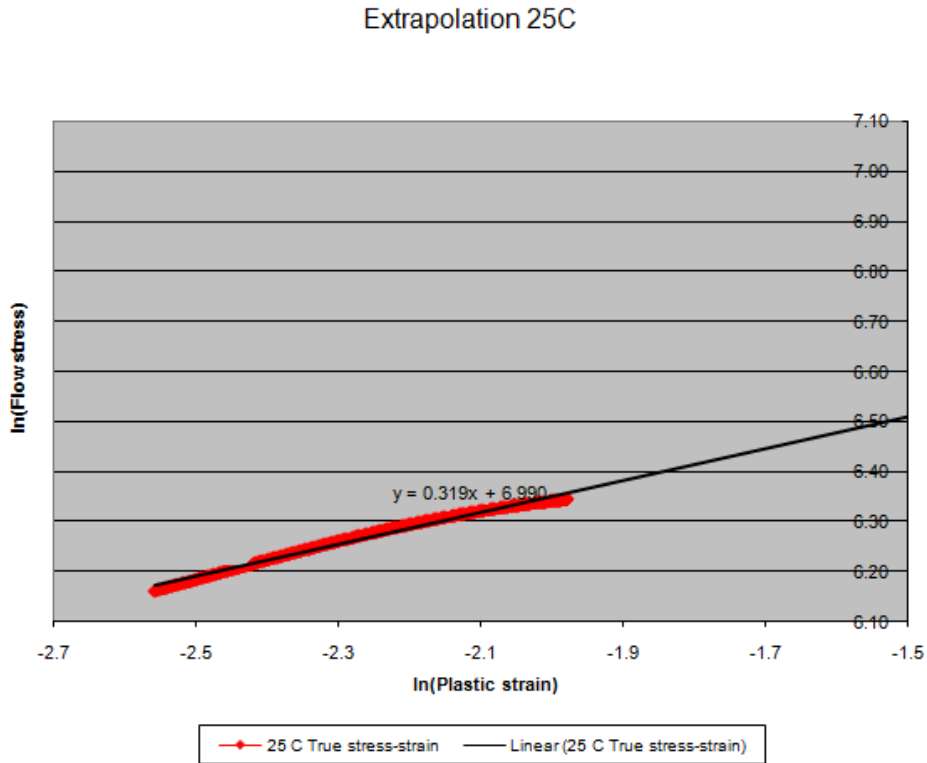
$$b = \ln(k) \quad (2.5)$$

$$K = e^b \quad (2.5)$$

$$y = mx + b \quad (2.5)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinin akma bölgesinde kalan kısmı için Ludwik bağıntısı kullanılarak bir doğrusal denklem elde edilmiş ve denklemin katsayıları kullanılarak boyun verme bölgesinden sonra geçerli olan gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. 25 °C için geçerli olan ekstrapolasyon grafiği Şekil 2.3'de verilmiştir.

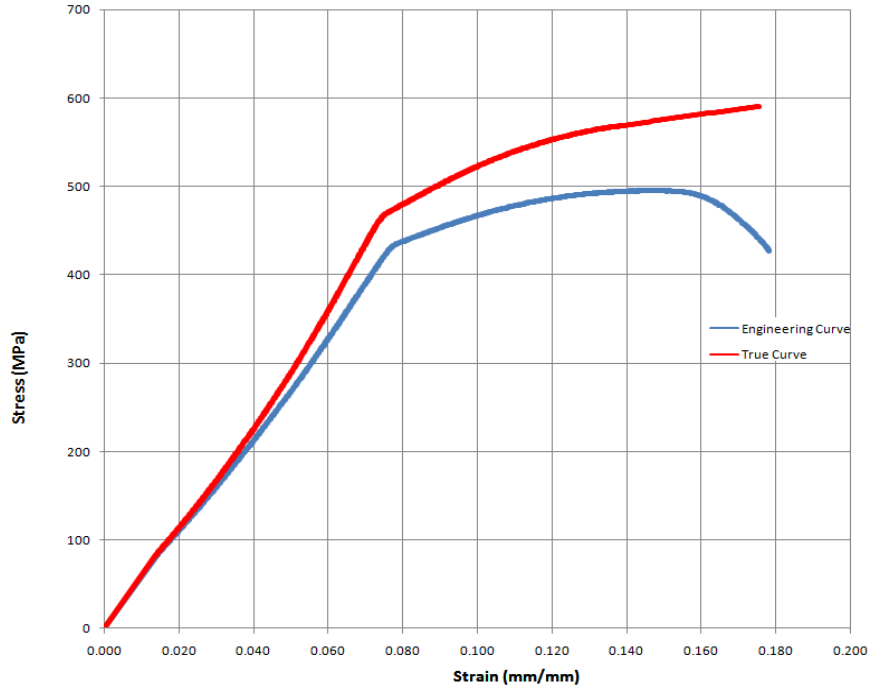


Şekil 2.3 : 25 °C testi malzeme eğrisi için Ludwik bağıntısı.

Ludwik bağıntısı kullanılarak palstik bölge için bulunan doğrusal denklem, aşağıda ile verilmiştir.

$$y = 0.319x + 6.990 \quad (2.6)$$

Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile beraber , Şekil 2.4'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.4 : 25 °C testi mühendislik gerilmesi ve gerçek birim şekil değiştirme eğrileri.

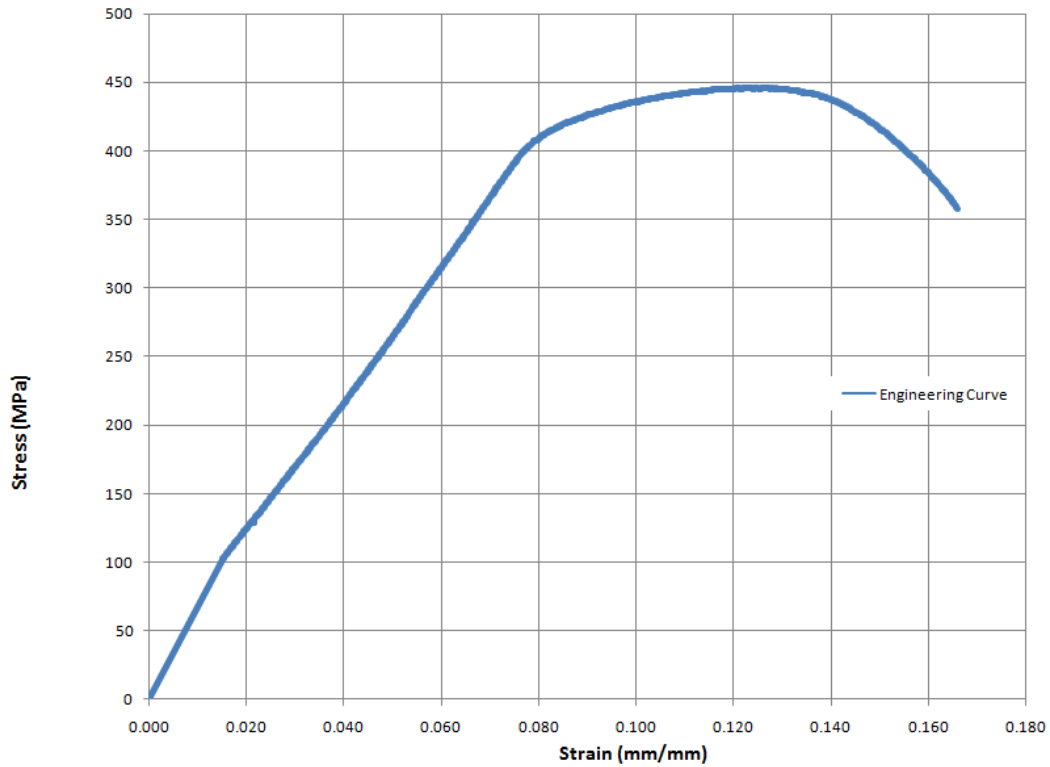
25 °C yapılan testlerde elde edilen malzeme özellikleri ile test numunesine ait boyutlar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : 25 °C testlerinden elde edilen malzeme özellikleri.

Sıcaklık	25 °C
Akma Dayanımı	473 MPa
Kopma Dayanımı	590 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	5.4
Deney öncesi gage boyu (mm)	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	44

2.3.2 100 °C Sıcaklıkta çekme deneyi

100°C sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. 100°C'de 5 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kaydedilmiştir. Öncelikle mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçtan malzemeye ait 100°C sıcaklıkta geçerli olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesi için 1. çekme deneyi sonuçları temel alınmıştır. Aşağıda deneylerden elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.

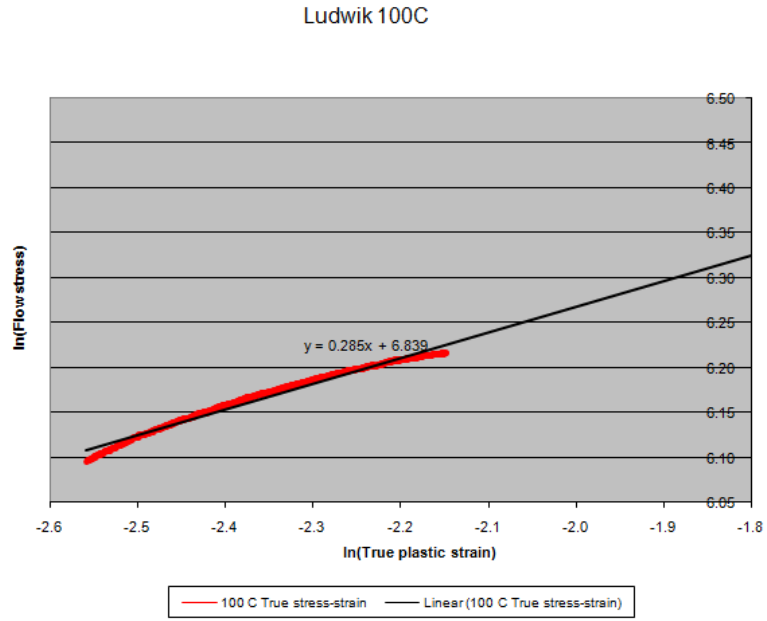


Şekil 2.5 : 100 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyinden elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde 1.Bölümde bahsedilen (1.26) ve (1.31) denklemlerinde yararlanılmıştır. Ayrıca boyun verme sonrasında oluşan homojen olmayan uzama bölgesi için Ludwik bağıntısı kullanılmıştır.

Mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinin akma bölgesinde kalan kısmı için Ludwik bağıntısı kullanılarak bir doğrusal denklem elde edilmiş ve denklemin katsayıları kullanılarak boyun verme bölgesinden sonra geçerli olan gerçek gerilme

birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. 100°C için geçerli olan ekstrapolasyon grafiği Şekil 2.6'de verilmiştir.

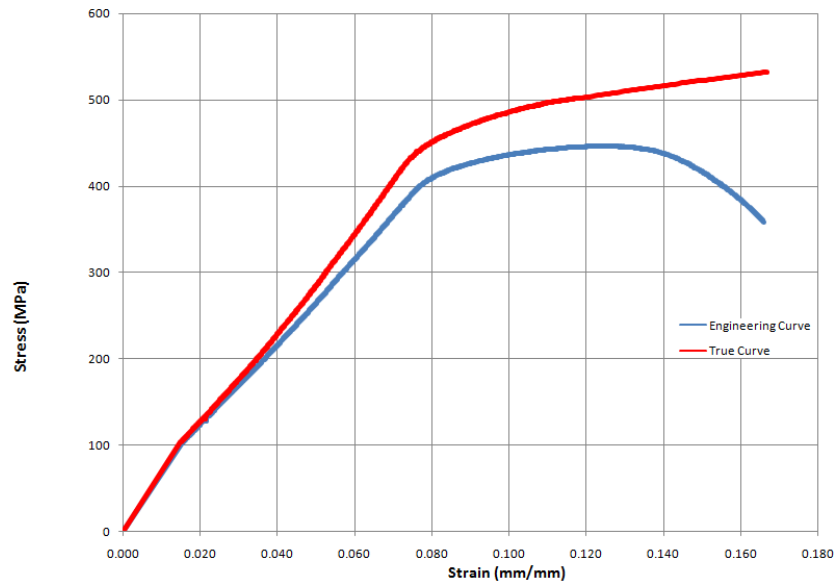


Şekil 2.6 : 100 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.

Ludwik bağıntısı kullanılarak plastik bölge için bulunan doğrusal denklem, aşağıda verilmiştir.

$$y = 0.285x + 6.839 \quad (2.7)$$

Gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 2.7'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.7 : 100 °C testi gerilme -birim şekil değiştirme eğrileri.

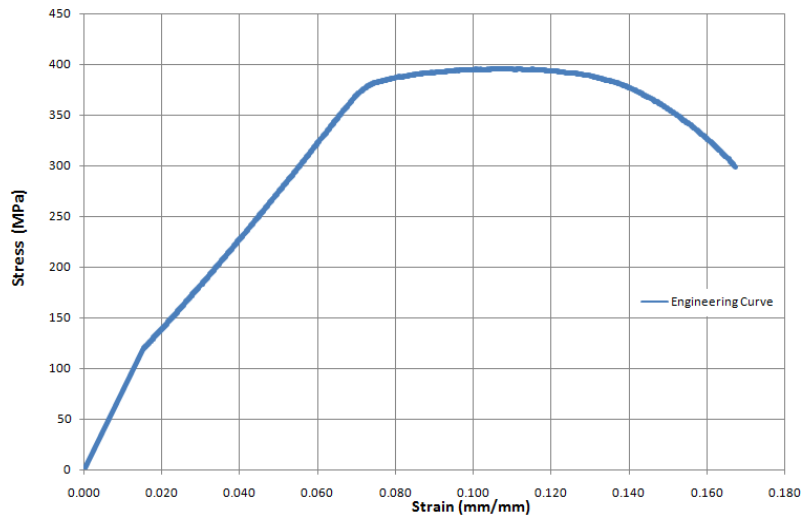
100 °C yapılan testlerde elde edilen malzeme özellikleri ile test numunesine ait boyutlar Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : 100 °C de yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları.

Sıcaklık	100°C
Akma Dayanımı	443 MPa
Kopma Dayanımı	538 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	4.94
Deney öncesi gage boyu (mm)	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	42.56

2.3.3 149°C Sıcaklıkta çekme deneyi

149 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. 149 °C de 4 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kaydedilmiştir. Öncelikle mühendislik gerilme birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçtan malzemeye ait 149 °C sıcaklıkta geçerli olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesi için 3. çekme deneyi sonuçları temel alınmıştır. Şekil 2.8'de deneylerden elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.8 : 149 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.

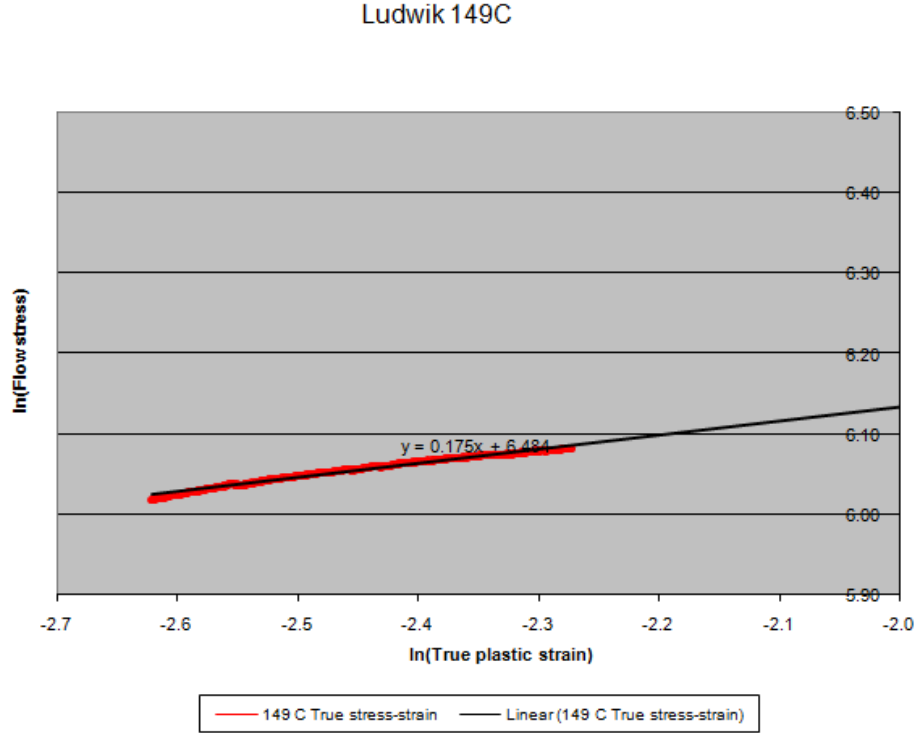
Çekme deneyinde elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde 1.Bölümde bahsedilen (1.26) ve (1.31) denklemlerinde yararlanılmıştır. Ayrıca boyun verme sonrasında oluşan homojen olmayan uzama bölgesi için Ludwik bağıntısı kullanılmıştır.

Mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinin akma bölgesinde kalan kısmı için Ludwik bağıntısı kullanılarak bir doğrusal denklem elde edilmiş ve denklemin katsayıları kullanılarak boyun verme bölgesinden sonra geçerli olan gerçek gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. 149 °C için geçerli olan ekstrapolasyon grafiği Şekil 2.6'de verilmiştir.

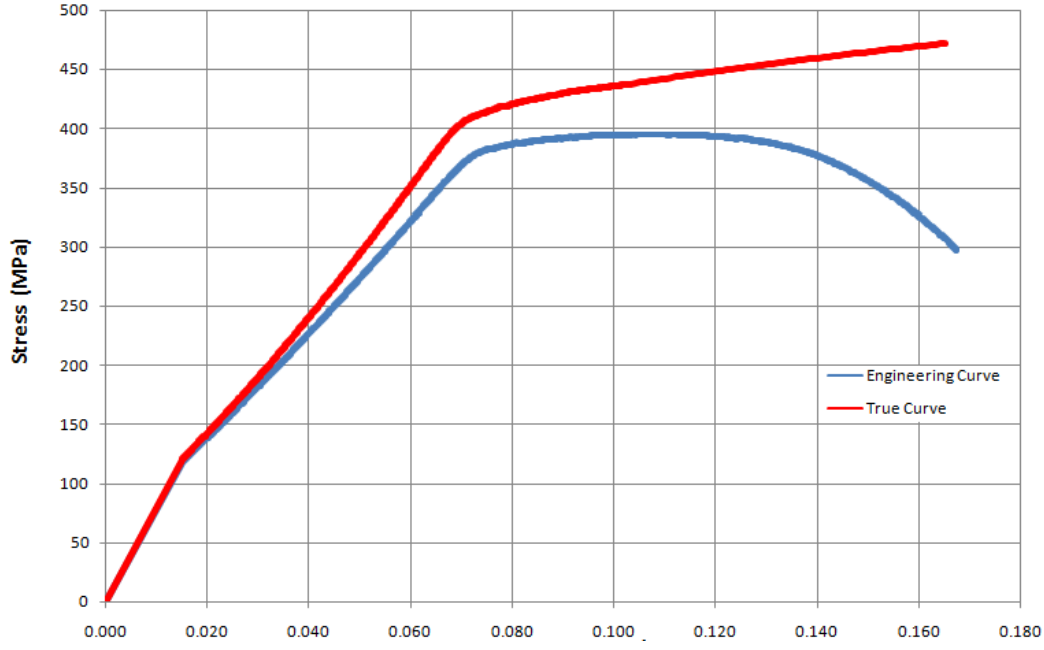
Ludwik bağıntısı kullanılarak plastik bölge için bulunan doğrusal denklem, Denklem 2.8'de verilmiştir.

$$y = 0.175x + 6.484 \quad (2.8)$$

Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 2.10'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.9 : 149°C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.



Şekil 2.10 : 149 °C testi gerilme -birim şekil değıştirme bağıntıları.

149 °C yapılan testlerde elde edilen malzeme özellikleri ile test numunesine ait boyutlar Çizelge 2.4'de verilmiştir.

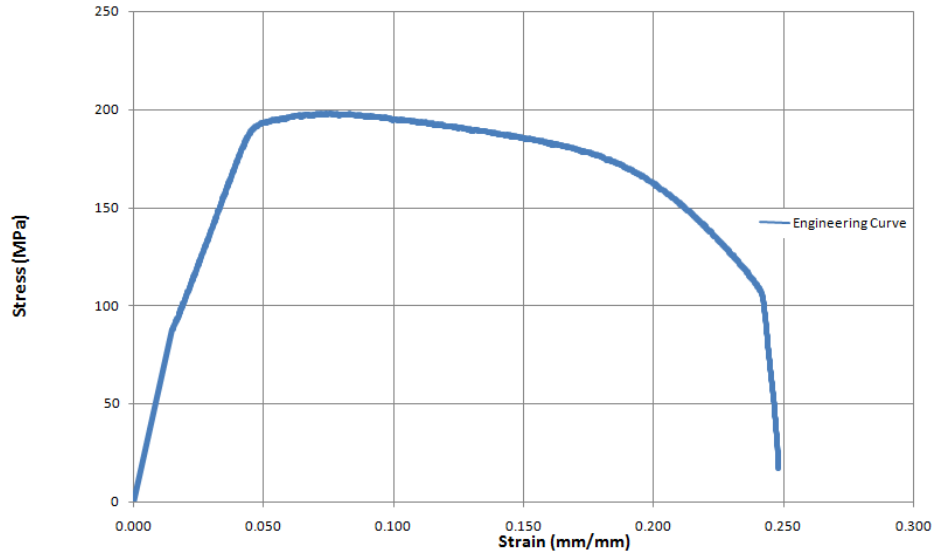
Çizelge 2.4 : 149 °C de yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları.

Sıcaklık	149 °C
Akma Dayanımı	410 MPa
Kopma Dayanımı	480 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	4.73
Deney öncesi gage boyu (mm)	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	43.52

2.3.4 204 C Sıcaklıkta çekme deneyi

204 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. 204 °C de 4 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kaydedilmiştir. Öncelikle mühendislik gerilmesi-birim şekil değıştirme eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçtan malzemeye ait 204 °C sıcaklıkta geçerli olan gerçek gerilme-birim şekil değıştirme eğrisi elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesi için 3. çekme deneyi

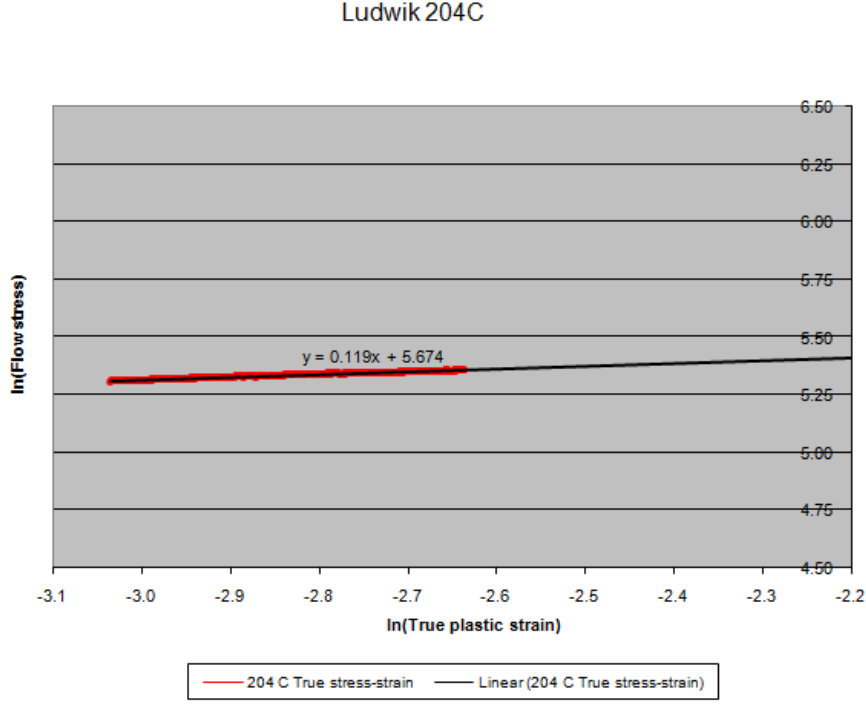
sonuçları temel alınmıştır. Şekil 2.11'de deneylerden elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.11 : 204 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyinde elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde 1. Bölümde bahsedilen (1.26) ve (1.31) denklemlerinde yararlanılmıştır. Ayrıca boyun verme sonrasında oluşan homojen olmayan uzama bölgesi için Ludwik bağıntısı kullanılmıştır.

Mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinin akma bölgesinde kalan kısmı için Ludwik bağıntısı kullanılarak bir doğrusal denklem elde edilmiş ve denklemin katsayıları kullanılarak boyun verme bölgesinden sonra geçerli olan gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. 204 °C için geçerli olan ekstrapolasyon grafiği Şekil 2.12'de verilmiştir.

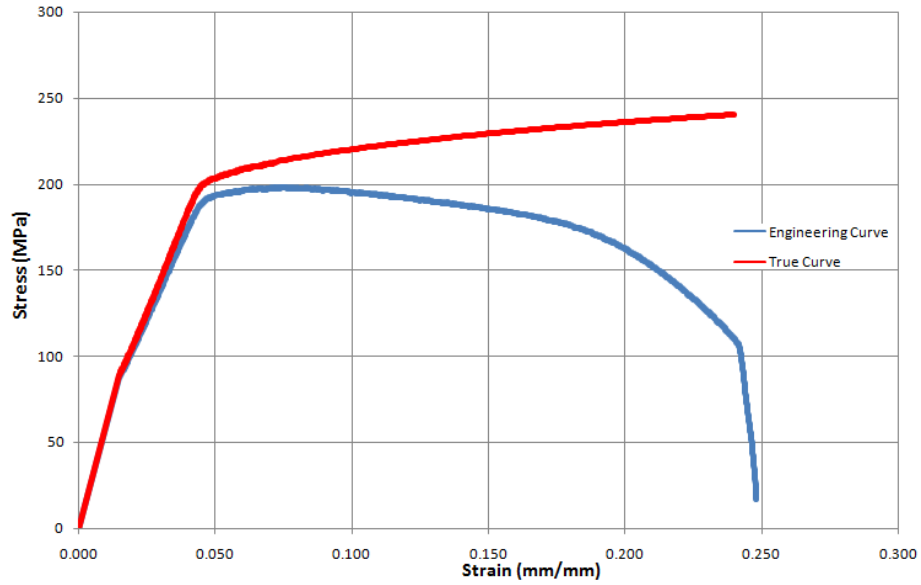


Şekil 2.12 : 204 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.

Ludwik bağıntısı kullanılarak plastik bölge için bulunan doğrusal denklem, aşağıda verilmiştir.

$$y = 0.119x + 5.674 \quad (2.9)$$

Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 2.13'de ki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.13 : 204 °C testi gerilme -birim şekil değiştirme eğrileri.

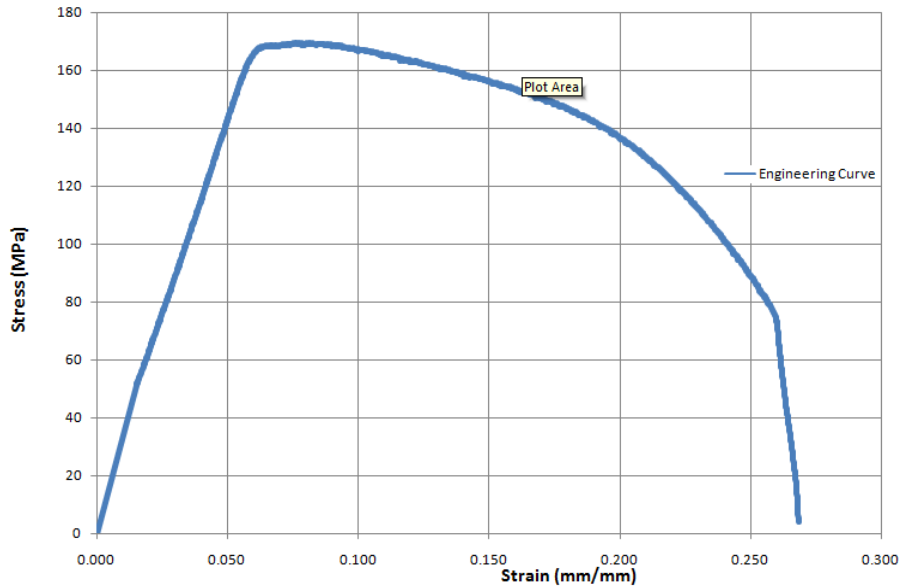
204 °C yapılan testlerde elde edilen malzeme özellikleri ile test numunesine ait boyutlar Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5 : 204 °C de yapılan deneylere ait malzeme özellikleri ve numune boyutları.

Sıcaklık	204 °C
Akma Dayanımı	203 MPa
Kopma Dayanımı	240 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	3.38
Deney öncesi gage boyu (mm)	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	48.23

2.3.5 260 °C Sıcaklıkta çekme deneyi

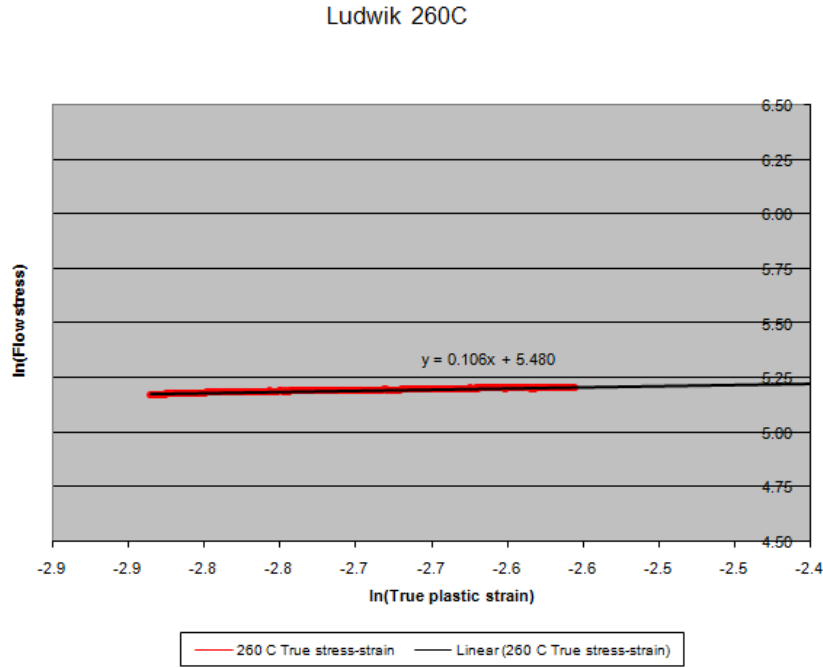
260 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. 260 °C de 4 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kaydedilmiştir. Öncelikle mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçtan malzemeye ait 260 °C sıcaklıkta geçerli olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin elde edilmesi için 2. çekme deneyi sonuçları temel alınmıştır. Şekil 2.4'de deneylerden elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.14 : 260 °C testi mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyinde elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde 1. Bölümde bahsedilen (1.26) ve (1.31) denklemlerinde yararlanılmıştır. Ayrıca boyun verme sonrasında oluşan homojen olmayan uzama bölgesi için Ludwik bağıntısı kullanılmıştır.

Mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisinin akma bölgesinde kalan kısmı için Ludwik bağıntısı kullanılarak bir doğrusal denklem elde edilmiş ve denklemin katsayıları kullanılarak boyun verme bölgesinden sonra geçerli olan gerçek gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. 260 °C için geçerli olan ekstrapolasyon grafiği Şekil 2.15'de verilmiştir.

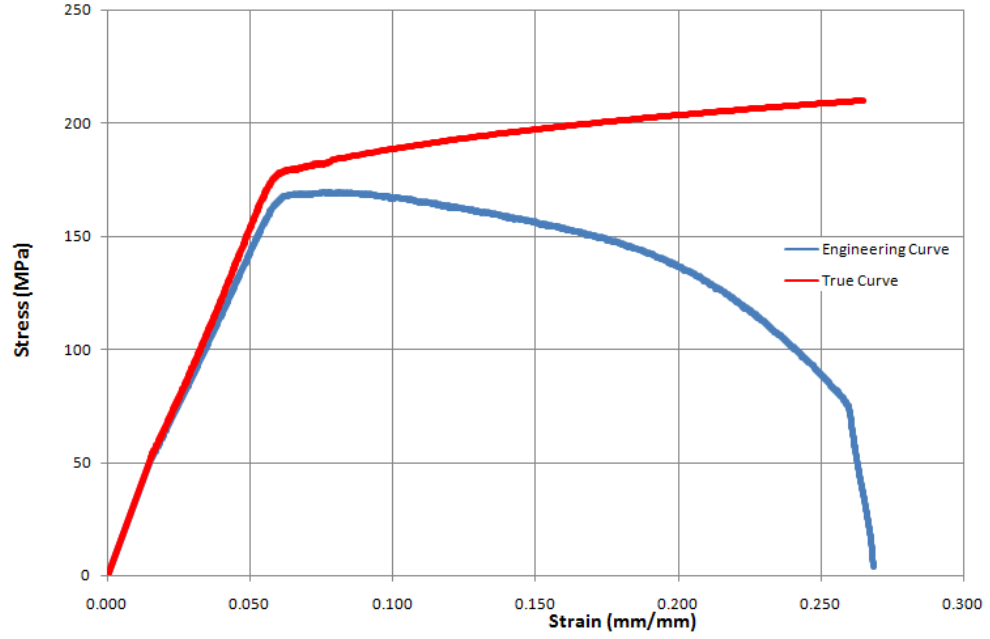


Şekil 2.15 : 260 °C testi malzeme eğrisi Ludwik bağıntısı.

Ludwik bağıntısı kullanılarak plastik bölge için bulunan doğrusal denklem, aşağıda verilmiştir.

$$y = 0.106x + 5.480 \quad (2.9)$$

Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 2.10'de ki grafikte verilmiştir.



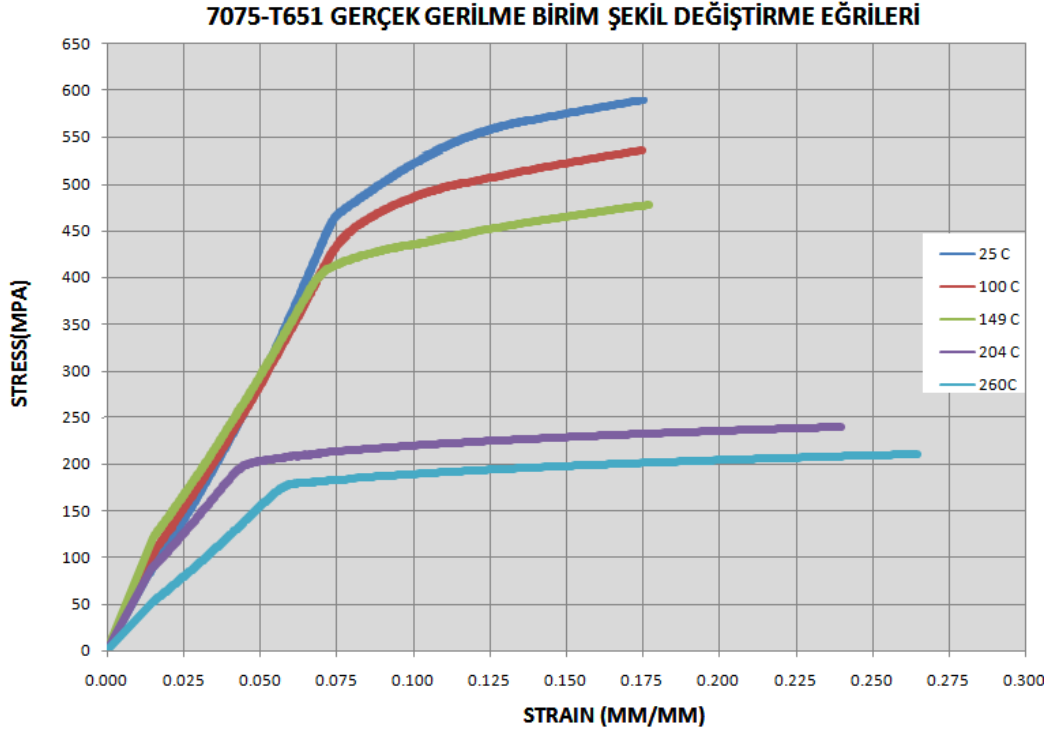
Şekil 2.16 : 260 °C testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

260 °C yapılan testlerde elde edilen malzeme özellikleri ile test numunesine ait boyutlar Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 : 260 °C de yapılan deneylere ait malzeme özellikleri.

Sıcaklık	260 °C
Akma Dayanımı	176MPa
Kopma Dayanımı	209 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	3.2
Deney öncesi gage boyu (mm)	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	49.65

Deney sonuçlarında görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça malzemenin akma ve kopma dayanımları azalmakta, malzeme gittikçe daha sünek davranmaktadır. 25 °C, 100 °C ve 149 °C sıcaklıklarda yapılan deney sonuçları incelendiğinde malzemenin birim şekil değiştirme değerlerinde çok büyük bir fark olmadığı göze çarpmaktadır. 204 °C ve 260 °C sıcaklıklar incelendiğinde ise akma ve kopma dayanımları açık bir şekilde azalmış ve malzemenin kopma noktasına karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri oldukça artmıştır. Çekme deneyleri sonuçlarının toplu halde gösterimi Şekil 2.17'de ve sayısal sonuçları Çizelge 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.17 : 7075-T651 malzemesi gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

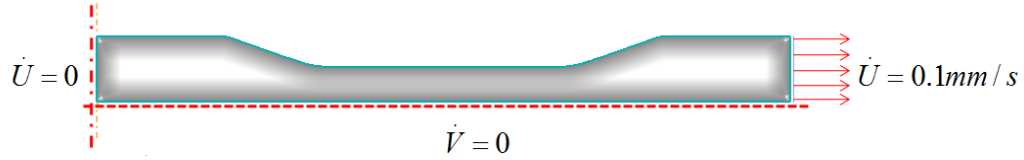
Çizelge 2.7 : Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylere ait malzeme özellikleri.

Sıcaklık (°C)	25	100	149	204	260
Akma Dayanımı (MPa)	473 MPa	443 MPa	410 MPa	203 MPa	176MPa
Kopma Dayanımı (MPa)	590 MPa	538 MPa	480 MPa	240 MPa	209 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6	6	6	6	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	5.4	4.94	4.73	3.38	3.2
Deney öncesi gage boyu (mm)	40	40	40	40	40
Deney sonrası gage boyu (mm)	44	42.56	43.52	48.23	49.65

3. FEM MODELLERİ VE ANALİZLERİ

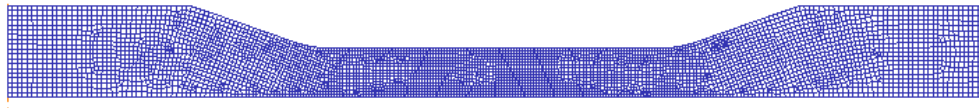
3.1 Çekme Deneyi Modelleri

Mukavemet laboratuvarında yapılan çekme deneyleri sonuçları kullanılarak sünek hasar modellerinin sayısal sonuçlarının elde edilmesi için deneyler sonlu eleman yöntemi ile modellenmişlerdir. Test sonuçları bir önceki bölümde verilmiştir. Sonlu eleman modellemesi için Deform 2D V8.1 yazılımı kullanılmıştır. Çekme numunesine ait model Şekil 3.1'de verilmiştir. Çekme numuneleri silindirik geometrilerinden kaynaklanan eksenel simetriden dolayı eksenel simetrik olarak modellenmişlerdir.

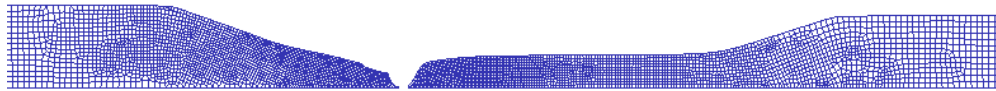


Şekil 3.1 : Hasar analizlerinde kullanılan FEM modeli.

Modellerde kullanılan çözüm ağları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Çekme deneyi öncesi numuneye ait FEM modeli çözüm ağı.



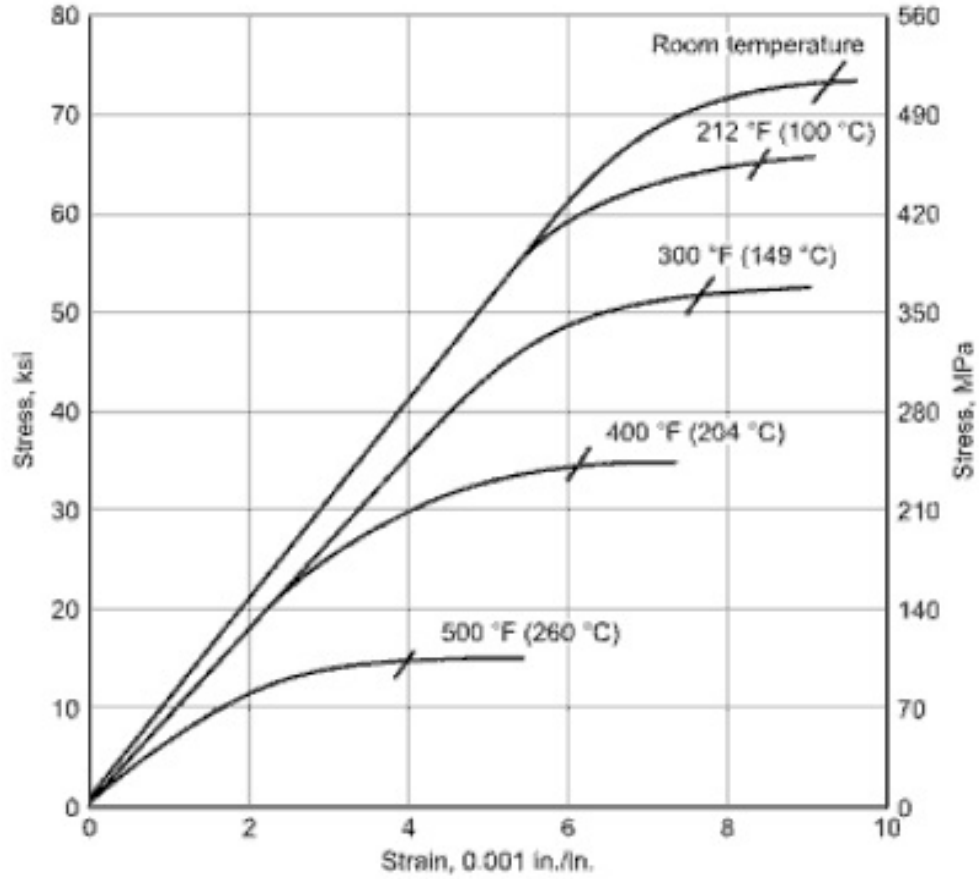
Şekil 3.3 : Çekme deneyi sonrası numuneye ait FEM modeli çözüm ağı.

Deneylerin modellerine ait detaylar ve parametreler ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

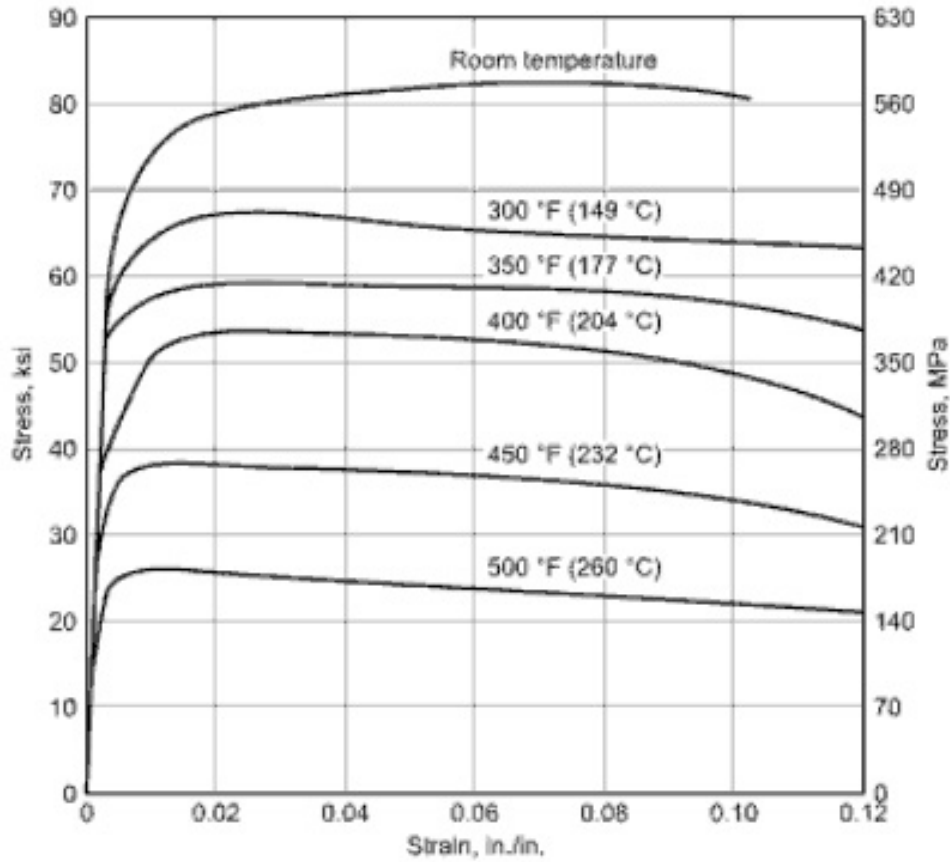
Çizelge 3.1 : FEM modellerinde kullanılan parametreler.

AL 7075 (Tüm Sıcaklıklar)	Analiz parametreleri	FEM yazılımı	Deform 2D V8.1	
		İterasyon metodu	1-Newton-Raphson 2-Direct method	
		Malzeme tipi	Elastik-Plastik	
		Yakınsama oranı	Kuvvet hata sınırı:0.01	
			Hız hata sınırı: 0.001	
		Simetri	Eksenel Simetrik	
		Eleman sayısı	25 C	2000-5000
			100 C	2000-5000
			149 C	2000-5000
			204 C	2000-5000
			260 C	2000-10000
		Tekrar mesh oluşturma kriteri	Otomatik,Çözüm elemelerindeki çarpılma arttığında, 20 çözüm adımında bir.	
		Çözüm adımı sayısı	500-2000	
		Çözüm adımı süresi	0.1-0.5 sn	
		Kalıp hızı	0.1 mm/s	
	Malzeme bilgisi girdileri	Çekme testi modellemesi	Gerilme şekil değiştirme eğrisi	
		Elastisite modülü	260 °C	4,20E+10 MPa
			204 °C	6,00E+10 MPa
			149 °C	6,00E+10 MPa
			100 °C	7,20E+10 MPa
			25 °C	7,20E+10 MPa
		Poisson Oranı	0.3	

Modeller 25 °C, 100 °C, 149 °C, 204 °C ve 260 °C olmak üzere beş ayrı sıcaklık değeri için hazırlanmışlardır. Literatürde bulunan AL7075'e ait farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.4'de ve Şekil 3.5'de görülmektedir. Hem deneylerden elde edilen sonuçlardan hem de literatürden elde edilen bilgilerden yola çıkılarak artan sıcaklıkla beraber AL7075'in akma ve kopma dayanımı düşerek şekil değiştirme miktarının arttığı gözlenmektedir. Bunlara ek olarak artan sıcaklıkla beraber elastisite modülü de düşmektedir. AL7075'e ait bazı mekanik özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4 : 7075-T6 malzeme özellikleri (ASM International, 2002).



Şekil 3.5 : 7075-T6 malzeme özellikleri (ASM International,2002).

Modellerde kullanılan çözüm ağırları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilmiştir. Simülasyonlar deneylerde kopmanın hemen öncesinde ölçülen boyun yarıçapına kadar devam ettirilmiş ve hasar değerleri model üzerinden okunmuştur. Çekme numunelerine test öncesi ve test sonrası boyutsal bilgiler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

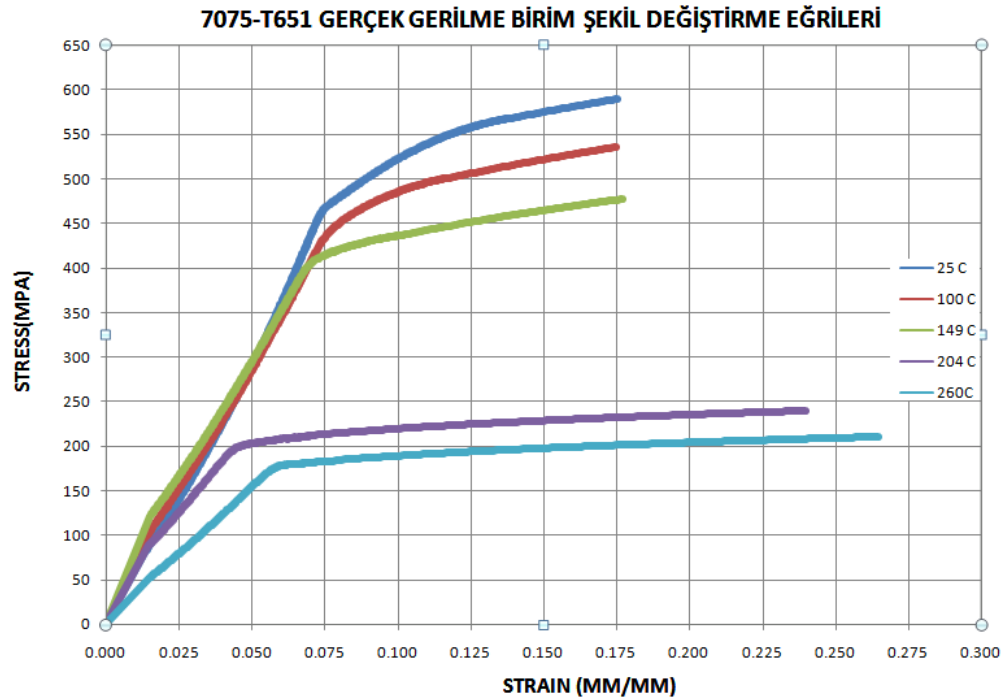
Literatürden elde edilen AL7075'e ait mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri gerçek-gerilme birim şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülmüş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme değerleri elde edilmiştir.

Literatürde bulunan AL7075'e ait farklı sıcaklılardaki malzeme özellikleri Çizelge 3.2'de bir tablo halinde verilmiştir. Değerlerden anlaşılacağı üzere malzeme sıcaklığı yükseldikçe akma ve kopma dayanımları azalmakta ve buna karşılık kopma anındaki birim şekil değişimleri artmakta ve malzeme daha sünek bir hal almaktadır.

Çizelge 3.2 : 7075 alaşımının farklı sıcaklıklarda mekanik özellikleri.

Sıcaklık	Elastisite modülü	Akma dayanımı	Kopma dayanımı	Kopma anındaki uzama
260 °C	4,20E+10 MPa	62.0 MPa	76 MPa	65%
204 °C	6,00E+10 MPa	87.0 MPa	110 MPa	55%
149 °C	6,00E+10 MPa	186 MPa	214 MPa	30%
25 °C	7,20E+10 MPa	503 MPa	572 MPa	11%

Literatürde bulunan değerler ile deney sonuçları arasındaki farklılıktan dolayı sayısal analizler için gerekli olan malzeme özellikleri deneylerden elde edilen sonuçlardan alınmıştır. Deney sonuçlarından yola çıkılarak Ludwik bağıntısı kullanılarak elde edilen 7075-T651'e ait farklı sıcaklıklara ait gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.6 : 7075-T6 malzemesine ait farklı sıcaklıklardaki gerçek gerilme-birim eğrileri.

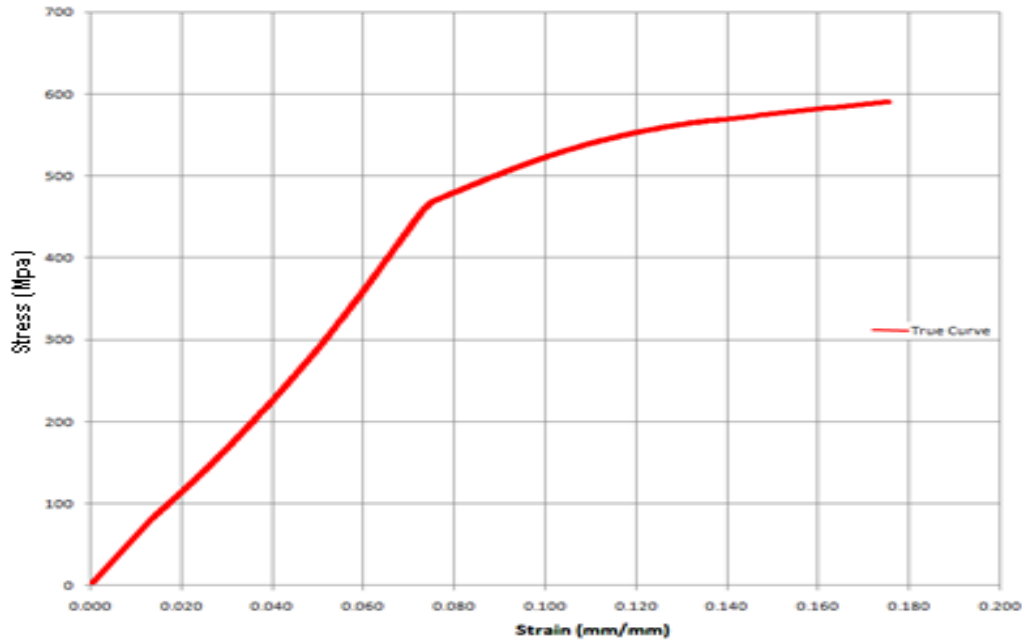
3.2 25 °C Sıcaklık Hasar Analizi

AL7075'e ait yapılan ilk analiz 25 °C'de yapılan hasar analizidir. Malzeme özellikleri İ.T.Ü Makina Fakültesi Mukavemet Laboratuvarında yapılan testlerden elde edilmiştir. Çizelge 3.3'de malzeme özellikleri verimiştir.

Çizelge 3.3 : 7075 alaşımın 25 °C de mekanik özellikleri.

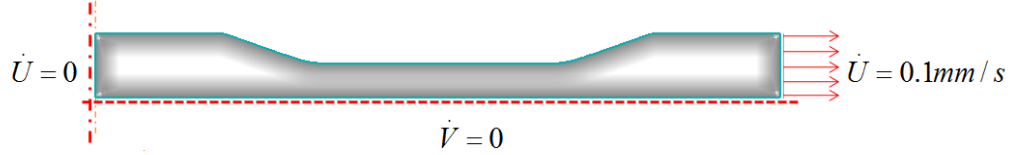
Sıcaklık	25 °C
Akma Dayanımı	473 MPa
Kopma Dayanımı	590 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	5.4

Literatürde bulunan AL7075'e ait 25 °C deki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi önce gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi haline getirilmiş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Malzeme 25 °C sıcaklıkta 5.4 mm çapa düşüş göstermektedir. Şekil 3.7'de 25 °C deki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.7 : 7075-T651 malzemesine ait 25 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyine ait sonlu eleman modeli Şekil 3.8'de verilmiştir. Model aksenal simetriden yararlanılarak yarım olarak modellenmiştir. Parçanın simetri eksenini yatay ekseninde dikey yönde sabitlenmiş ve dikey yönde hareketine izin verilmiştir. Parçanın bir ucunun hareketi yatay doğrultuda kısıtlanmış ve dikey doğrultudaki hareketine ise izin verilmiştir. Çekme hareketi parçanın diğer ucundan yatay yönde uygulanmıştır.



Şekil 3.8 : 25°C Hasar analizi için FEM modeli.

Beş farklı hasar modeli için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Kopma anındaki hasar, kopma bölgesindeki en yüksek hasar değeri ve en yüksek eşdeğer gerilme ile en yüksek asal gerilme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır. Hasar değerleri içinde gerilme cinsinden sonuç veren Freudenthal ve Cockroft-Latham hasar modellerinin çıktılarının kopma gerilmesine eşit olması, diğer modeller olan normalize edilmiş Cockroft-Latham, Ayada ve Brozzo modellerinin ise sonuçlarının 1 değerine çok yakın olması beklenmiştir.

Çizelge 3.4 : 25 °C de 7075 e ait hasar analizi sonuçları.

	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
Hasar	151	154 MPa	1.15	0.259	1.04
Birim Uzama	0.307	0.274	0.358	0.383	0.433
Eşdeğer gerilme	639 MPa	629 MPa	624 MPa	664 MPa	535 MPa
Asal gerilme	910 MPa	756 MPa	1090 MPa	811 MPa	576 MPa

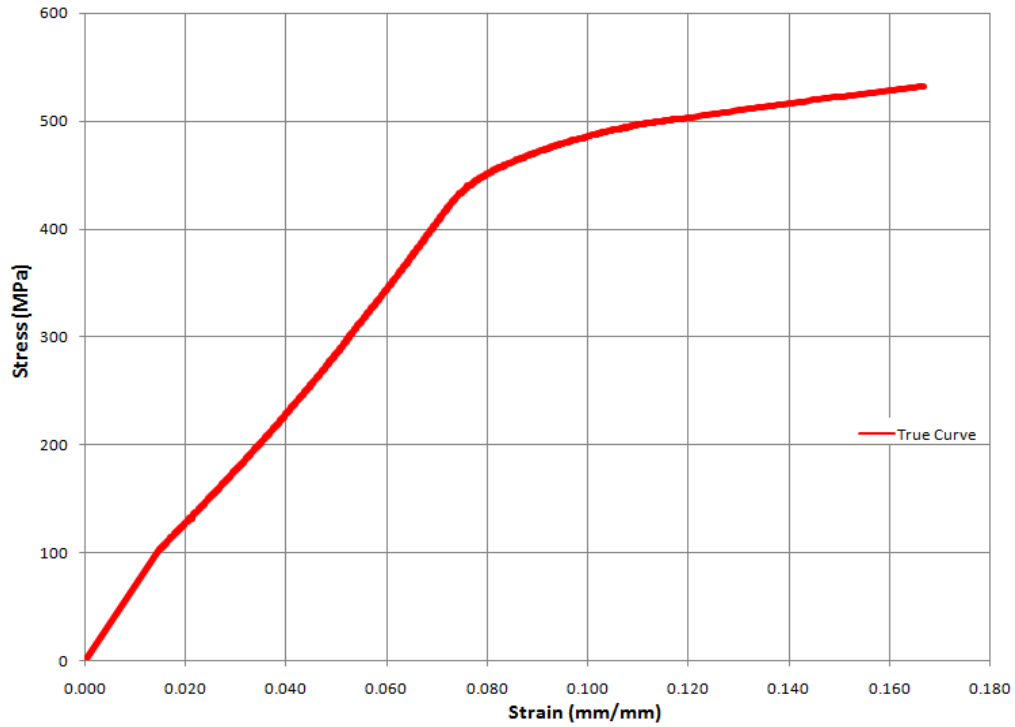
3.3 100 °C Sıcaklık Hasar Analizi

AL 7075 'e ait yapılan ikinci analiz 100 °C de yapılan hasar analizidir. Malzeme özellikleri laboratuvarında yapılan çekme testlerinden elde edilmiştir. Çizelge 3.5'de malzeme özellikleri verimştir.

Çizelge 3.5 : 7075 alaşımın 100 °C de mekanik özellikleri.

Sıcaklık	100 °C
Akma Dayanımı	443 MPa
Kopma Dayanımı	500 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	4.94

Literatürde bulunan AL7075'e ait 100 °C de ki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi önce gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi haline getirilmiş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Malzeme 100 °C sıcaklıkta 4.94 mm çapa düşüş göstermektedir. Şekil 3.9'de 100 °C de gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.9 : 7075-T651 malzemesi için 100 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyine ait sonlu eleman modeli Şekil 3.8'de verilmiştir. Beş farklı hasar modeli için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.6'da verilmiştir. Kopma anındaki hasar, kopma bölgesindeki en yüksek hasar değeri ve en yüksek eşdeğer gerilme ile en yüksek asal gerilme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır.

Hasar değerleri içinde gerilme cinsinden sonuç veren Freudenthal ve Cockroft-Latham hasar modellerinin çıktılarının kopma gerilmesine eşit olması, diğer modeller olan normalize edilmiş Cockroft-Latham, Ayada ve Brozzo modellerinin ise sonuçlarının 1 değerine çok yakın olması beklenmiştir.

Çizelge 3.6 : 100 C de 7075 e ait hasar analizi sonuçları.

	Freudenthal	Cockroft-Latham	C-L Nomalized	Ayada	Brozzo
Hasar	167 MPa	166 MPa	1.10	0.1000	1.25
Birim Uzama	0.347	0.358	0.486	0.383	0.453
Eşdeğer gerilme	610 MPa MPa	624 MPa	610 MPa	611 MPa	520 MPa
Asal gerilme	724 MPa	1090 MPa	929 MPa	740 MPa	574 MPa

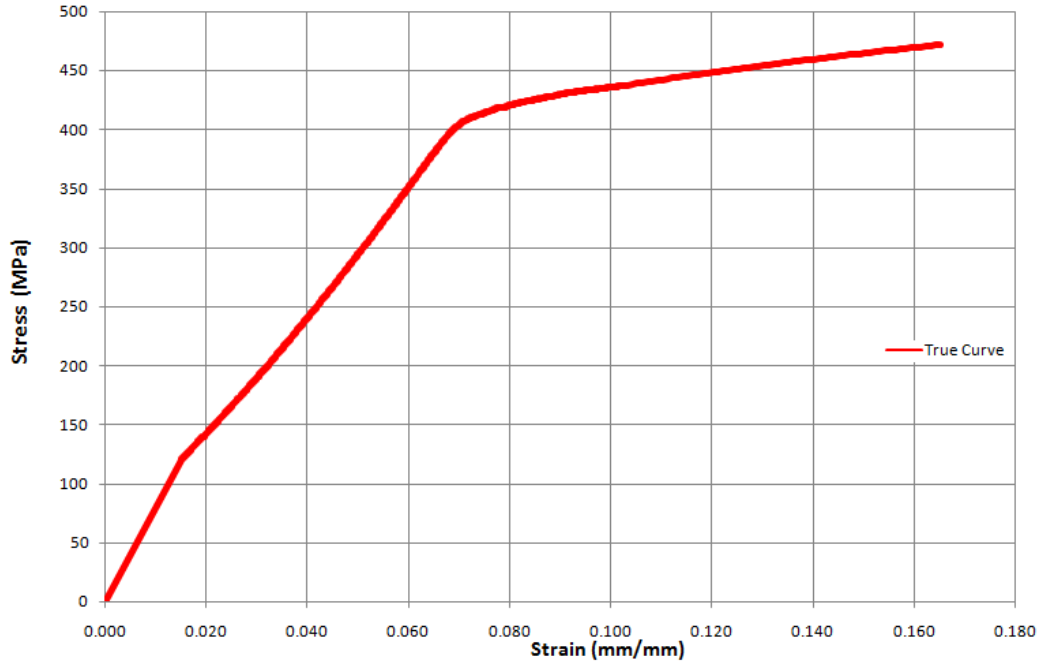
3.4 149 °C Sıcaklık Hasar Analizi

Hasar analizi yapılan bir sonraki sıcaklık ise 149 °C dir. 7075-T651 malzemesinin özellikleri laboratuvarda yapılan çekme testlerinden elde edilmiştir. Çizelge 3.7'de malzeme özellikleri verimiştir.

Çizelge 3.7 : 7075 alaşımın 149 °C de mekanik zellikleri.

Sıcaklık	149 °C
Akma Dayanımı	410 MPa
Kopma Dayanımı	480 MPa
Deney ncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	4.73

Literatürde bulunan AL7075'e ait 149 °C deki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi önce gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi haline getirilmiş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Çekme numunesi 149 °C sıcaklıkta 6 mm den 4.73 mm çapa düşmektedir. Bu değere kadar olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme değerleri hesaplamıştır. şekil 3.10 da 149 °C deki gerilme birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.10 : 7075-T651 149 °C de gerçek gerilme birim şekil değiştirme eğrisi

Çekme deneyinde ait sonlu eleman modeli Şekil 3.8'de verilmiştir. Beş farklı hasar modeli için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.8'de verilmiştir. Kopma anındaki hasar, kopma bölgesindeki en yüksek hasar değeri ve en yüksek eşdeğer gerilme ile en yüksek asal gerilme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır. Hasar değerleri içinde gerilme cinsinden sonuç veren Freudenthal ve Cockroft-Latham hasar modellerinin çıktılarının kopma gerilmesine eşit olması, diğer modeller olan normalize edilmiş Cockroft-Latham, Ayada ve Brozzo modellerinin ise sonuçlarının 1 değerine yakın olması beklenmiştir.

Çizelge 3.8 : 149 °C de 7075'e ait hasar analizi sonuçları.

	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
Hasar	149 MPa	185 MPa	1.11	0.286	1.24
Birim Uzama	0.348	0.336	0.478	0.439	0.462
Eşdeğer gerilme	533 MPa	538 MPa	557 MPa	554 MPa	549 MPa
Asal gerilme	643 MPa	650 MPa	759 MPa	677 MPa	659 MPa

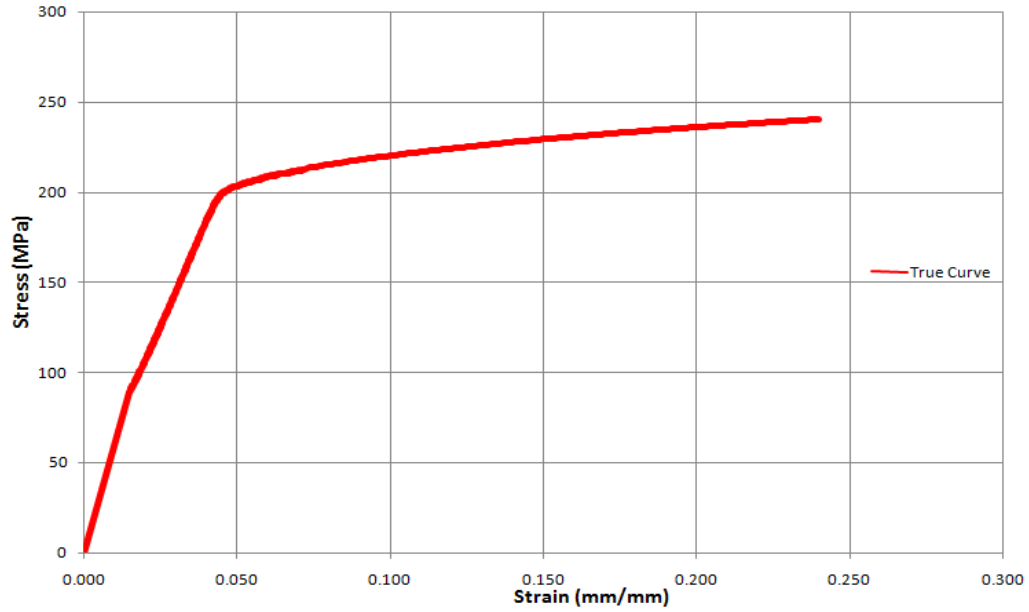
3.5 204 °C Sıcaklık Hasar Analizi

Hasar analizi yapılan bir sonraki sıcaklık ise 204 °C dir. 7075 malzeme özellikleri laboratuvarda yapılan çekme testlerinden elde edilmiştir. Çizelge 3.9'da malzeme özellikleri vermiştir.

Çizelge 3.9 : 7075 alaşımının 204C de mekanik özellikleri.

Sıcaklık	204 °C
Akma Dayanımı	203 MPa
Kopma Dayanımı	240 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	3.38

Literatürde bulunan AL7075'e ait 204 °C de ki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi önce gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi haline getirilmiş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Çekme numunesi 204 °C sıcaklıkta 6mm çaptan 3.38 mm çap değerine düşerek kopmaktadır.. Bu değere kadar olan gerçek gerilme- birim şekil değiştirme değerleri hesaplamıştır. Şekil 3.11'de 204 °C'de ki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.11 : 7075-T651 malzemesine ait 204 °C gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çekme deneyinde ait sonlu eleman modeli Şekil 3.3' de verilmiştir. Beş farklı hasar modeli için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.10'da verilmiştir. Kopma anındaki hasar, kopma bölgesindeki en yüksek hasar değeri ve en yüksek eşdeğer gerilme ile en yüksek asal gerilme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır. Hasar değerleri içinde gerilme cinsinden sonuç veren Freudenthal ve Cockroft-Latham hasar modellerinin çıktılarının kopma gerilmesine eşit olması, diğer modeller olan normalize edilmiş Cockroft-Latham, Ayada ve Brozzo modellerinin ise sonuçlarının 1 değerine yakın olması beklenmiştir.

Çizelge 3.10 : 204 °C'de 7075'e ait hasar analizi sonuçları.

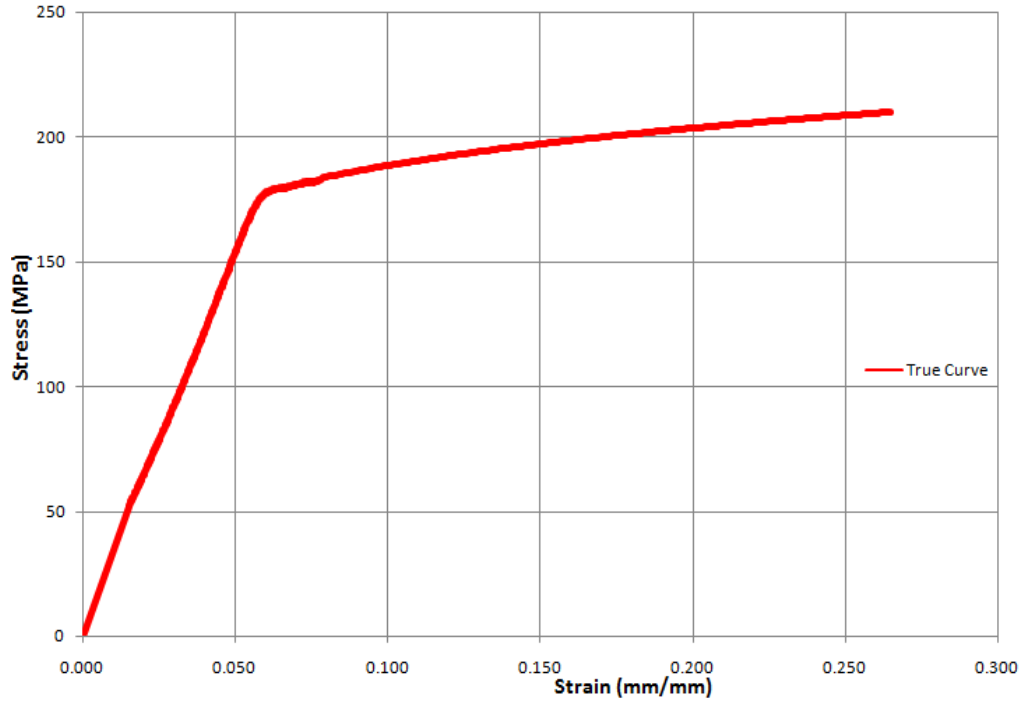
	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
Hasar	159 MPa	198 MPa	1.16	0.376	1.22
Birim Uzama	0.670	0.686	0.494	0.568	0.735
Eşdeğer gerilme	268 MPa	269 MPa	1006 MPa	263 MPa	271 MPa
Asal gerilme	348 MPa	352 MPa	404 MPa	334 MPa	383 MPa

3.6 260 °C Sıcaklık Hasar Analizi

Hasar analizi yapılan son sıcaklık ise 260 °C dir. 7075-T651 Malzeme özellikleri laboratuvarında yapılan çekme testlerinden elde edilmiştir. Çizelge 3.11'de malzeme özellikleri verimiştir. Literatürde bulunan AL7075'e ait 260 °C de mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi önce gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi haline getirilmiş ve sonrasında Ludwik bağıntısı kullanılarak boyun verme bölgesindeki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Çekme numunesi 260 °C sıcaklıkta 6 mm çaptan 3.2 mm kesit çapına düşerek kopmaktadır. Bu değere kadar olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme değerleri hesaplamıştır. Şekil 3.12'de 260 °C'de ki gerilme birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.

Çizelge 3.11 : 7075 alaşımının 260 °C'de mekanik özellikleri.

Sıcaklık	260 °C
Akma Dayanımı	176MPa
Kopma Dayanımı	209 MPa
Deney öncesi kesit çapı (mm)	6
Deney sonrası kesit çapı (mm)	3.2



Şekil 3.12 : 7075-T651 260 C de gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Çekme deneyinde ait sonlu eleman modeli Şekil 3.8' de verilmiştir. Beş farklı hasar modeli için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.12' de verilmiştir. Kopma anındaki hasar, kopma bölgesindeki en yüksek hasar değeri ve en yüksek eşdeğer gerilme ile en yüksek asal gerilme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır. Hasar değerleri içinde gerilme cinsinden sonuç veren Freudenthal ve Cockroft-Latham hasar modellerinin çıktılarının kopma gerilmesine eşit olması, diğer modeller olan normalize edilmiş Cockroft-Latham, Ayada ve Brozzo modellerinin ise sonuçlarının 1 değerine çok yakın olması beklenmiştir.

Çizelge 3.12 : 260 °C'de 7075'e ait hasar analizi sonuçları.

	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
Hasar	195 MPa	192 MPa	1.02	0.372	1.11
Birim Uzama	0.921	0.761	0.804	0.565	1.13
Eşdeğer gerilme	244 MPa	238 MPa	241 MPa	230 MPa	1001 MPa
Asal gerilme	333 MPa	314 MPa	324 MPa	290 MPa	383 MPa

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında ampirik bağıntılar kullanan bazı sünek kırılma modellerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışları incelenmiştir. AL7075 üzerinde yapılan bu çalışma kapsamında öncelikle malzemenin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri literatürden alınarak, DEFORM 2D V.8 yazılımı kullanılarak sonlu eleman modellemeleri yapılmış ve ve hasar sonuçları elde edilmiştir.Yapılan analiz sonuçları sünek hasar modellerinin kopma bölgelerini kısmen başarılı olarak tahmin edebildiklerini gösterse de kopmaya karşılık gelen birim şekil değıştirme miktarlarını ve hasar değerlerini başarılı bir şekilde hesaplayamadıklarını ortaya koymuştur.

Sonuçların başarısı ilgili sıcaklıktaki gerçek kopma gerilmesi değerlerine olan yakınlıklarına göre değerlendirilmiştir. Sünek hasar modelleri içinde en başarılı sonuçları veren model Cockroft-Latham modeli olmuştur. Analiz sonuçlarında elde edilen kopma anındaki en yüksek hasar değerleri malzemenin gerçek kopma gerilmesi en yakın olan değerler Cockrof-Latham hasar modeline aittir. Çizelge 4.1'de hasar modellerinin farklı sıcaklıklarda verdiği sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Hasar kriterlerinin farklı sıcaklıklardaki FEM analizi sonuçları.

	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
100 C	151	165	1.15	0.239	1.04
100 C	167	166	1.10	0.10	1.25
149C	149	185	1.11	0.286	1.24
204 C	159	198	1.16	0.376	1.22
260 C	195	192	1.02	0.372	1.11

Çizelge 4.2 : Deneysel ve sayısal kopma çapı değerleri.

	Kopma kesitleri çapları (mm)					
	Deneysel	Freudenthal	Cockroft-Latham	Normalize edilmiş C-L	Ayada	Brozzo
100 C	5.15	4.26	4.10	4.26	4.26	4.26
100 C	4.91	3.65	3.42	3.45	3.35	3.41
149C	4.73	3.02	2.91	3.00	2.90	2.95
204 C	3.35	-	-	-	-	-
260 C	3.2	-	-	-	-	-

Simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarından elde edilen kopma çapı değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Hasar modelleri arasında en az başarı gösteren model ise Ayada sünek hasar modeli olmuştur. Bu modelin verdiği sonuçların gerçekten bir hayli uzak olmasının sebebi ise yazılımdan kaynaklanan bazı hatalar olabilir.

Bu çalışmanın ötesinde yapılabilecek olanlar arasında sonlu eleman modellemesi için farklı bir paket programın kullanılması sayılabilir. Bu çalışma kapsamında DEFORM 2D yazılımı, içerisinde hasar modellerini içerdiğinden dolayı tercih edilmiştir. Bu yazılıma alternatif olarak ABAQUS ve ANSYS gibi içerisinde kullanıcıya yeni malzeme ve hasar modelleri geliştirmesine izin veren sonlu eleman analiz programları, hasar modellemesi ve analizleri için tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman M.** (1995). Determination of Workability Curves Using Two Mechanical Tests, *Journals of Material Processing Technology*, **51**, 50-63.
- Arentoft M. ve Wanheim T.** (1997). The Basis for a Design Support System to Prevent Defects in Forging, *Journals of Material Processing Technology*, **69**, 227-232.
- Avitzur B.** (1983). Handbook of Metal-Forming Processes, *John Wiley & Sons*.
- Behrens A. ve Just H.** (2002). Verification of damage model of effective stresses in cold and warm forging operations by experimental testing and FE simulations, *Journals of Material Processing Technology*, **125-126** (2002) 295-301.
- Bridgman, P.W.** (1944), The Stress Distribution at the Neck of a Tension Specimen, *Transactions of American Society for Metals*, **32**, (1944), 553.
- Cockcroft M.G. ve Latham D.J.** (1968). Ductility and the Workability of Metals, *Journal of the Institute of Metals*, **96**, 33-39.
- DEFORM Users Manual**, 2000, Scientific Forming Technologies Corporation, Version 7.1.
- Ettouney O. ve Hardt D.E.** (1983). A method for In-Process Failure Prediction in Cold Upset Forging, *Journal of Engineering for Industry*, **105**, 161-167
- Koçak, İ.** (2003). Analysis of Formability of Metals, ODTÜ, ANKARA, (Yüksek Lisans Tezi). Adres: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/1178714/index.pdf>.
- Koçaker, B.** (2003). Product Properties Prediction After Forming Process Sequence, ODTÜ, ANKARA, (Yüksek Lisans Tezi). Adres: <http://www.ekoendustri.com/EkoColdform/dokuman/PRODUCT%20PROPERTIES%20PREDICTION%20AFTER%20FORMING%20PROCESS%20SEQUENCE.pdf>
- Lange K.** (1985). Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill.
- Lee E.H. ve McMeeking R.M.** (1977). On a Theory of Central Burst or Chevroning Defect in Drawing and Extrusion, Stanford University. Dept. of Mechanical Engineering. Division of Applied Mechanics, Stanford, Kaliforniya, A.B.D.
- Lemiatre J.** (1996). A Course on Damage Mechanics, Springer Verlag .

Oyane M., Sato T., Okimoto K. ve Shima S. (1980). Criteria for Ductile Fracture and Their Applications, *Journal of Mechanical Working Technology*, **4**, 65-81.

Rice J.R. ve Tracey D.M. (1969). On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields, *Journal of Mech. Phys. Solids*, **17**, 201-217.

Shabara M.A., El-Domiaty A.A. ve Kandil A. (1996). Validity Assessment of Ductile Fracture Criteria in Cold Forming, *Journal of Material Engineering and Performance*, **5**, 478-488.

Takuda H., Mori K. ve Hatta N. (1999). The Application of Some Criteria for Ductile Fracture to the Prediction of the Forming Limit of Sheet Metals, *International Journal of Solids and Structures*, **95**, 116-121.

MATWEB Online Materials Information Resource, (2012),

Url-1 <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1>>, alındığı tarih:

01.03.2012

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hakkı Işık

Doğum Yeri ve Tarihi: Manisa 1984

Adres: Gülbahar Mah. Biberiye Sk. No 16 Şişli İstanbul

E-Posta: isikhak@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve ödüller : Ford Otosan Otomotiv San. A.Ş. (2008-2011)

General Electric Havacılık (2011-2012)